

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO - CHILE



EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE INCORPORAR LA TECNOLOGÍA MICROESFERAS DE VIDRIO HUECAS FUNCIONALIZADAS PARA INCREMENTAR LA RECUPERACIÓN DE MOLIBDENO EN PLANTAS FLOTACIÓN.

IGNACIA ASTUDILLO LAZO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

PROFESOR GUÍA: Dr. CLAUDIO ACUÑA PÉREZ

PROFESOR COREFERENTE: Ing. FERNANDO ESPERGUES ZUÑIGA

ENERO 2025

Resumen Ejecutivo

El molibdeno es un metal principalmente utilizado en la fabricación de lubricantes y aleaciones de acero debido a sus propiedades de resistencia. Chile es uno de los principales productores del concentrado correspondiendo al 20% de la producción mundial, pero dentro de su obtención se presenta la problemática de un amplio rango de recuperación variando de un 30-90% implicando que el porcentaje restante es perdido de manera irreversible. Estas pérdidas están asociadas principalmente a la presencia de partículas finas ($<20\mu\text{m}$), las cuales cuentan con una baja probabilidad de colisión y en consecuencia no logran ser recuperadas.

Con el fin de disminuir la pérdida de molibdeno y aumentar su recuperación, se estudia el uso de un carrier de flotación, en este caso microesferas de vidrio huecas hidrofobizadas (MVHH) el cual ha demostrado aumentar de manera significativa la recuperación de partículas bajo los $20\mu\text{m}$ de cobre, ilmenita y titanita.

Con dicho antecedente surge la necesidad de analizar el comportamiento que tendrán las MVHH en la recuperación de finos de molibdeno, lo que dio paso a la realización de pruebas de flotación batch para una pulpa con un P_{80} de $25\mu\text{m}$ cuyos resultados permitieron realizar curvas de cinética de flotación y ley-recuperación. Los resultados obtenidos fueron favorables para el uso de MVHH en el sistema, logrando aumentar la recuperación de un 46% a un 58% y además un desplazamiento positivo de la curva ley-recuperación, indicando un mayor rendimiento metalúrgico.

A partir del resultado favorable de las MVHH sobre el molibdeno, se evaluó su implementación dentro de un caso de estudio, siendo la planta seleccionada El Teniente. Donde mediante datos granulométricos y análisis de nodos, se determinó que la primera etapa de limpieza es una de las que cuenta con mayor porcentaje de partículas $<20\mu\text{m}$ con un 48,3% y es la que tiene mayor incidencia en la recuperación global del sistema por lo cual se determinó como el punto óptimo de adición.

En tanto a la evaluación económica al inyectar MVHH al sistema, se obtuvo un CAPEX de 0,15 [MMUSD] y un OPEX de 74,4 [MMUSD/año]. Realizando el flujo de caja correspondiente se obtuvo un VAN de 155 [MMUSD] y un TIR de un 99% teniendo un payback dentro del primer mes de funcionamiento con utilidades de 15,4 [MMUSD], lo cual indica la factibilidad y beneficio de la implementación de MVHH en un sistema de flotación.

Contenido

Resumen Ejecutivo.....	2
Capítulo 1. Introducción.....	8
1.1. Objetivos	10
1.2. Alcances	11
1.3. Estructura.....	11
Capítulo 2. Causas de pérdida de molibdeno en sistema de flotación.....	13
2.1. Tamaño de partícula y probabilidad de colisión	13
2.2. Iones	15
2.3. Oxidación en superficie.....	19
2.4. Potencial redox.....	21
2.5. Conclusiones	22
Capítulo 3. Alternativas tecnológicas para la recuperación de molibdeno	23
3.1. DAF (Disolved Air Flotation).....	23
3.2. Celda Jameson.....	24
3.3. Control de arrastre hidráulico mediante espumante	28
3.4. Depresores.....	30
3.5. Colectores (aglomerantes).....	33
3.6. Uso de microesferas de vidrio huecas funcionalizadas	36
3.7. Conclusiones	39
Capítulo 4. Metodología de funcionalización de microesferas de vidrio	41
4.1. Eterificación de superficie.....	41
4.2. Materiales, equipos y metodología experimental.....	42
4.3. Conclusiones	43
Capítulo 5. Validación de tecnología, uso de MVHH en flotación de molibdeno (TRL5).....	45
5.1 Metodología de implementación.....	45
5.2. Reconciliación de datos.....	46
5.3. Análisis de resultados.....	46
5.4. Conclusiones	50
Capítulo 6. Caso estudio para evaluación de MVHH en planta	51
6.1. Determinación de punto de adición.....	51
6.3. Dosificación e inyección de MVHH	55
6.4. Conclusiones	56

Capítulo 7. Determinación de costos y evaluación económica	58
7.1. CAPEX.....	58
7.2. OPEX	59
7.3. Flujo de caja	60
7.4. Indicadores económicos	60
7.5. Análisis de sensibilidad.....	61
7.4. Conclusiones	64
Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones.....	65
7.1. Conclusiones	65
7.2. Recomendaciones.....	66
Referencias.....	67
Anexos.....	71
Anexo A: Resultados experimentales.....	71
Anexo B: Caso de estudio y determinación punto de adición.....	72
Anexo C: Evaluación de caso estudio	82
Anexo D: Evaluación económica.....	84

Índice de Figuras

Figura 1. 1: Gráfico recuperaciones a nivel nacional.	8
Figura 1. 2: Recuperación en función de tamaño de partícula (Triffett et al., 2008)	9
Figura 1. 3: Representación colisión partícula-burbuja para diferentes tamaño de partícula (Arriagada et al., 2020).	10
Figura 2. 1: Probabilidad colisión partícula-burbuja para distintos tamaños de partícula	15
Figura 2. 2: Recuperación y ley de molibdeno en función de incremento de iones de calcio (Wan et al., 2023).....	17
Figura 2. 3: Recuperación de molibdenita en función de la concentración de iones de cobre y sulfuro (Zhao et al., 2018).....	18
Figura 2. 4: Comportamiento de ley y recuperación de molibdeno según concentración de iones de cobre (Zhao et al., 2018)	18
Figura 2. 5: Efecto de la oxidación de superficie en la flotabilidad en presencia de colector (Yang et al., 2024).....	20
Figura 2. 6: Efecto de la oxidación en ángulo de contacto (Yang et al., 2024).....	21
Figura 3. 1: Recuperación para distintos tamaños de burbuja (Capponi et al., 2003).....	24
Figura 3. 2: Diagrama celda (Yianatos, 2005)	25
Figura 3. 3: Comparación entre celda piloto y columna planta (Lawson, 2016)	26
Figura 3. 4: Recuperación respecto a tipo de celda (Atkinson, Griffin, et al., 1993).....	27
Figura 3. 5: Recuperación según tipo de celda (Lawson, 2016)	28
Figura 3. 6: Recuperación respecto a espumante (Kracht et al., 2016).....	29
Figura 3. 7: Recuperación de molibdenita y calcopirita en función de concentración de depresor 3-Rd (C. Wang et al., 2021).....	31
Figura 3. 8: Recuperación de molibdenita y calcopirita en función de concentración de depresor GX2 (Y. Lin et al., 2023)	32
Figura 3. 9: Comparación depresor GX2 y Na ₂ S (Y. Lin et al., 2023).....	32
Figura 3. 10: Comparación recuperación al usar PEO como colector (Li et al., 2020)	34
Figura 3. 11: Comparación cobertura de burbuja según colector utilizado (Chao et al., 2021).....	35
Figura 3. 12: Recuperación de finos según colector utilizado (Chao et al., 2021).....	35
Figura 3. 13: Esquema de reacción de esterificación de sílice (Arriagada, 2018)	36
Figura 3. 14: Esquema de recubrimiento de MVHH con partículas finas (Arriagada, 2018)	36
Figura 3. 15: Gráfica comparativa de probabilidad de colisión partícula-burbuja según tamaño.....	37
Figura 3. 16: Recuperación de Cu con y sin asistencia de MVHH (Arriagada, 2018).....	37
Figura 3. 17: Comportamiento de recuperación de ilmenita e titanita con y sin uso de MVHH (Chen et al., 2021).....	38
Figura 3. 18: Comparación de recuperación de Cu con y sin uso de MVHH (Garfe, 2023)	39
Figura 4. 1: Configuración sistema de funcionalización.....	43
Figura 5. 1: Ajuste de modelo G-Z a recuperación de partículas finas de molibdeno	47
Figura 5. 2: Ajuste de modelo Klimpel a recuperación de partículas finas de molibdeno	48
Figura 5. 3: Curva ley-recuperación finos molibdeno.....	49

Figura 6. 1:Diagrama de procesos de circuito de flotación	51
Figura 6. 2:Porcentaje de partículas finas (<20 µm) en colas	52
Figura 6. 3:Diagrama de nodos asociado a proceso	53
Figura 6. 4:Efecto de sensibilización de etapa cleaner 1 en recuperación global	54
Figura 7. 1: Flujo de caja asociado.....	60
Figura 7. 2: Precio molibdeno a lo largo de los años	62
Figura 7. 3: Sensibilización VAN costo MVHH.....	62
Figura 7. 4: Sensibilización TIR costo MVHH.....	63
Figura 7. 5:Sensibilización VAN costo Mo	63
Figura 7. 6:Sensibilización TIR costo Mo.....	64
Figura B. 1:Diagrama de nodos con corrientes detalladas	79
Figura C. 1: Planilla de calculo dosificación de MVHH.....	83
Figura D. 1: Planilla estimación de costo MVHH.....	84
Figura D. 2: Flujo de caja asociado al proyecto	85

Índice de tablas

Tabla 5. 1:Parámetros obtenidos mediante modelo G-Z y Klimpel para partículas finas.....	48
Tabla 6. 1:Recuperaciones de cada etapa asociada al proceso	51
Tabla 6. 2: Información corriente cola cleaner 1.....	55
Tabla 6. 3: Especificaciones técnicas estanque agitado	55
Tabla 6. 4: Especificaciones técnicas bomba diafragma	56
Tabla 6. 5: Especificaciones técnicas compresor.....	56
Tabla 7. 1: Costos estanque agitado	58
Tabla 7. 2: Costos equipos	58
Tabla 7. 3: Detalle de porcentajes de contingencia y puesta en marcha	59
Tabla 7. 4: Costos operacionales variables asociados.....	59
Tabla 7. 5: Costos de mantención de equipos.	59
Tabla 7. 6: Indicadores económicos.....	61
Tabla A. 1:Masa en concentrado y leyes asociadas	71
Tabla A. 2: Resultados reconciliados.....	72
Tabla B. 1:Descripción de cada corriente asociada al proceso	72
Tabla B. 2:Información granulometrica de cada corriente	73
Tabla B. 3: Datos ajuste modelo Rosin-Rammler	78
Tabla B. 4: Datos sensibilización por etapa	79
Tabla D. 1: Depreciación de equipos anual.....	84

Capítulo 1. Introducción

La flotación de minerales, principalmente la de molibdeno, se ve enfrentada a diversos desafíos siendo uno de ellos los variables y bajas recuperaciones, como lo es el caso de la planta Sarcheshmeh ubicada en Irán, su recuperación de molibdeno varía de un 20% hasta un máximo de 75% (Nakhaei & Irannajad, 2014). Mientras que a nivel nacional se cuenta con los siguientes datos:

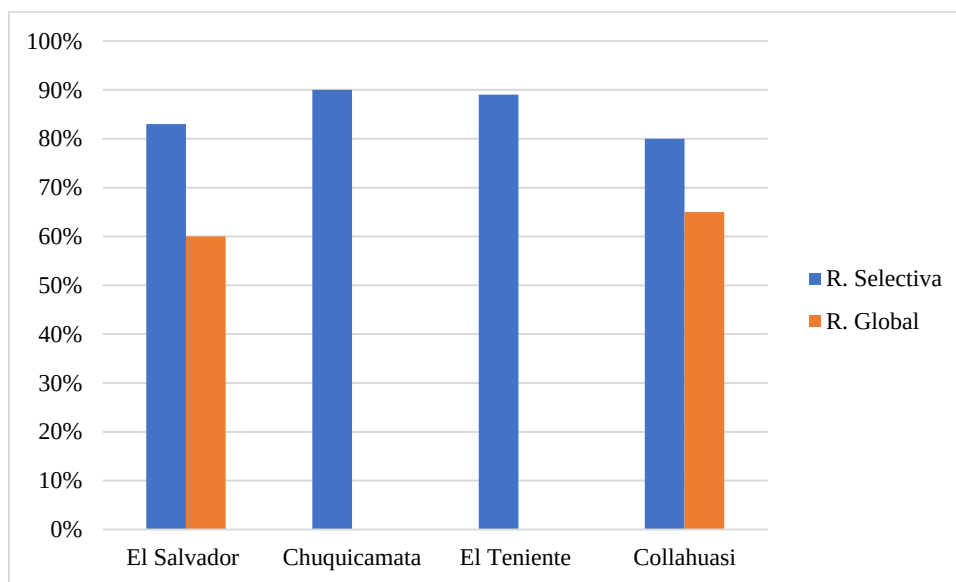


Figura 1. 1: Gráfico recuperaciones a nivel nacional.

La variación del porcentaje de recuperación ha demostrado a estar ligado a la presencia de partículas finas (<25 micrones) dentro del sistema, como es mostrado en el ejemplo de la Figura 1.2. donde bajo cierto tamaño de partícula el porcentaje de recuperación se ve disminuido, dichas partículas que no logran ser recuperadas son descargadas posteriormente a relave, resultando en la pérdida irreversible de las partículas de mineral.

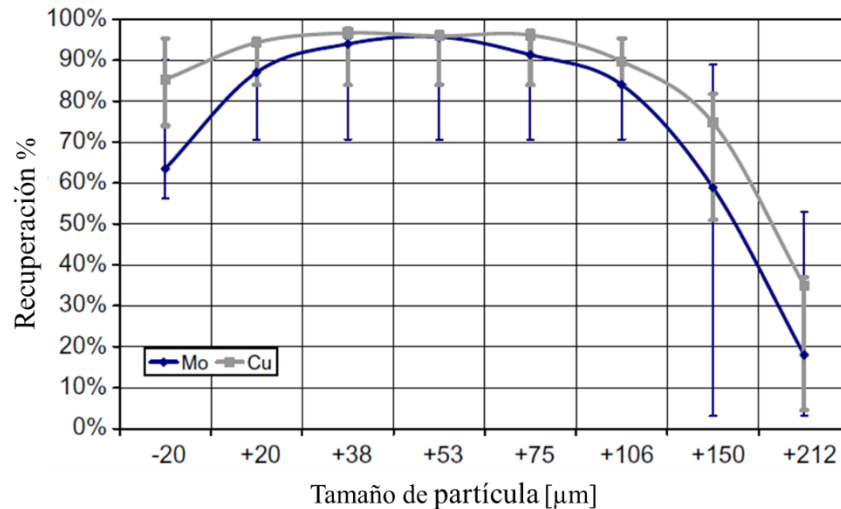


Figura 1. 2: Recuperación en función de tamaño de partícula (Triffett et al., 2008)

La generación de dichas partículas finas se da principalmente en la etapa de molienda, ya que el principal estado de los recursos de molibdeno, la molibdenita (MoS_2) está asociada a la calcopirita (CuFeS_2) (H. Peng et al., 2017), por lo que aproximadamente la mitad de la producción de molibdeno proviene como un producto secundario de la concentración de cobre (Zhao et al., 2018). Por lo que la etapa de molienda es un proceso fundamental para incrementar la liberación de la molibdenita, aunque esta puede resultar perjudicial si se obtienen partículas ultrafinas, ya que la hidrofobicidad de un mineral se ve determinado por su tamaño (Trahar, 1981). En el caso de la molibdenita, las partículas de gran tamaño son consideradas naturalmente hidrofóbicas y por lo tanto flotables, pero a medida que su tamaño disminuya, la razón entre superficies y bordes disminuye, reduciendo así su hidrofobicidad y eficiencia de flotación, ya que los bordes cuentan con características hidrofílicas (Q. Lin et al., 2018).

Otro factor sumamente relevante que se ve afectado directamente por el tamaño de partícula, es la probabilidad de colisión partícula burbuja, esta indica la probabilidad en que la partícula de mineral y la burbuja de aire entren en contacto, esta principalmente influenciada por el tamaño de partículas y burbujas del sistema. En el caso de las partículas finas ($<25 \mu\text{m}$) estas están ligadas a la baja probabilidad de colisión con las burbujas de aire generadas en la flotación convencional (Q. Lin et al., 2018). Debido a que las características físicas de las partículas finas propician la desviación de estas mismas, siguiendo las líneas de flujo provocadas por las burbujas en ascenso y evitando la colisión con estas (Figura 1.3.)

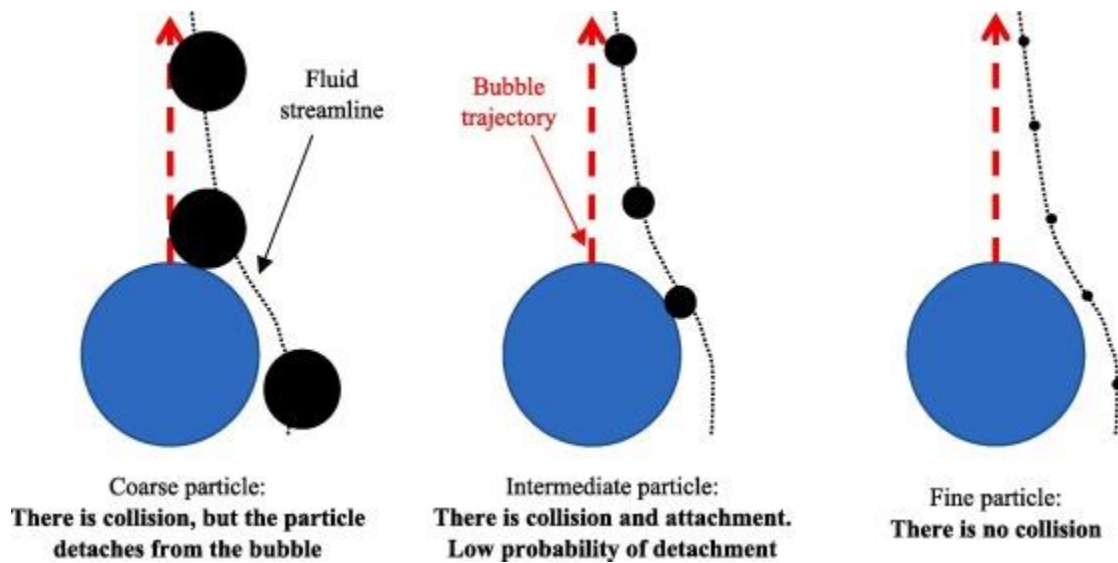


Figura 1. 3: Representación colisión partícula-burbuja para diferentes tamaño de partícula (Arriagada et al., 2020).

Con lo anteriormente mencionado, es posible indicar que la recuperación de mineral en los sistemas de flotación está condicionada por el tamaño de partícula que se tenga presente, por lo que es necesario contar con un tamaño óptimo de partícula que propicie la colisión y adhesión a las burbujas.

A pesar de la existencia de diferentes tecnologías disponibles como celdas de flotación, colectores y depresores, es necesaria la evaluación de una tecnología que permita transportar y aumentar la probabilidad de colisión para una mayor recuperación.

1.1.Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos que se llevarán a cabo durante la investigación

Objetivo general

Realizar evaluación técnica y económica de la implementación de un carrier de flotación para incrementar la recuperación de finos en caso estudio.

Objetivos específicos

1. Analizar y cuantificar las causas de pérdida de molibdeno en plantas concentradoras, a partir de literatura específica y casos de estudio.
2. Realizar un benchmarking de alternativas tecnológicas para recuperación de molibdeno (reactivos, carrier, aire disuelto, celdas neumáticas).

3. Evaluar en un caso de estudio el uso de microesferas, a partir de resultados experimentales, sensibilizando el punto de adición, mediante análisis de nodos, con el propósito de determinar la ingeniería requerida para la implementación en planta.
4. Proponer la ingeniería básica y respectiva estimación de capex y opex que termina obtener la evaluación económica de implementación de la tecnología en plantas seleccionada

1.2.Alcances

El presente tiene como foco evaluar el uso de microesferas de vidrio funcionalizadas en el proceso de recuperación de molibdeno, con el objetivo de incrementar la recuperación del último mencionado.

Como entregable, se contará con datos que permitan analizar la eficiencia de la tecnología y la determinación del punto de adición en un circuito de estudio mediante análisis de nodos. Además de la determinación de costos asociados y beneficio económico de la implementación de la tecnología.

se contará con la ingeniería básica de implementación de la tecnología a un caso de estudio determinado, junto a los costos asociados, considerando los indicadores y beneficio económico.

1.3.Estructura

La memoria es organizada en 8 capítulos, estructurados de la siguiente forma:

Capítulo 1. Introducción: Se presenta introducción a problemática de baja recuperación de molibdeno

Capítulo 2. Pérdidas de molibdeno por baja recuperación: Se da a conocer las diversas causas que están ligadas a una baja recuperación de mineral.

Capítulo 3. Alternativas tecnológicas para la recuperación de molibdeno: Se presentan las alternativas disponibles que ya han sido evaluadas y respaldadas científicamente para aumentar la recuperación de partículas finas, mencionando fortalezas y debilidades, con la finalidad de realizar una comparación con la tecnología que se hará uso, en este caso microesferas de vidrio funcionalizadas.

Capítulo 4. Metodología de funcionalización de microesferas de vidrio: Se detalla la reacción que hay detrás de las MVHH, junto el procedimiento paso a paso y los materiales y equipos necesarios para su producción.

Capítulo 5. Implementación de microesferas de vidrio funcionalizadas en caso de estudio: Mediante resultados experimentales de pruebas cinéticas de flotación se determina la eficiencia del uso de las MVHH en clases de tamaño gruesas (150 [μm]) y finos (25 [μm]) que es el foco de la investigación.

Capítulo 6. Diseño de ingeniería básica para implementación: Se indica el procedimiento para determinar el punto óptimo de adición en el sistema, considerando una configuración para la flotación selectiva de molibdeno y haciendo uso de análisis de nodos.

Capítulo 7. Determinación de costos y evaluación económica: Se realiza cálculo de gastos de capital y gastos operacionales (CAPEX y OPEX respectivamente) considerando costos asociados a la implementación, presentando finalmente un estimado del beneficio económico que llegaría a lograrse con la implementación de las MVHH.

Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones: Se presentan las conclusiones obtenidas a partir de la investigación junto con recomendaciones para posibles investigaciones futuras.

Capítulo 2. Causas de pérdida de molibdeno en sistema de flotación

Dentro del proceso de flotación de minerales, la recuperación eficiente de molibdeno representa un desafío debido a los diversos factores que afectan su comportamiento. Ya que las pérdidas en el sistema son el resultado de interacciones de variables físicas, químicas y electroquímicas. A continuación, se aborda en detalle las principales causas de estas pérdidas con el fin de comprender la fenomenología que hay por detrás para optimizar y maximizar la recuperación en el proceso de flotación.

2.1. Tamaño de partícula y probabilidad de colisión

El tamaño de partícula es un factor crítico en el proceso de recuperación de minerales, ya que este puede afectar de manera significativa la eficiencia y la selectividad de los métodos de separación, ya sea estemos hablando de partículas que sean consideradas finas o gruesas. Debido a que ambas presentarán un comportamiento diferente frente a la hidrodinámica del sistema.

Los minerales flotables generalmente presentan un rango acotado de tamaño de partícula donde la flotación ocurre de manera óptima, los límites siendo determinados por el sistema (Trahar, 1981). Por lo cual realizar estudios sobre el comportamiento de la recuperación en función de tamaño es esencial para lograr una óptima recuperación.

Con relación a lo planteado previamente, es un ejemplo claro el caso de la mina Bingham Canyon, donde se analizó la recuperación de cobre y molibdeno en función del tamaño de partícula, obteniendo como resultado que el molibdeno alcanza su mayor recuperación en el rango de 38-75 micrones, mientras que esta misma cae de manera significativa en tamaños fuera de rango (Triffett et al., 2008). Es necesario hacer la mención de que los límites de tamaño para lograr una recuperación eficiente serán variables, dependiendo de las propiedades y mineralogía del mineral objetivo (Leistner et al., 2017).

Con este antecedente, es necesario indagar en las razones por la que ocurre este bajo porcentaje de recuperación. Centrando el análisis en la fracción fina, debido a que la mayoría de los minerales contienen valioso de forma dispersa y ocluida, es necesario que sean sometidas a un proceso de chancado y molienda, ya que usualmente el grado de liberación de minerales valioso aumenta con la disminución de su tamaño de partícula (Fornasiero & Filippov, 2017). Además, en el caso del molibdeno, debido a su ductilidad, el mineral se adhiere a las bolas de acero y recubrimiento de

paredes, resultando en la producción de finos menores a 38 micrones durante el proceso de molienda (Lei et al., 2023)

Con la disminución de tamaño se ven alterados diversos factores que influyen en una recuperación eficiente de mineral, uno de ellos ligados directamente a la anisotropía del mineral, ya que un mineral de estas características se distingue por tener diferentes propiedades dependiendo del lado del cristal. En este caso, la molibdenita exhibe dos tipos de superficie teniendo caras de carácter hidrofóbico las cuales son responsables de la flotabilidad natural del mineral y bordes hidrofílicos (Castro et al., 2016) por lo que, al disminuir el tamaño de partícula, también lo hará la razón cara borde y por consiguiente la hidrofobicidad del mineral (Yi et al., 2021).

Otro de los factores que se ven afectados por el tamaño de partícula, es el ángulo de contacto el que debe tener un valor mínimo crítico para que se lleve a cabo la flotación ya que la recuperación de partículas finas es una función del ángulo de contacto y tamaño. Precisamente, la recuperación aumenta al incrementar el ángulo de contacto y decrece con el decrecimiento de tamaño de partícula (Chipfunhu et al., 2011).

Pero, el mayor desafío que enfrentan las partículas finas es su poca probabilidad de colisión con la burbuja de aire, esto debido a su baja fuerza inercial, las partículas son desviadas por fuerzas de arrastre hidráulicas a causa de las burbujas ascendentes. Por esto, los finos seguirán las líneas de flujo alrededor de las burbujas en lugar de colisionar con estas últimas.

Debido a lo anteriormente planteado, la probabilidad de colisión partícula-burbuja juega un papel crucial en la recuperación de partículas finas por lo que es fundamental mantener un tamaño adecuado de partícula como de burbujas para así garantizar una mayor eficiencia de recuperación. Se considera el siguiente modelo (Ec.1) de probabilidad de colisión partícula-burbuja (Arriagada, 2018) el cual incluye el número de Stokes.

$$P_c = \frac{(3,83 + 6,30 \cdot Re_b^{0,34})}{Re_b^{0,75}} \cdot St^{0,75} \cdot \left(\frac{D_p}{D_b}\right)^{0,5} \quad (Ec. 1)$$

El número de Stokes (Ec.2) tiene la finalidad de representar la razón entre las fuerzas inerciales y de arrastre que actúan sobre la partícula de mineral (Arriagada, 2018).

$$St = \frac{1}{9} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_l} \cdot \left(\frac{D_p}{D_b}\right) \cdot Re_b \quad (Ec. 2)$$

El modelo previamente mencionado es utilizado para analizar la probabilidad de colisión que tendrán las partículas finas de molibdeno, se consideran tamaños de partícula de 5, 10, 15 y 25 μm dentro de un rango de tamaño de burbujas de 0,02 a 1,5 mm (Figura 2.1)

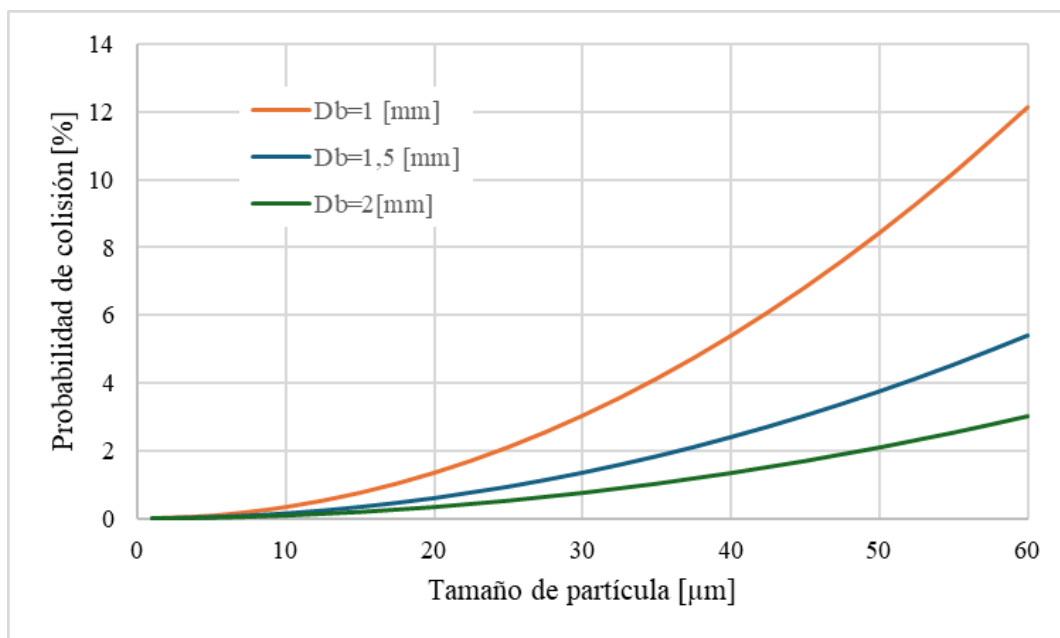


Figura 2. 1: Probabilidad colisión partícula-burbuja para distintos tamaños de partícula

Es evidente la baja probabilidad de colisión que tienen las partículas finas, de ahí su baja recuperación en los procesos de flotación. Es visible un aumento considerable de la probabilidad de colisión al aumentar el tamaño de partícula, pero solo para burbujas bajo los 0,50 mm .

Considerando partículas sobre los 40 μm se evidencia que la probabilidad de colisión aumenta de manera considerable, sin la necesidad de disminuir el tamaño de burbuja.

En resumen, la baja probabilidad de colisión afecta de gran manera la oportunidad de recuperar las partículas finas, ya que estas son más susceptibles a ser recuperadas por arrastre (L. Wang et al., 2015), afectando la selectividad del proceso al recuperar tanto parte del mineral objetivo como ganga (Yianatos et al., 2009) por lo que el tamaño de partícula tiene un impacto significativo en la eficiencia de flotación, donde principalmente las partículas finas presentan limitaciones, por lo cual es crucial contar con un tamaño intermedio de partícula que logre ser flotado sin la necesidad de microburbujas.

2.2. Iones

El efecto de los iones presentes en la pulpa puede tener efectos perjudiciales sobre la recuperación de mineral. A continuación, se indican los principales iones que afectan directamente a la flotación de molibdenita:

- Ca^{+2}
- Mg^{+2}
- Cu^{+2}
- Fe^{+3}
- Na^{+}
- K^{+}

Los cationes de Ca^{+2} y Mg^{+2} se hacen presentes debido a los minerales ganga que puedan existir en la pulpa, como lo es el talco y la caolinita (Yi et al., 2021) además de la posible adición de cal como inhibidor de flotación de pirita, dichos cationes han demostrado producir una disminución de la flotabilidad de molibdenita en numerosos estudios (Pestryak et al., 2019) debido a la adsorción en la superficie produciendo la formación de precipitados hidrofílicos.

Adicionalmente, el catión Ca^{+2} puede inhibir el efecto de absorción de hidrocarburos (colectores) en la superficie de molibdenita, impidiendo resultados favorables de recuperación (Wan et al., 2023). Mientras que los cationes Na^{+} y K^{+} facilitan la oxidación y lixiviación de átomos de Mo en la superficie de molibdenita, disminuyendo su hidrofobicidad (Yi et al., 2021).

En una investigación realizada por Wan et al. (2023) determinó que los efectos de los iones pueden ir incrementando debido a que la concentración de iones se acumula durante el proceso de recirculación de agua. En dicha investigación se llevaron a cabo pruebas de flotación de molibdeno en función del incremento de concentración del catión Ca^{+2} obteniendo los resultados indicados en la Figura 2.2.

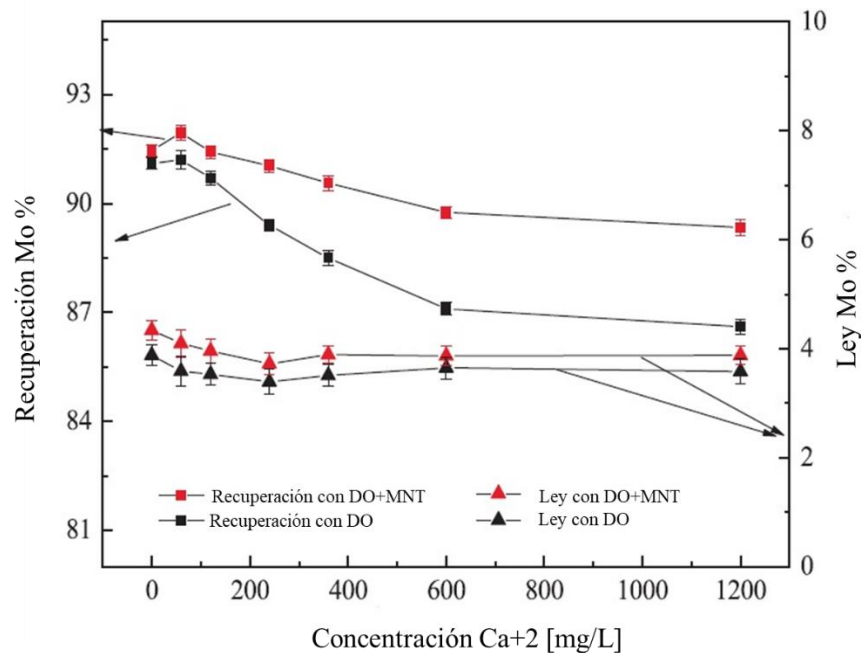


Figura 2. 2:Recuperación y ley de molibdeno en función de incremento de iones de calcio (Wan et al., 2023)

Los resultados indican que la presencia del catión Ca^{+2} en concentraciones menores a 120 mg/L tiene un resultado positivo sobre la flotación. Al contrario, a medida que aumenta la concentración del catión en la pulpa, la flotación de molibdeno se ve reprimida y por consiguiente la recuperación disminuye aún con la presencia de colectores.

Otro ion que ha sido investigado es el de cobre (Cu^{+2}) y es claro que cuando se habla de flotación Cu-Mo es inevitable tenerlos. En la investigación realizada por Zhao et al. (2018) se evaluó el efecto de la presencia de iones S^{-2} y Cu^{+2} , en las pruebas de flotación se registró que el ion S^{-2} no tiene un efecto negativo sobre la flotación, en cambio en presencia de Cu^{+2} , se redujo de manera considerable la recuperación. Al incluir ambos iones, se produjo una disminución notable de recuperación incluso a bajas concentraciones de Cu^{+2} (Figura 2.3.)

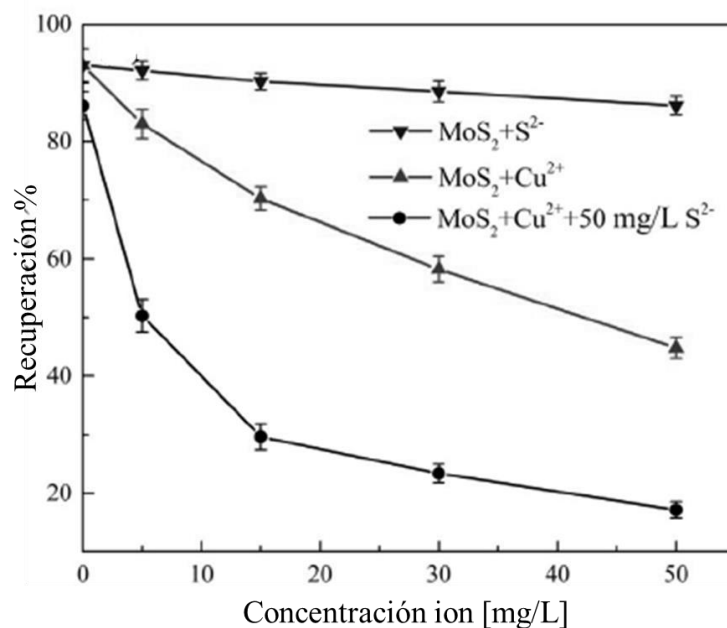


Figura 2. 3: Recuperación de molibdenita en función de la concentración de iones de cobre y sulfuro (Zhao et al., 2018)

A su vez, se investigó la eficiencia de separación Cu-Mo utilizando Na₂S como depresor a diferentes concentraciones de Cu²⁺. En ausencia del catión de cobre se obtuvo una recuperación favorable, mientras que frente a la adición de Cu²⁺ la recuperación disminuyó de manera drástica (Figura 2.4.)

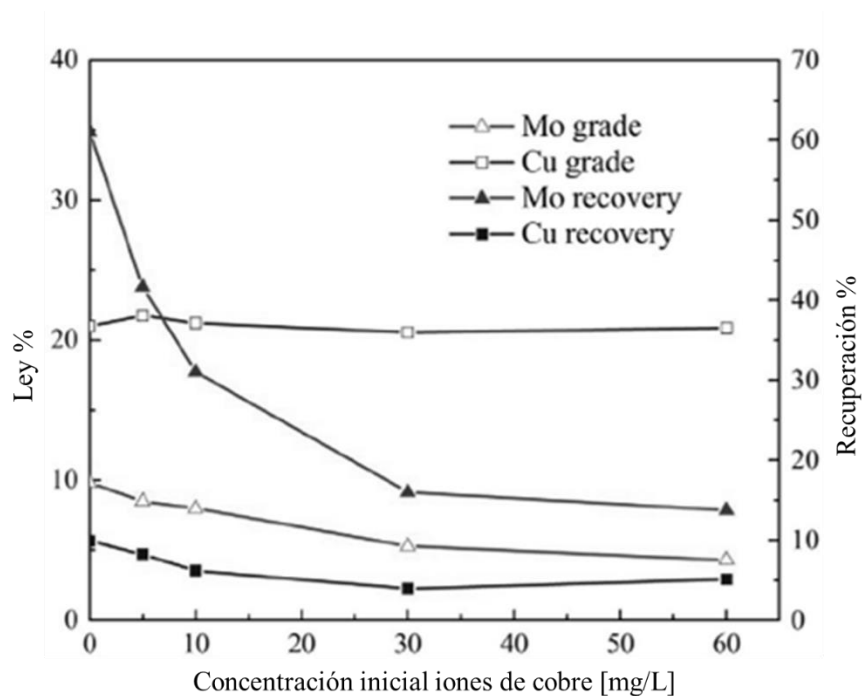


Figura 2. 4: Comportamiento de ley y recuperación de molibdeno según concentración de iones de cobre (Zhao et al., 2018)

Considerando que el Na_2S corresponde a un depresor de calcopirita, es claro que, frente a los cationes de cobre, ambos minerales se ven inhibidos haciendo la recuperación más difícil.

A partir de lo expuesto, es posible saber que la presencia de ciertos iones es perjudicial en la recuperación de molibdeno, por lo tanto, es un parámetro necesario de estudio dentro de las posibles causas de bajas recuperaciones.

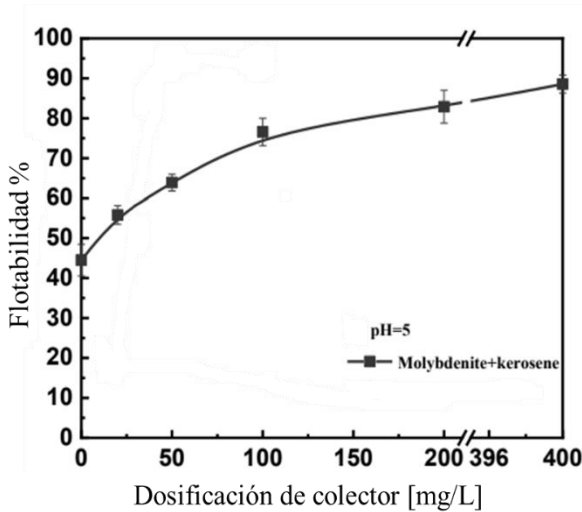
2.3. Oxidación en superficie

Según investigaciones, la oxidación que se lleva a cabo en la superficie del mineral es uno de los factores importantes que influyen en la selectividad y recuperación del proceso de flotación en el procesamiento de sulfuros complejos (Kelebek, 1993) ya que se causará presencia de óxidos e hidróxidos en la superficie del mineral, estos últimos aumentando en gran cantidad frente oxidaciones prolongadas (Y. Peng & Zhao, 2011), lo que podrá reducir la hidrofobicidad haciendo necesaria la utilización de altas dosis de reactivos para alcanzar altas recuperaciones (Peres et al., 2005).

Sin embargo, los efectos de la oxidación pueden ser un poco confusos, ya que en algunos casos puede ser beneficioso cuando la oxidación es moderada, promoviendo la flotabilidad de los sulfuros, como lo es para la flotación de pentlandita (Kelebek, 1993) o perjudicial en otros, como lo es el caso de la calcocita donde se realizaron pruebas bajo condiciones de molienda y flotación normales y se oxidó de manera significativa la superficie de la calcocita, la cual fue atractiva electroestáticamente a la bentonita, resultando en esta última formando un “slime coating” y reprimiendo la flotación de calcocita (Y. Peng & Zhao, 2011).

En el caso de la molibdenita, se descubrió que las propiedades de la superficie de MoS_2 , la cual gobierna la flotación natural, es fuertemente afectada por la oxidación de superficie (Nakhaei & Irannajad, 2014) disminuyendo la flotabilidad (capacidad de un mineral para ser separado mediante flotación) de manera extrema, como lo evidenció la investigación realizada por Yang, y otros (2024) donde incluso al incrementar la dosificación de colector no se logra un aumento significativo en la flotabilidad, como es presentado en la Figura 2.5

a)



b)

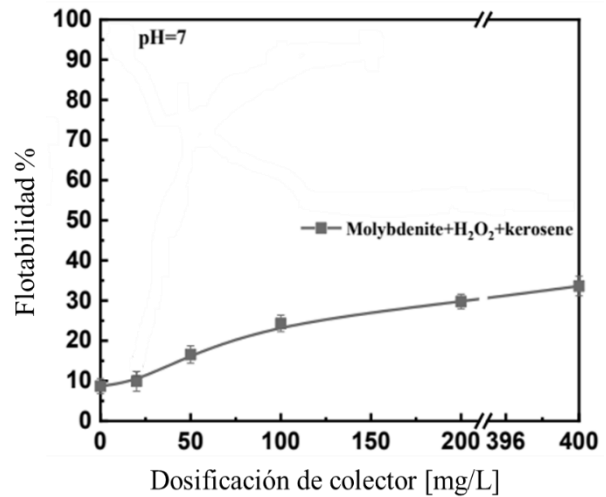


Figura 2. 5: Efecto de la oxidación de superficie en la flotabilidad en presencia de colector (Yang et al., 2024)

Es claro como al oxidar la superficie de la molibdenita, el porcentaje flotabilidad en el caso de la adición de keroseno baja de un máximo de aproximadamente 86% a un 35% en el mismo pH. Al aumentar la dosificación de keroseno solo se alcanza un 35% con una concentración alta de 400 [mg/L], por lo que si se quiere aumentar aún más se debería estudiar el comportamiento de la flotabilidad a dosificaciones mucho más alta, pudiendo aumentar el costo del proceso.

Dentro de la misma investigación realizada por Yang, y otros (2024) se analizó el efecto de la oxidación en el ángulo de contacto de la molibdenita, donde como resultado se evidenció que el ángulo de contacto de los bordes y caras de la partícula disminuyen de manera considerable, resultando en ángulos de contacto de 38,5° y 20° para caras y bordes respectivamente como es mostrado en la Figura 2.6., lo que se traduce en una disminución de la hidrofobicidad de la partícula.

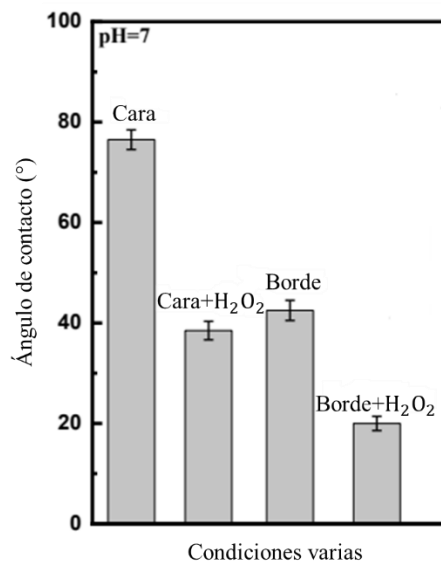


Figura 2. 6: Efecto de la oxidación en ángulo de contacto (Yang et al., 2024)

En resumen, la oxidación de superficie cumple un gran rol en la capacidad de flotabilidad y ángulo de contacto de la partícula, el cual afecta directamente a la hidrofobicidad del mineral y, por consiguiente, la recuperación alcanzada.

2.4. Potencial redox

Al hablar de potencial redox, se refiere a la capacidad de una especie química para ganar o perder electrones en una reacción de oxidación-reducción. El control del potencial redox tiene un rol importante durante la flotación de minerales sulfurados como lo es la molibdenita (MoS_2), al influenciar las reacciones en la superficie del mineral y creando las condiciones óptimas para la flotación selectiva de minerales (Bahrami et al., 2022).

A pesar del uso de diferentes reactivos de flotación, según investigaciones, los minerales de sulfuro solo flotarán bajo ciertos valores de potencial redox (Bahrami et al., 2022), en el caso de la molibdenita, su flotación disminuye debido a la oxidación de superficie en presencia de potenciales redox altos (Yi et al., 2021).

2.5. Conclusiones

De lo anterior se desprende que existen diversos factores que pueden afectar la recuperación de molibdeno. Siendo la principal causa la generación de partículas finas para su liberación, la cual influye en la hidrofobicidad de la partícula y sobre todo en la probabilidad de colisión con las burbujas resultando en bajas recuperaciones y en su pérdida irreversible en el sistema de flotación.

Capítulo 3. Alternativas tecnológicas para la recuperación de molibdeno

A continuación, se presentan las diferentes alternativas tecnológicas investigadas centrándose en la capacidad que estas poseen para incrementar la recuperación de partículas, especialmente las finas y ultrafinas. Se analizarán sistemas de flotación, celdas, reactivos como colectores y depresores, además de carriers de flotación. Se presentan los principios de operación, su correspondiente resultado e impacto en el proceso en base a estudios experimentales. Además, comparaciones técnicas, destacando sus ventajas y limitaciones.

3.1. DAF (Disolved Air Flotation)

Esta tecnología, el fluido que contenga el material que se requiere recuperar es llevado a un tanque presurizado, donde el aire es inyectado hasta alcanzar la saturación, esto bajo presiones entre 4 y 6 [atm] (Aguilar, 2014), luego esto es despresurizado hasta alcanzar la presión atmosférica. Dicha liberación de presión causará una sobresaturación inmediata de aire en el fluido, el aire al estar en un exceso de saturación será liberado en forma de microburbujas (20-100 micrones) (Bolaño, 2009). Considerando los bajos diámetros de burbujas generadas, se podrá obtener una razón D_p/D_b óptima para aumentar la probabilidad de colisión en el sistema.

Esta tecnología es implementada mayoritariamente en procesos de tratamiento de agua (Rubio et al., 2002) para la remoción de contaminantes, coloides, partículas finas y ultrafinas, precipitados, iones, microorganismos, proteínas y aceites (Rodrigues & Rubio, 2007). Con lo planteado previamente, surge la idea de su implementación para la recuperación de minerales, principalmente a las partículas finas y ultrafinas.

Un estudio fue conducido para la recuperación de finos de Cu, utilizando las microburbujas como complemento de las burbujas convencionales, obteniendo una mejora en la recuperación cercana a un 2% (Capponi et al., 2003) lo cual no es significativo. A continuación, se presenta gráfico perteneciente a estudio en cuestión.

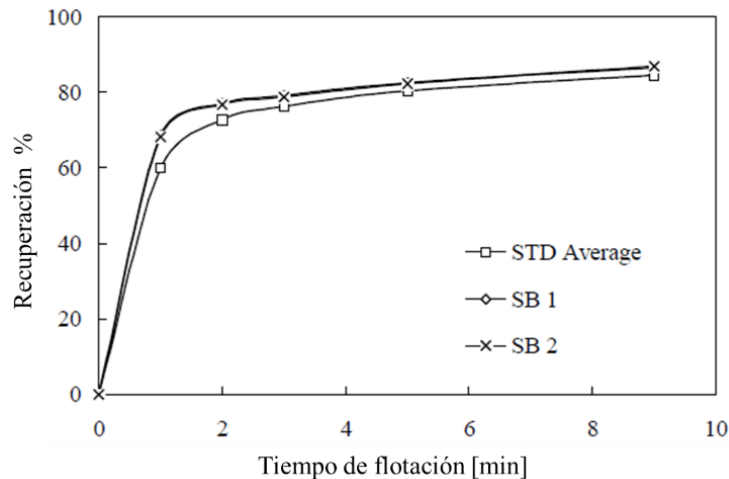


Figura 3. 1: Recuperación para distintos tamaños de burbuja (Capponi et al., 2003)

Aunque la inyección de burbujas de menor diámetro usualmente puede conducir a mejoras en los parámetros de separación, especialmente para las partículas de mineral ultrafinas (<5micrones), su uso implica una alta recuperación de agua, arrastre de ganga y coalescencia de burbujas, lo que afectará directamente a la recuperación (Rodrigues & Rubio, 2007) lo cual puede ser una de las principales causas del aumento insignificante de recuperación en el estudio conducido por Capponi et al. (2003)

En conclusión, esta alternativa a pesar de ser beneficiosa en otros procesos de separación no presenta grandes beneficios en cuanto a la recuperación de minerales.

3.2. Celda Jameson

Uno de los principales factores a considerar en las celdas de flotación, es la habilidad que deben poseer para la formación de pequeñas burbujas que mejoren la cinética de flotación y la capacidad de carga. Con el fin de asegurar que la colisión de partícula-burbuja y una recuperación de espuma que asegure altas recuperaciones

El tipo de celda Jameson, fue inventada a fines de los años 80 con el propósito de superar a las celdas convencionales en cuanto a diseño y operación, logrando las características mencionadas previamente. A partir de su primera instalación a nivel comercial en 1982, se ha trabajado para lograr mejoras que le entreguen robusticidad y facilidad de uso (Lawson, 2016).

Se considera que la celda Jameson es una celda de alto rendimiento, que es eficaz en la recuperación de amplios rangos de tamaño de partícula debido a las burbujas pequeñas y el mezclado intensivo que logra, lo cual es ideal para llevar a cabo la colisión partícula-burbuja. Las características mencionadas se logran al mezclado de la pulpa con aire en un flujo descendente por un tubo vertical, el cual es llamado “downcomer”, la pulpa es introducida a dicho tubo a través de un pequeño orificio el cual tiene la finalidad de producir una alta velocidad de inyección que generará el mezclado y pequeños tamaños de burbuja (Araya & Lawson, 2018). Debido a dichas condiciones, se producirá una espuma densa dentro del tubo vertical donde la colisión entre burbujas y partículas ocurre (Araya & Lawson, 2018) dicha mezcla será descargada por la parte inferior de la columna. Las burbujas se desprenderán y subirán a la parte superior de la columna donde desbordará a la zona de lavado, mientras que las colas son descargadas por la base de la columna (Wills & Napier-Munn, 2005).

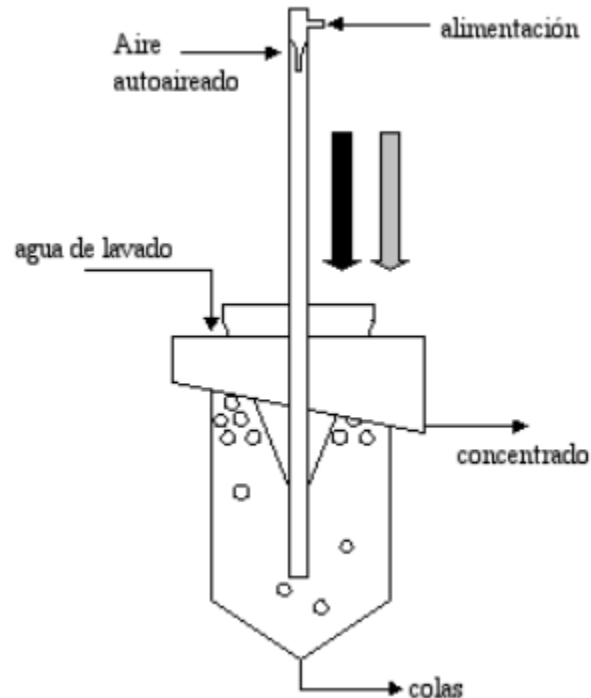


Figura 3. 2:Diagrama celda (Yianatos, 2005)

La celda Jameson cuenta con bastantes atributos, uno de ellos siendo su gran capacidad de carga, reportada mayor a las de celdas columnares y de flotación convencional como lo indica los datos presentados en la Figura 3.3. respecto a la recuperación de cobre (Lawson, 2016), rápida colección de partículas, su auto aspiración elimina la necesidad de sopladores compresores, cuenta con lavado de espuma para reducir el arrastre de mineral no deseado (Araya & Lawson, 2018).

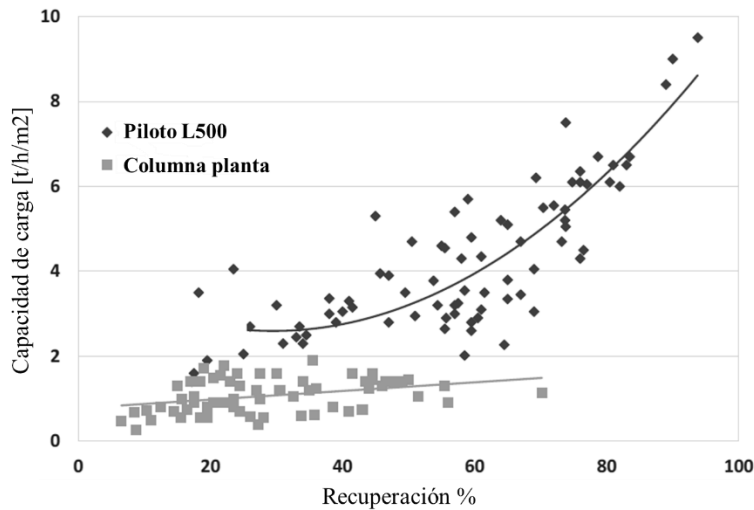


Figura 3. 3: Comparación entre celda piloto y columna planta (Lawson, 2016)

Otros atributos mencionados por (Hall & Harrison, 1995) son los siguientes:

- Equipo de menor tamaño, por consiguiente, la necesidad de menos espacio
- Numero de celdas reducidas por etapa
- Layout de equipo simplificado
- Simple control de proceso y monitoreo de parámetros
- Respuesta efectiva a cambios en la alimentación
- Mano de obra reducida en cuanto a operación
- Operación más comprensible
- Reducción costos de mantenimiento
- Reducción de área necesaria para el proceso de flotación
- Reducción de inventario de repuestos almacenados
- Rápido sistema de estabilización después de puesta en marcha

Pero su principal ventaja corresponde a los pequeños tamaños de burbuja generados dentro de la celda, determinaciones de tamaño de burbuja en celdas operativas, han mostrado que este tipo de tecnología produce un diámetro de burbuja promedio de 300-600 micrones (Hall & Harrison, 1995) (Hall & Harrison, 1995), mientras que el diámetro Sauter (d_{32}) se encuentra en el orden de 360-950 micrones. Los diámetros mencionados son menores a aquellos obtenidos en celdas mecánicas y columnas convencionales, siendo su d_{32} de 2-3 mm. En el proceso, tamaños pequeños de burbuja resulta en una mayor área y mejoras en las cinéticas de flotación (Atkinson, Conway, et al., 1993).

Incluso con aquellos antecedentes, en una investigación realizada por Atkinson, Griffin, et al. (1993) en la planta concentradora Mount Isa Mines, no se lograron incrementos importantes en términos de recuperación, las pruebas de flotación se llevaron a cabo con tamaños d_{80} de 30 micrones, obteniendo los resultados presentados en Figura 3.4. (Atkinson, Griffin, et al., 1993)

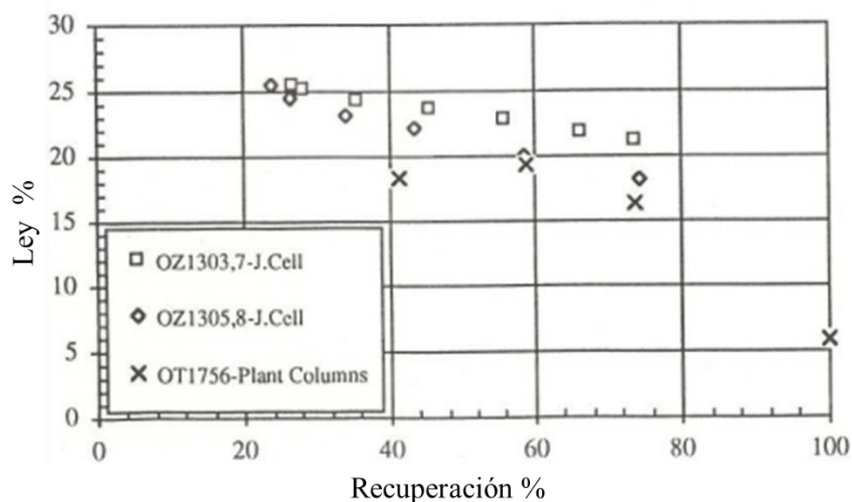


Figura 3. 4:Recuperación respecto a tipo de celda (Atkinson, Griffin, et al., 1993)

En otra investigación más actualizada realizada por Lawson (2016) con la intención de mejorar el rendimiento de los circuitos de Cu-Mo con el uso de la celda Jameson, se realizaron comparaciones de pruebas de laboratorio y celda Jameson piloto L500. Donde los resultados (Figura 3.5.) muestran que la celda piloto presentó un comportamiento bastante similar al obtenido en laboratorio permitiendo presumir que los resultados a dicha escala son suficientes para demostrar la eficiencia de la celda. Además, se mejoró la selectividad obteniendo altas recuperaciones tanto de cobre como de molibdeno.

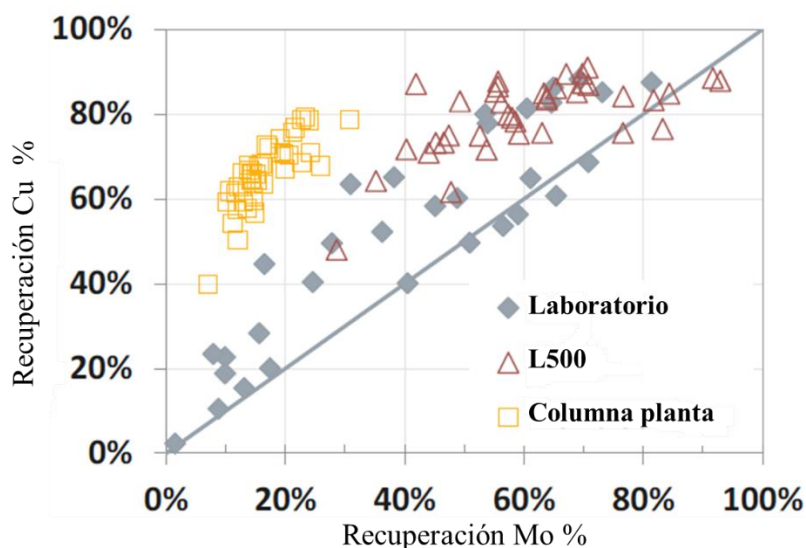


Figura 3. 5:Recuperación según tipo de celda (Lawson, 2016)

Aquellos resultados positivos se pueden ser respaldados por una investigación llevada a cabo por (Morin & Lawson, 2015) en la etapa de flotación colectiva de Cu-Mo de Codelco, División Andina. Dentro del proceso se determinó que las columnas cuentan con una tendencia a “desconcentrar” molibdenita, resultando en recuperaciones <25% tal fenómeno es mitigado en cierto nivel por las altas recuperaciones en la etapa scavenger (>90%), de igual manera se pierde mineral en las colas de la planta. Codelco junto a Glencore Technology decidió analizar si la celda Jameson podría ser una solución para mejorar la recuperación de molibdeno en la etapa de limpieza, pudiendo ser un reemplazo para las celdas columnares.

Los resultados obtenidos a través de las pruebas correspondientes indicaron que la celda Jameson tiene la capacidad de recuperar de manera consistente el molibdeno, teniendo diferencias significativas en las recuperaciones, llegando a un 85% mientras que las recuperaciones de celdas columnares solo logran aproximadamente un 15%. Estos resultados impulsaron a División Andina a realizar pruebas en una planta piloto, allí se obtuvieron recuperaciones de molibdeno de un 71,5%, mientras que con celdas columnares se obtenían rangos de recuperación variando en 10-25%.

Con los antecedentes presentados, la celda Jameson es una gran alternativa para aumentar la recuperación de molibdeno debido al tamaño de burbuja e intensidad de mezclado generada.

3.3. Control de arrastre hidráulico mediante espumante

Arrastre mostro ser un mecanismo contribuyente a la recuperación de partículas finas (Trahar, 1981)

El espumante corresponde a un reactivo de flotación, el cual tiene como objetivo modificar las propiedades superficiales de la burbuja, con el fin de otorgar estabilidad de espuma, modificar el tamaño de burbuja y reducir la coalescencia (Yianatos, 2005). Con esto es consideración, existen investigaciones que indican que la curva ley-recuperación, puede ser modificada respecto al tipo de espumante que se utilice, como lo es la investigación de Kracht, et al. (2016) el cual realizó pruebas de flotación batch con dos espumantes diferentes: octanol y polietilenglicol (PEG300). El mineral utilizado corresponde a uno sintético, compuesto de cuarzo y concentrado de cobre con un tamaño de partícula fino ($d_{50}=10,3$ micrones)

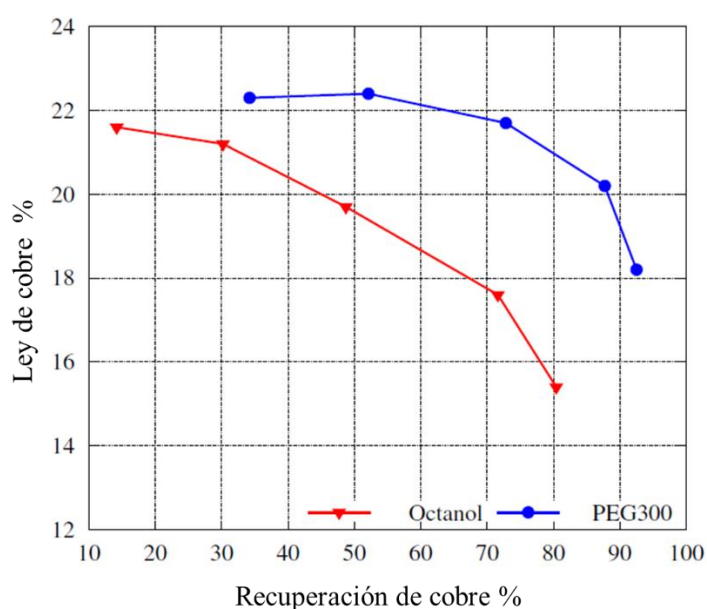


Figura 3. 6:Recuperación respecto a espumante(Kracht et al., 2016)

En la investigación se atribuyen los resultados al efecto que tendría el espumante sobre el arrastre, ya que, al analizar los factores asociados, estos resultaron ser diferentes por lo tanto es posible decir que dicho factor depende del tipo de espumante que sea utilizado. El octanol posee un factor más alto y como lo demuestra la Figura 3.6. tiene una menor selectividad en la flotación, lo que resulta en la recuperación de partículas no deseadas hacia el concentrado, por lo que una adecuada selección de espumante puede aumentar la recuperación de valioso.

Es necesario mencionar que el arrastre ha demostrado ser un mecanismo que contribuye a la recuperación de partículas finas (Trahar, 1981) aun así debido a su naturaleza no selectiva es uno de los principales mecanismos para la recuperación de ganga, por lo que puede tener un resultado perjudicial en el concentrado (Zheng et al., 2005). Teniendo aquello en consideración, al disminuir

el factor de arrastre, aun así, se producirían pérdidas de valioso que son descartadas a través de los relaves debido a la baja recuperación de partículas finas.

A pesar de los resultados, la alternativa presentada no ha sido evaluada en circuitos de flotación, por lo que es necesario una mayor investigación e implementación para tener más conclusiones sobre su eficiencia.

3.4. Depresores

Los depresores poseen características hidrofílicas, estos tienen el rol de destruir y debilitar la interacción entre minerales y colectores, además de ampliar la diferencia de propiedades físicas y químicas entre las superficies minerales (Hao et al., 2023), mejorando la hidrofiliidad del mineral no deseado, promoviendo así su separación.

Como ha sido mencionado previamente, la molibdenita se encuentra principalmente asociada a la calcopirita y es recuperado en una etapa de flotación selectiva. El gran problema que enfrenta la última mencionada, es que ambos minerales flotan de manera similar, por lo que al agregar un depresor en la pulpa tiene la finalidad de inhibir la flotación de cobre con el objetivo de lograr separaciones eficientes (Hao et al., 2023).

Los depresores se pueden clasificar como orgánicos e inorgánicos, ambos tipos pueden ser aplicados para aumentar la recuperación de molibdeno (Yi et al., 2021). Los de tipo inorgánico han sido ampliamente usados en la inhibición de calcopirita, siendo cuatro los más comunes en la separación de Cu-Mo, aquellos son sulfuro de sodio (Na_2S), sulfhidrato de sodio (NaHS), cianuro de sodio (NaCN) y ditiosofato de sodio ($\text{Na}_3\text{PS}_2\text{O}_2$) o más conocido como reactivo de Nokes. Sin embargo, este tipo de depresores cuenta con desventajas, una de ellas es que usualmente son requeridas altas cantidades de dosificación para lograr una separación eficiente, lo que puede traducirse en altos costos (Y. Lin et al., 2023). Además, debido a la naturaleza de este tipo de depresores tienen factores que no son favorables, como toxicidad a la salud y medio ambiente, además de ser corrosivos lo que puede dañar máquinas de flotación y cañerías (C. Wang et al., 2021).

Teniendo en consideración las desventajas de los depresores inorgánicos, en los ámbitos económicos, ambientales y de seguridad, los depresores orgánicos han sido ampliamente investigados y desarrollados.

Uno de los depresores orgánicos corresponde a el 3-Rd (rhodadine-3-acetic acid), el cual fue utilizado en una prueba de flotación conjunta de minerales (C. Wang et al., 2021), demostrando su eficiencia al obtener recuperaciones de molibdeno cercanas al 80% mientras que la recuperación de calcopirita se mantuvo entre un 15-40% alcanzado su mínimo en una concentración de 6×10^{-5} [mol/L] (Figura 3.7.)

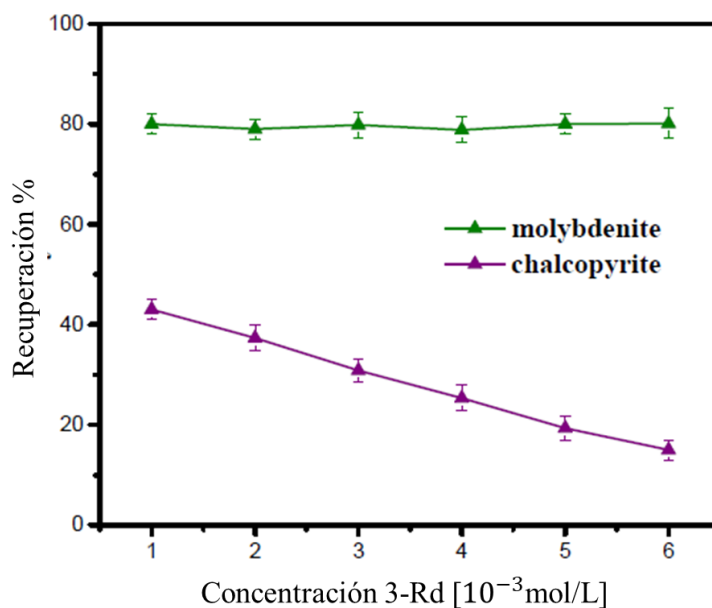


Figura 3. 7: Recuperación de molibdenita y calcopirita en función de concentración de depresor 3-Rd (C. Wang et al., 2021)

Otro depresor que demostró ser eficiente para la recuperación de molibdenita es el GX2 como lo demostró la investigación realizada por Y. Lin et al. (2023), este depresor está compuesto principalmente por tritio carbonato. Este depresor fue sintetizado y utilizado en pruebas de flotación, donde se analizó el efecto de la concentración de GX2 en la recuperación de mineral (Figura 3.8.) resultando en recuperaciones de molibdenita sobre el 85% y en la disminución significativa de la recuperación de calcopirita a medida que aumenta la concentración de GX2, logrando recuperaciones tan bajas como lo es un 5,2%

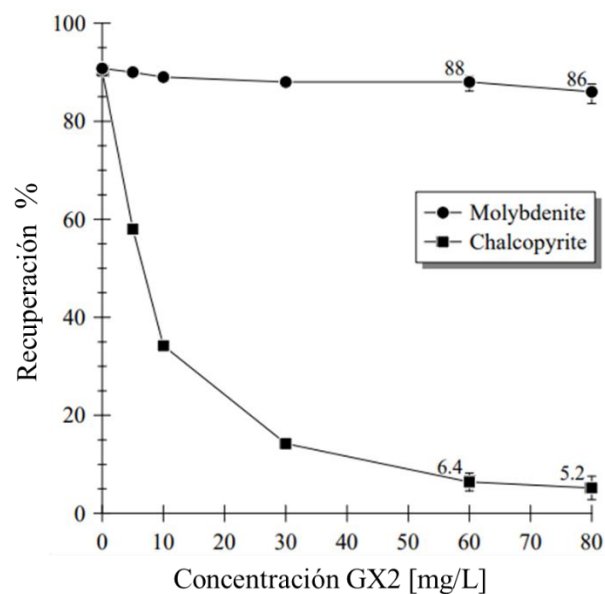


Figura 3. 8: Recuperación de molibdenita y calcopirita en función de concentración de depresor GX2 (Y. Lin et al., 2023)

Adicionalmente, dentro de la misma investigación se comparó la selectividad con la de Na_2S , mientras que una dosificación de 30 mg/L de GX2 logró recuperaciones de 15 y 85% de calcopirita y molibdenita respectivamente, al usar sulfuro de sodio solo se lograron recuperaciones de 60 y 90%. Determinando que se requiere una dosis diez veces más grande de sulfuro de sodio para disminuir la recuperación de calcopirita a valores similares a los obtenidos con GX2 (Figura 3.9).

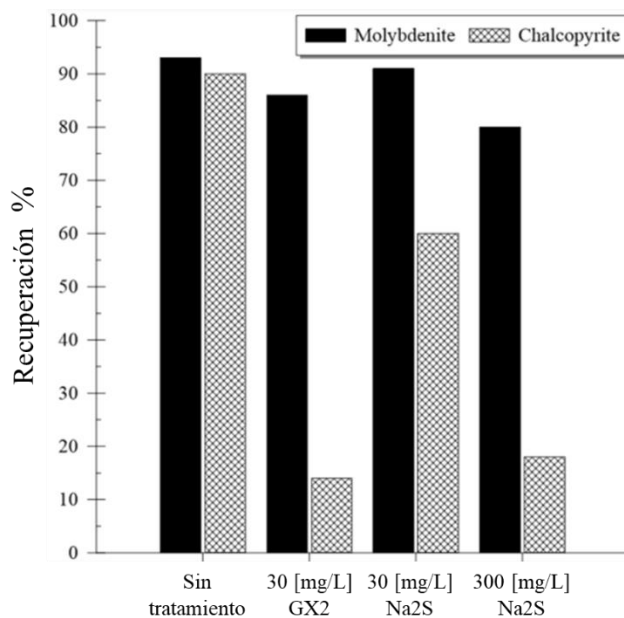


Figura 3. 9: Comparación depresor GX2 y Na_2S (Y. Lin et al., 2023)

Es necesario mencionar que oxidantes como el plasma, ozono, peróxido de hidrógeno, hipoclorito y dióxido de manganeso, son utilizados para inhibir selectivamente la flotación de calcopirita, pero la separación de usar dichos oxidantes no logra ser satisfactoria (C. Wang et al., 2021).

Como fue indicado por los estudios, los depresores orgánicos logran tener un excelente rendimiento en la separación de minerales de sulfuros de Cu-Mo, sin embargo, estos solos han sido aplicados en pruebas de laboratorio y no en escala industrial, por lo tanto, se desconoce su comportamiento en dicho ámbito.

3.5. Colectores (aglomerantes)

Debido a que la mayoría de los minerales no son hidrofóbicos naturalmente, es necesario agregar este tipo de reactivo para mejorar la recuperación de ellos, los colectores son agregados para adherirse selectivamente al mineral, usualmente el valioso, incrementando su hidrofobicidad para lograr su eventual flotación (Fornasiero & Filippov, 2017) (Fornasiero & Filippov, 2017).

Generalmente se hace uso de colectores en aceite, los cuales además de mejorar la hidrofobicidad de las partículas, puede producir aglomeración entre las partículas finas o con las partículas más gruesas, obteniendo como resultado mayores recuperaciones (Capponi et al., 2003). Aceites como el keroseno y diesel son ampliamente usados como colectores para lograr aumentos en la recuperación de molibdenita, formando aglomerado y un film en la burbuja. Además, los mencionados pueden prevenir la precipitación de hidróxidos como Ca o Mg los cuales pueden llevar a la reducción de selectividad, flotación y recuperación de molibdeno (Yi et al., 2021).

Muchas veces los colectores convencionales no son suficientes para lograr recuperaciones satisfactorias de mineral, por lo que pueden ser implementados otros colectores como auxiliares, uno de ellos siendo el óxido de polietileno, por sus siglas en inglés se referirá de ahora en adelante como PEO, el cual puede ser efectivo para mejorar la flotación de finos de molibdeno (Yi et al., 2021).

El colector previamente mencionado, fue investigado por Li et al. (2020) analizando el efecto que tendrá en la recuperación de finos (<20 micrones) de molibdeno el uso de 3 [mg/L] de PEO en conjunto con una dosificación constante de 300 [mg/L] de keroseno. Obteniendo resultados favorables (Fig. 3.10) ya que al utilizar PEO se aumentó la recuperación en un 15% logrando recuperaciones de un 80% mientras que al utilizar solo keroseno se obtiene un 65%, confirmando que este colector promueve la recuperación de partículas finas.

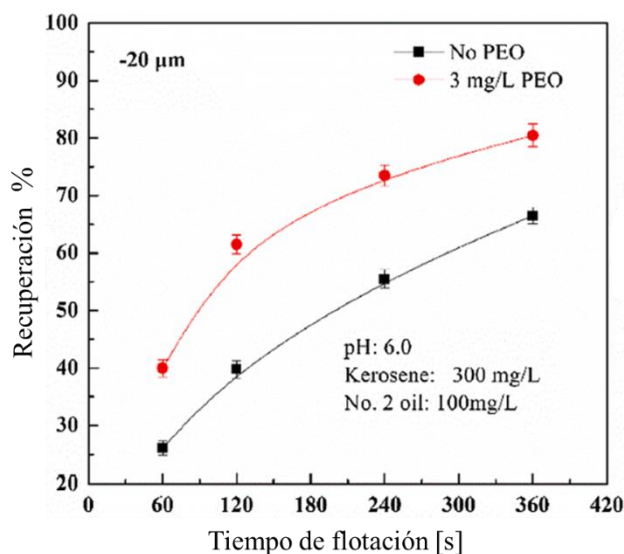


Figura 3. 10: Comparación recuperación al usar PEO como collector (Li et al., 2020)

Dentro de la búsqueda de colectores que mejoren la recuperación de molibdenita Chao et al. (2021) investigó el comportamiento del colector KCTC que es producido a base de alquitrán y keroseno. Este colector al ser comparado con keroseno mostró una mayor afinidad a la partícula además de una mayor cantidad de colector absorbida por la partícula de molibdenita.

La adhesión de la partícula de molibdenita a la burbuja fue medida teniendo en consideración un pretratamiento con y sin colector. Los resultados indicados en la Figura 3.11. corresponden a la adhesión de partículas de molibdenita a la burbuja de aire. Claramente se aparecía un aumento de partículas en la superficie de burbuja con el uso de colectores, siendo las tratadas con KCTC las que lograron una mejor adhesión, logrando aumentos significativos para las partículas con tamaños $-38 + 20$ micrones (Chao et al., 2021).

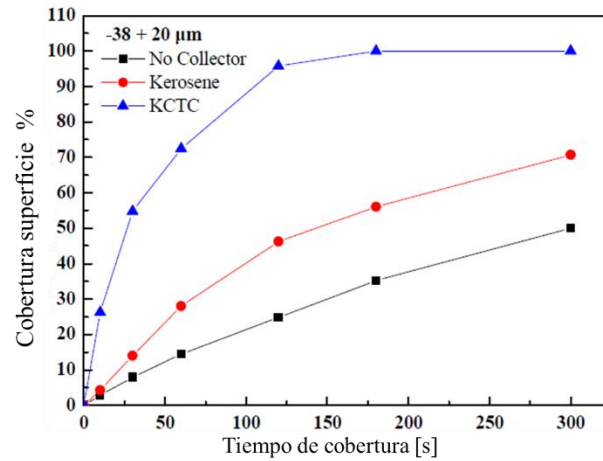


Figura 3. 11: Comparación cobertura de burbuja según colector utilizado (Chao et al., 2021)

Además, los resultados de prueba de flotación (Figura 3.12) mostraron significativas mejoras en la recuperación de diferentes tamaños de partícula al aumentar la concentración de KCTC, especialmente en partículas finas <20 micrones, logrando así recuperaciones sobre el 80% con el uso del mencionado colector.

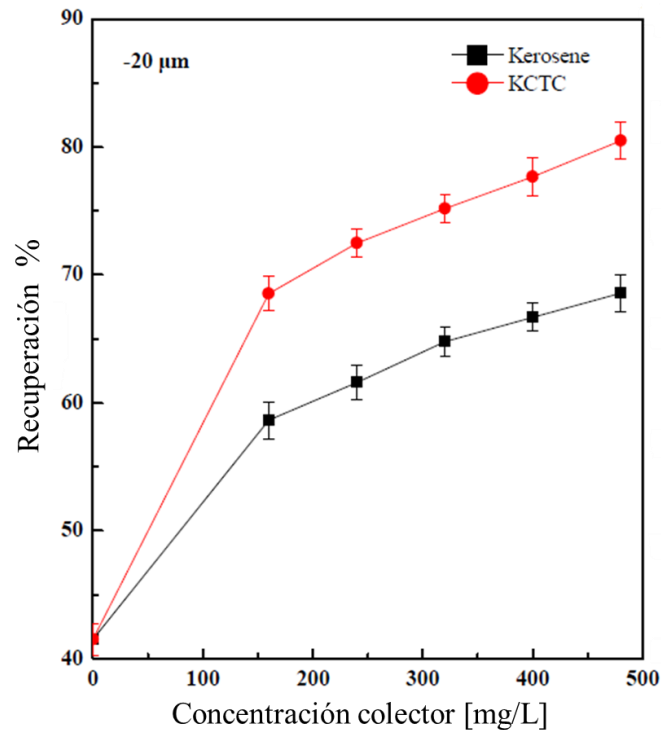


Figura 3. 12: Recuperación de finos según colector utilizado (Chao et al., 2021)

Por lo tanto, existen variadas alternativas de colectores para aumentar la recuperación de molibdenita, especialmente las partículas finas, por lo que su uso supone una gran alternativa.

3.6. Uso de microesferas de vidrio huecas funcionalizadas

En esta tecnología, las microesferas de vidrio huecas hidrofobizadas (MVHH) actúan como medio de transporte para las partículas que requieren ser recuperadas, estas microesferas están compuestas por sílice, por lo que su hidrofobicidad puede ser modificada mediante reacciones químicas. La principal reacción química (Ec. 3) que se lleva a cabo es una esterificación con alcohol, ya sea primario o secundario (Figura 3.13.)

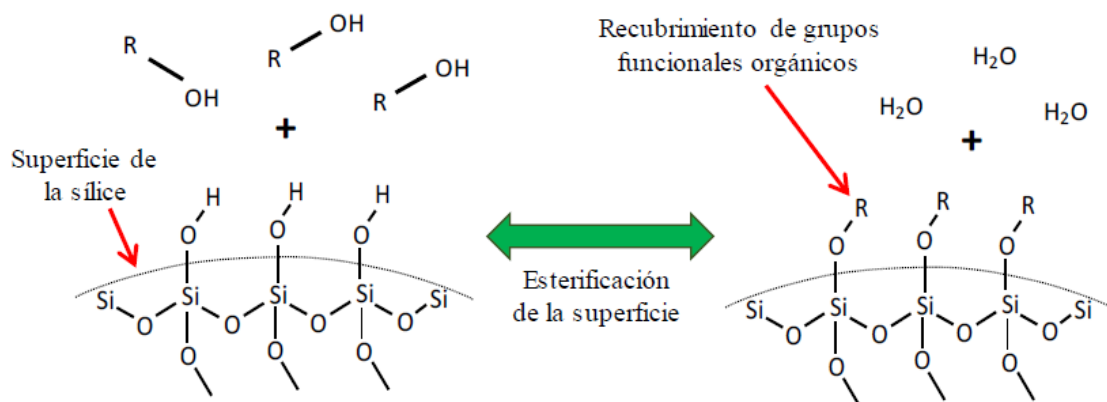
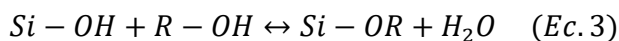


Figura 3. 13:Esquema de reacción de esterificación de sílice(Arriagada, 2018)

El objetivo de estas las MVHH es coleccionar las partículas de mineral para así formar un agregado de mayor tamaño (Figura 3.14.) con el fin de aumentar la probabilidad de colisión partícula-burbuja como puede ser comprobado en la Figura 3.15.

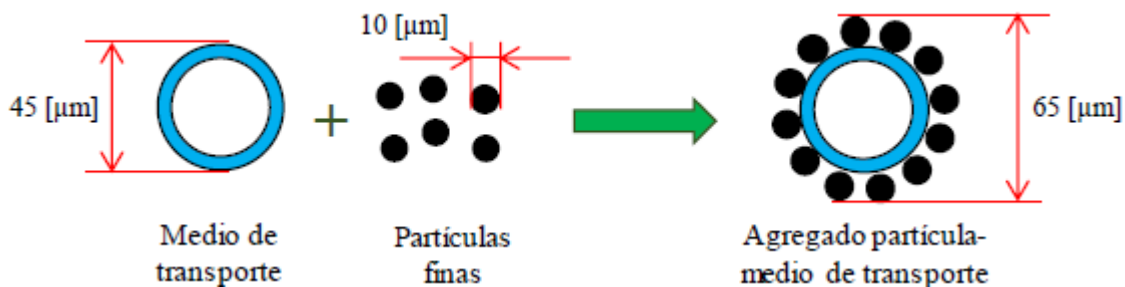


Figura 3. 14: Esquema de recubrimiento de MVHH con partículas finas (Arriagada, 2018)

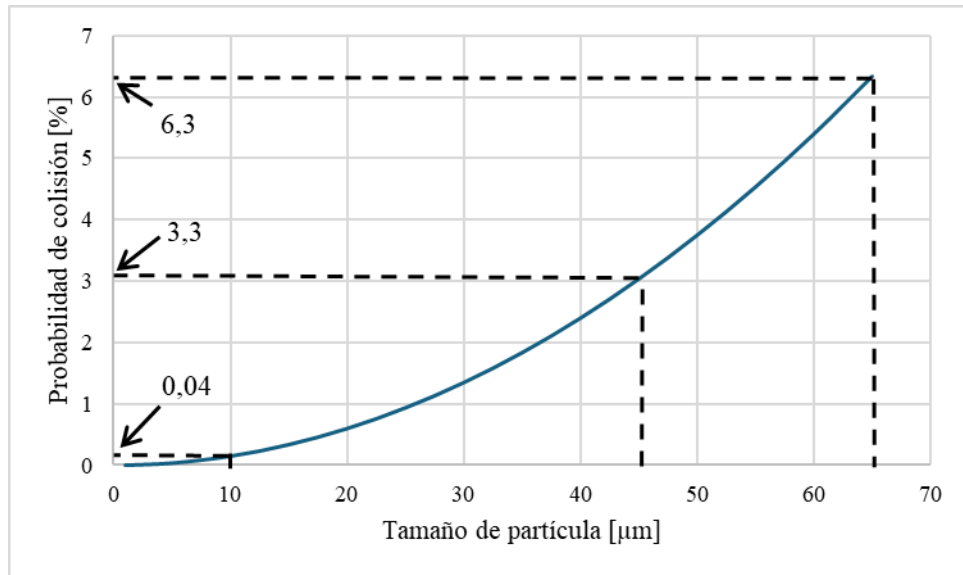


Figura 3. 15:Gráfica comparativa de probabilidad de colisión partícula-burbuja según tamaño

Como se presenta en Figura 3.15, para burbujas de 1,5 [mm] las partículas de 10 [micrones] tienen solo un 0,04% de probabilidad de colisionar con las burbujas, mientras que una partícula que alcanza los 65 [micrones] tiene un 6,3% de probabilidad.

Con aquellos antecedentes, en la investigación realizada por Arriagada (2018) se evaluó experimentalmente utilizando las MVHH en la flotación de un mineral, utilizando un P80 de mineral de 12 [μm] mientras que las microesferas cuentan con un P80 de 70 [μm], obteniendo resultados con mejoras considerables (Figura 3.16.)

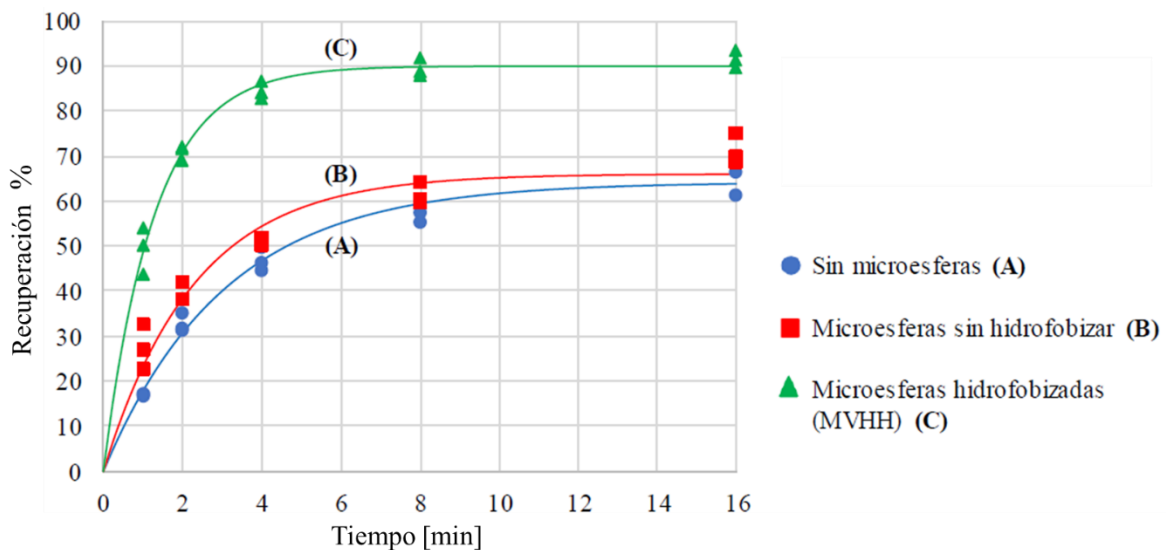


Figura 3. 16:Recuperación de Cu con y sin asistencia de MVHH (Arriagada, 2018)

Debido a los resultados positivos del uso de la tecnología, Chen et al. (2021) condujo una investigación implementando las microesferas de vidrio funcionalizadas en la recuperación de finos de ilmenita y titanaugita. Los resultados (Figura 3.17.) indican que la recuperación de ambos minerales al solo utilizar NaOL (4.0×10^{-4} mol/L) es bastante baja, al implementar microesferas de vidrio ordinarias no se obtienen aumentos significativos, por lo que no incrementan la eficiencia de flotación. Los resultados favorables se lograron al implementar las MVHH, alcanzando un máximo de recuperación de ilmenita de aproximadamente 80% a un pH 6 mientras que en condiciones normales solo se alcanza un 40% (Chen et al., 2021)

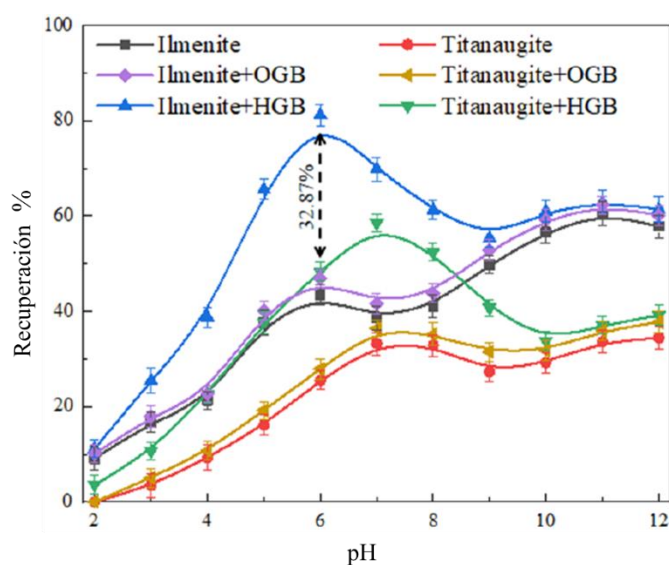


Figura 3. 17: Comportamiento de recuperación de ilmenita e titanaugita con y sin uso de MVHH (Chen et al., 2021)

Otra investigación llevada a cabo por Garfe (2023) respaldó la eficiencia de recuperación de las microesferas de vidrio funcionalizadas en un proceso de flotación, en dicha investigación se centró la atención en la recuperación de cobre, obteniendo que con el uso de MVHH se logró aumentar la recuperación máxima de un 73,2% a un 78,6% como lo muestra la Figura 3.18.

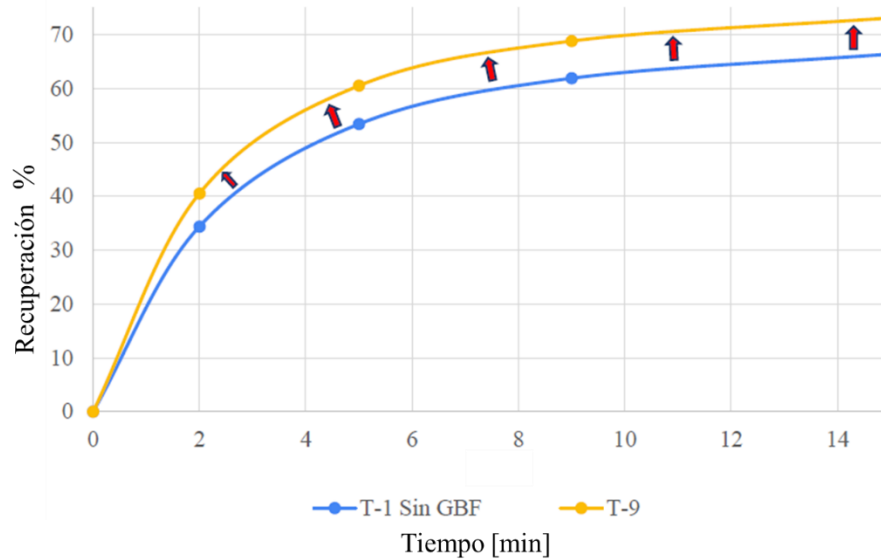


Figura 3. 18: Comparación de recuperación de Cu con y sin uso de MVHH (Garfe, 2023)

Además, se demostró su eficiencia en la recuperación de finos, disminuyendo la fracción de finos de cobre presentes en el relave en un 15% además, generando una disminución en la ley de cobre del relave desde un 0,092% hasta un 0,038%.

3.7. Conclusiones

A partir de los antecedentes presentados se pueden desprender las siguientes conclusiones:

1. A pesar de la variedad de alternativas, algunas no presentan datos directamente relacionados con molibdeno por lo que no es posible tener certeza sobre su efectividad sobre el mineral.
2. El uso de colectores y depresores presentan resultados favorables pero debido a la dosificación necesaria puede aumentar de manera considerable los costos de operación.
3. Las microesferas de vidrio funcionalizadas pueden ser una gran alternativa para incrementar la recuperación de molibdeno, debido a que al ser implementadas como un medio de transporte que aumenta el tamaño al formar aglomerados aumenta la probabilidad de colisión partícula-burbuja.

En síntesis, las tecnologías revisadas muestran avances significativos en la recuperación de partículas finas y ultrafinas, destacándose el uso de MVHH como una alternativa prometedora, aumentando la colisión partícula-burbuja mejorando así la eficiencia del proceso. No obstante, llevar su

implementación en la industria requiere estudios adicionales que sustenten su viabilidad económica, e impacto en la estabilidad operacional. Esto requiere la realización de pruebas de flotación con las características del sistema utilizando las MVHH, por lo que en el siguiente capítulo se especifica el proceso de hidrofobización de las microesferas para las pruebas posteriores correspondientes.

Capítulo 4. Metodología de funcionalización de microesferas de vidrio

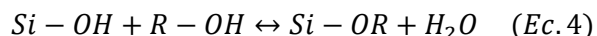
La metodología de funcionalización de las microesferas de vidrio se llevará a cabo de acuerdo a la investigación realizada por Arriagada (2018). Metodología la cual se basa en la capacidad de reacción de los grupos silanol ($\equiv\text{Si-OH}$) que predominan en la superficie de la microesfera, los cuales pueden reaccionar con diversas moléculas orgánicas, siendo una de ellas los alcoholes primarios (Iler, 1979). Dicha reacción le otorgará las propiedades hidrofóbicas necesarias a la superficie de la microesfera de vidrio (Iler, 1952).

La finalidad de que las microesferas de vidrios cuenten con características hidrofóbicas en su superficie reside en que aquellas son capaces de formar agregados de mayor tamaño bajo condiciones fisicoquímicas e hidrodinámicas apropiadas, lo que ayudaría al aumento de flotación de partículas con dichas características. Aquel efecto es producido mediante un mecanismo donde las fuerzas de atracción de Van der Waals entre las cadenas hidrocarbonadas en la superficie de la partícula superan la repulsión electrostática entre ellas (Fuerstenau et al., 1988).

A continuación, se detalla la reacción detrás de la funcionalización.

4.1. Eterificación de superficie

La eterificación de la superficie de la microesfera de vidrio es una reacción química que ocurre entre un grupo silanol y el grupo hidroxilo de un alcohol (G. Ossenkamp et al., 2002). De la reacción se obtiene como resultado un grupo estersilo (Si-OR) y una molécula de agua (Ec. 4)



Ya que el grupo silanol se encuentra en la superficie de la sílice en la microesfera, estos podrán participar en la reacción. Aproximadamente existen 8 grupos silanol por nanómetro cuadrado en la superficie original de la sílice (Antakli & Serpinet, 1987), sin embargo, solo se requieren 3 de ellos para cubrir el área, impidiendo que el resto de los grupos participen por efectos estéricos (Ballard et al., 1961). Adicionalmente, la reacción de eterificación requiere el empleo de alcoholes como reactivos, los cuales pueden ser primarios o secundarios, conteniendo entre 2 a 18 átomos de carbono (Iler, 1979). Como resultado de la funcionalización se obtiene una superficie cubierta por grupos funcionales orgánicos que asumirán una característica hidrofóbica que dependerá del grupo sustituyente (G. C. Ossenkamp et al., 2001). Además, se generarán moléculas de agua como subproducto.

Respecto a la influencia que tiene el largo de la cadena alifática sobre el grado de hidrofobicidad, es posible decir que el largo y estructura de dicha cadena del alcohol utilizado en la funcionalización controlará el grado de hidrofobicidad.

4.2. Materiales, equipos y metodología experimental

Como se mencionó previamente, el método está basado en una reacción química de esterificación con alcoholes. Donde el método consiste en mezclar las microesferas con un alcohol primario y luego aplicar un proceso térmico. Por conveniencia, se implementó una columna a reflujo total para condensar los vapores generados durante el proceso y recircularlos de vuelta a la zona de reacción.

4.2.1. Materiales y equipo

Se hizo uso de microesferas de vidrio huecas 3M tipo K37 (3M), las cuales poseen un P50 y una densidad de 45 [micrones] y 370 [kg/m³] respectivamente. En este caso se analizará la hidrofobización con 1-butanol, donde por cada 50 [g] de microesfera de vidrio se requieren 130 [g] de 1-butanol. También se utilizó etanol y acetona para el lavado del producto final, el cual es almacenado junto con agua destilada.

El sistema implementado para la funcionalización de las microesferas de vidrio se puede ver en la Figura 4.1. El sistema está compuesto por un matraz Erlenmeyer de 500 [mL] dispuesto sobre una plancha calefactora con agitación magnética. Sobre el matraz se debe colocar un tubo condensador en el cual su salida superior es tapada con un tapón de vidrio, además es alimentado por un flujo de agua de enfriamiento a través de una bomba peristáltica.



Figura 4. 1: Configuración sistema de funcionalización

Finalmente, se requiere de un sistema de filtración al vacío compuesto por un matraz Kitasato de 1 [L], un embudo Buchner con su respectivo papel filtro y una bomba de vacío.

4.2.2. Metodología experimental

Inicialmente se agregarán las microesferas de vidrio junto con el alcohol a utilizar en el matraz Erlenmeyer. Luego, se debe disponer el sistema como se especifica en la Figura 4.1.

La mezcla debe ser calentada hasta el punto de ebullición del alcohol que se esté utilizando (1- butanol 117,7 [°C]) a presión atmosférica. Además, la mezcla es agitada magnéticamente para evitar coagulación (Hunter et al., 2009). A la vez, se habilita el flujo de agua de enfriamiento al condensador, lo cual permitirá condensar los vapores generados productos de la ebullición. La mezcla se debe mantener en ebullición durante 7 [h], llevando a cabo el proceso a reflujo total (Arriagada, 2018).

Ya listo el tiempo de reacción, la mezcla que se encuentre en el matraz debe ser filtrada al vacío y lavada dos veces con acetona y una última vez con etanol. Después del filtrado y lavado se obtuvieron microesferas de vidrio funcionalizadas, las cuales son almacenadas en 200 [mL] de agua (Arriagada, 2018).

4.3. Conclusiones

Debido a las propiedades superficiales de las microesferas de vidrio, estas tienen la ventaja de ser modificadas mediante reacciones químicas que es lo necesario para funcionalizar e hidrofobizar la superficie.

La metodología llevada a cabo es sumamente simple, la cual puede ser replicada para cualquier tipo de alcohol primario, por lo que es posible alcanzar diferentes niveles de hidrofobización.

El siguiente paso es validar la efectividad de las MVHH mediante pruebas cinéticas de flotación.

Capítulo 5. Validación de tecnología, uso de MVHH en flotación de molibdeno (TRL5)

Con la finalidad de evaluar el efecto del uso de las MVHH en la recuperación selectiva de partículas finas, se llevaron a cabo pruebas cinéticas estándar de flotación, utilizando agua de proceso y reactivos químicos estándar de una planta de flotación. Para la evaluación del efecto de las MVHH se utilizó un tamaño de partícula con un P_{80} de 25 micrones.

5.1 Metodología de implementación

Como se mencionó previamente, se utilizó agua de proceso facilitada por la planta de flotación para la preparación de la pulpa. Los reactivos que fueron utilizados para llevar a cabo la flotación se mencionan a continuación junto a su respectiva dosis:

- Colector primario: Matcol D-50 (9 g/ton)
- Colector secundario. Xantato (5 g/ton)
- Colector de Molibdeno: Diesel (7 g/ton)
- Espumante: Pinnacle 9891 (12 g/ton)
- Modificador de pH: Cal (dosis necesaria para alcanzar un pH de 9,5)

Adicionalmente, se utilizaron microesferas de vidrio huecas 3MTM tipo K37 que cuentan con un P_{80} de 70 micrones y una densidad de 370 kg/m³ las cuales fueron debidamente funcionalizadas mediante una metodología patentada por Mathiesen.

Las pruebas de flotación fueron llevadas a cabo en una celda estándar de flotación Denver mecánica con un volumen de 5,0 L. Además, para la recolección de concentrados y relaves, se requirieron bandejas de aluminio, una balanza para la medición de masa y una estufa para el secado de las muestras.

Por cada tamaño de partícula se realizaron dos pruebas de flotación sin la adición de MVHH y una prueba de flotación con la adición de ellas, siendo agregadas en una concentración de 1.0 g/kg de mineral. Además, para la flotación con MVHH no se adicionó espumante, debido a que se genera una excesiva estabilidad del colchón de espuma.

Inicialmente la pulpa fue acondicionada por 10 minutos a una velocidad de 900 rpm, luego de esa etapa se dio inicio a la flotación batch. Las pruebas se llevaron a cabo con una velocidad superficial de gas J_g de 0,4 cm/s, una profundidad de espuma de 4 cm y una velocidad de agitación de 1200 rpm. La espuma generada fue barrida cada 10 segundos de manera manual, mientras que los concentrados

fueron recolectados según los siguientes intervalos de tiempo: 0-1, 1-3, 3-6, 6-10, 10-15 y 15-20 minutos. Por otro lado, el relave final también fue recolectado para posterior análisis.

Con el fin de evaluar la diferencia de recuperaciones al usar o no las MVHH los concentrados y relaves fueron pesados, secados y nuevamente pesados para contar con la masa recuperada. Además, se realizó un análisis químico que permite obtener las leyes de cobre, molibdeno y hierro, con el fin de realizar un cálculo de recuperaciones, donde se obtuvieron los datos disponibles en Anexo A.1

5.2. Reconciliación de datos

Los datos obtenidos deben ser sometidos a un ajuste a través de un método de reconciliación de balance por nodo, debido a que deben ser considerados los errores intrínsecos a los métodos de muestreo y análisis (Yianatos, 2005). Para llevar a cabo la reconciliación se hizo uso del método Smith & Ichiyen, en este caso se consideraron los tres elementos muestreados (Cu, Mo y Fe) con sus respectivas concentraciones para realizar el ajuste de balance de masa. La comparación de los datos medidos y ajustados podrán ser encontrados en el Anexo A.2

5.3. Análisis de resultados

Teniendo los datos reconciliados del balance de materia y de las recuperaciones en el tiempo, será posible realizar el análisis de los resultados obtenidos.

5.3.1. Cinética de flotación

En esta sección se reportan los resultados de la cinética de flotación batch asociada al tamaño de partícula evaluado. Los datos de masas y leyes ya sea de alimentación, concentrado y relaves (Anexo A.1, Anexo A.2) fueron utilizados para la obtención de curva.

Para la obtención de parámetros tales como la constante cinética de flotación (k) y la recuperación máxima (R_{max}) se ajustaron dos modelos los cuales corresponden a García-Zuñiga (Ec.5) y a Klimpel (Ec. 6) con el fin de analizar cual se ajusta mejor a los datos obtenidos.

$$R = R_{max}(1 - \exp(-k \cdot t)) \quad (Ec. 5)$$

$$R = R_{max} \left(1 - \frac{1 - \exp(-k \cdot t)}{k \cdot t} \right) \quad (Ec. 6)$$

El valor de la constante cinética de flotación (k) indicará la velocidad a la cual las partículas de un mineral son recuperadas. En realidad, el valor de k no es constante ya que dependerá de varios factores, como lo es la naturaleza y acondicionamiento del mineral, reactivos de flotación,

condiciones de operación, etc. Mientras $R_{\max}$ es la recuperación máxima alcanzable en un proceso real (Yianatos, 2005).

Se presentan en la Figura 5.3. y 5.3. los resultados correspondientes a la curva cinética de flotación de Mo para el P80 de 25 micrones ajustados con modelo García-Zuñiga y Klimpel respectivamente. Al igual que en el caso anterior, los puntos discretos representan los datos obtenidos de manera experimental mientras que la línea continua corresponde al modelo ajustado de recuperación, considerando un promedio de recuperación para la flotación sin microesferas de vidrio.

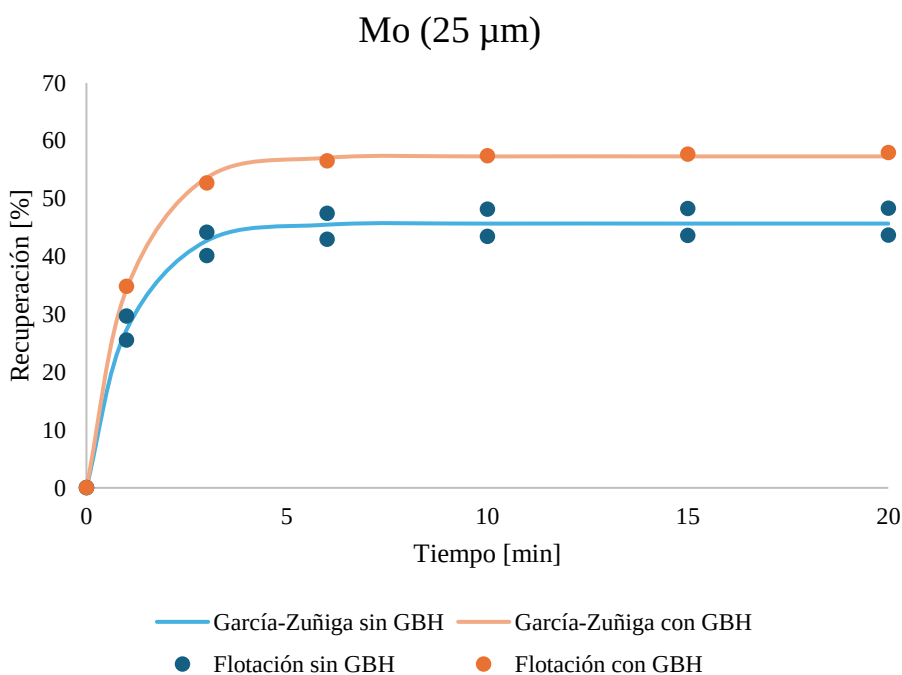


Figura 5. 1: Ajuste de modelo G-Z a recuperación de partículas finas de molibdeno

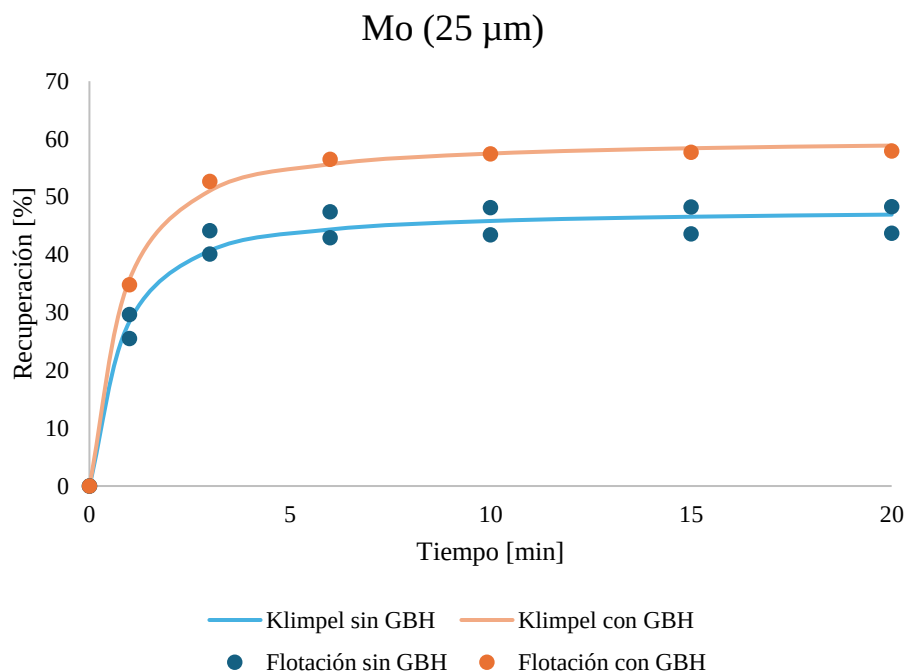


Figura 5. 2: Ajuste de modelo Klimpel a recuperación de partículas finas de molibdeno

Desde los modelos se obtienen los siguientes valores para la constante de velocidad y recuperación máxima asociado a cada modelo.

Tabla 5. 1: Parámetros obtenidos mediante modelo G-Z y Klimpel para partículas finas

Modelo García-Zuñiga		
Parámetro	Flotación sin GBH	Flotación con GBH
k [min⁻¹]	0,91	0,91
R_{maz} (%)	45,7 ± 2,3	57,3 ± 0,3
Modelo Klimpel		
Parámetro	Flotación sin GBH	Flotación con GBH
k [min⁻¹]	2,17	2,18
R_{max} (%)	48,0 ± 2,3	60,3 ± 2,4

En cuanto a los modelos utilizados, en ambos casos se obtuvo una sumatoria de errores cuadrados (SSE) ≈ 0 lo cual indica que ambos modelos se ajustan correctamente a los datos.

Respecto a los datos experimentales obtenidos, se presenta una diferencia en los resultados obtenidos para ambas réplicas de flotación sin M.V.H.H. siendo esta cercana a un 5%. Esta diferencia entre ellas se presume pueda estar ligada a las diferencias significativas de leyes en la alimentación.

En cuanto al valor de los parámetros, para ambos modelos el valor de la constante de flotación (k) no presentó cambios significativos. Mientras que la recuperación máxima se vio incrementada en aproximadamente 12% al utilizar M.V.H.H.

5.3.2. Curva Ley-Recuperación

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en forma de curvas de ley-recuperación (Figura 5.3). Esta curva es una herramienta útil para poder evaluar el desempeño del proceso de concentración, además permite la comparación de del proceso en diferentes condiciones operativas. Los datos utilizados para su obtención corresponden a los adjuntos en Anexo 2.1 y Anexo 2.2.

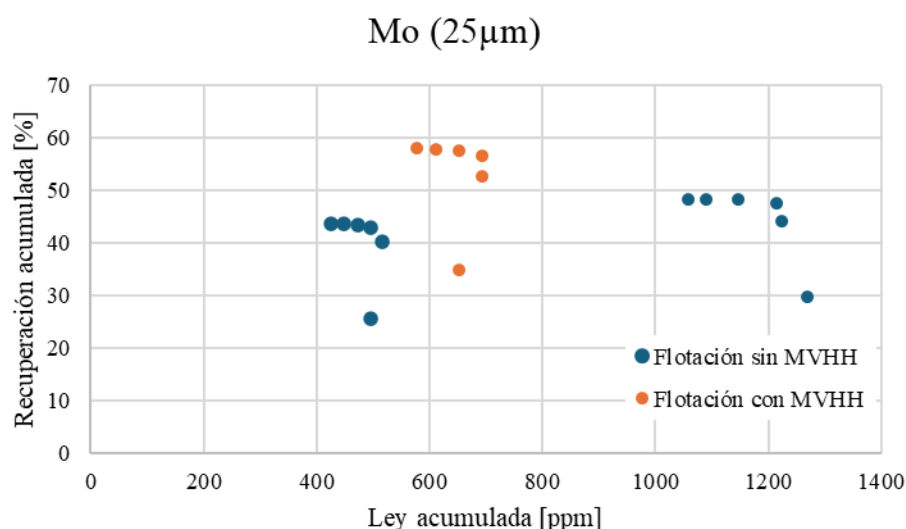


Figura 5. 3: Curva ley-recuperación finos molibdeno

Es claro que la flotación asistida por MVHH provocó un desplazamiento de la curva hacía arriba y hacía la derecha en comparación al resultado obtenido de la flotación sin MVHH, indicando un mejor rendimiento logrando mayores recuperaciones y ley de concentrado, en general la flotación con MVHH indica un mejor desempeño metalúrgico.

Es necesario distinguir que existen dos conjuntos de datos para la flotación sin MVHH, donde se obtuvieron distintos rendimientos metalúrgicos, al igual que en las curvas cinéticas, esta diferencia experimental puede estar asociada a la diferencia de leyes de alimentación para la línea base.

5.4. Conclusiones

1. Ambos modelos se ajustan de manera correcta a los resultados experimentales obtenidos.
2. Para un P80 de 25 micrones, respecto a la línea base (sin MVHH) se obtuvo un incremento de un 12% en la recuperación de molibdeno.
3. Para un P80 de 25 micrones, no se observaron cambios significativos en la constante cinética de flotación.
4. Mediante la curva ley-recuperación, es posible extraer que el uso de MVHH en el proceso de flotación logra un mayor rendimiento metalúrgico, al aumentar la recuperación y ley de concentrado final.
5. La diferencia de resultados entre las réplicas del caso sin MVHH pueden estar influenciadas por la diferencia significativa de leyes en la alimentación.
6. Resultados indican que la adición de MVHH incrementan la recuperación de partículas finas de molibdeno, siendo una gran alternativa para disminuir las pérdidas.
7. Como recomendación, sería apropiado investigar sus efectos en partículas de menor tamaño.

Resumiendo, las pruebas de flotación demostraron que el uso de MVHH provocó un aumento considerable en la recuperación de partículas finas, mejorando también la ley de concentrado final, indicando su eficiencia en su aplicación a finos de molibdeno. El siguiente paso es evaluar en un caso estudio, el punto óptimo de adición de las MVHH con el fin de disminuir los finos de molibdeno perdidos.

.

Capítulo 6. Caso estudio para evaluación de MVHH en planta

6.1. Determinación de punto de adición

Con el propósito de determinar el punto de adición de las MVHH es necesario contar con un sistema de un proceso de flotación selectiva, de manera específica las recuperaciones por cada etapa y la granulometría asociada a ella. Los datos utilizados en el presente capítulo están basados en la investigación realizada por Barrios (2017) en la planta de flotación selectiva de El Teniente.

A continuación, se presenta el diagrama de procesos asociado al caso de estudio Figura 6.1.

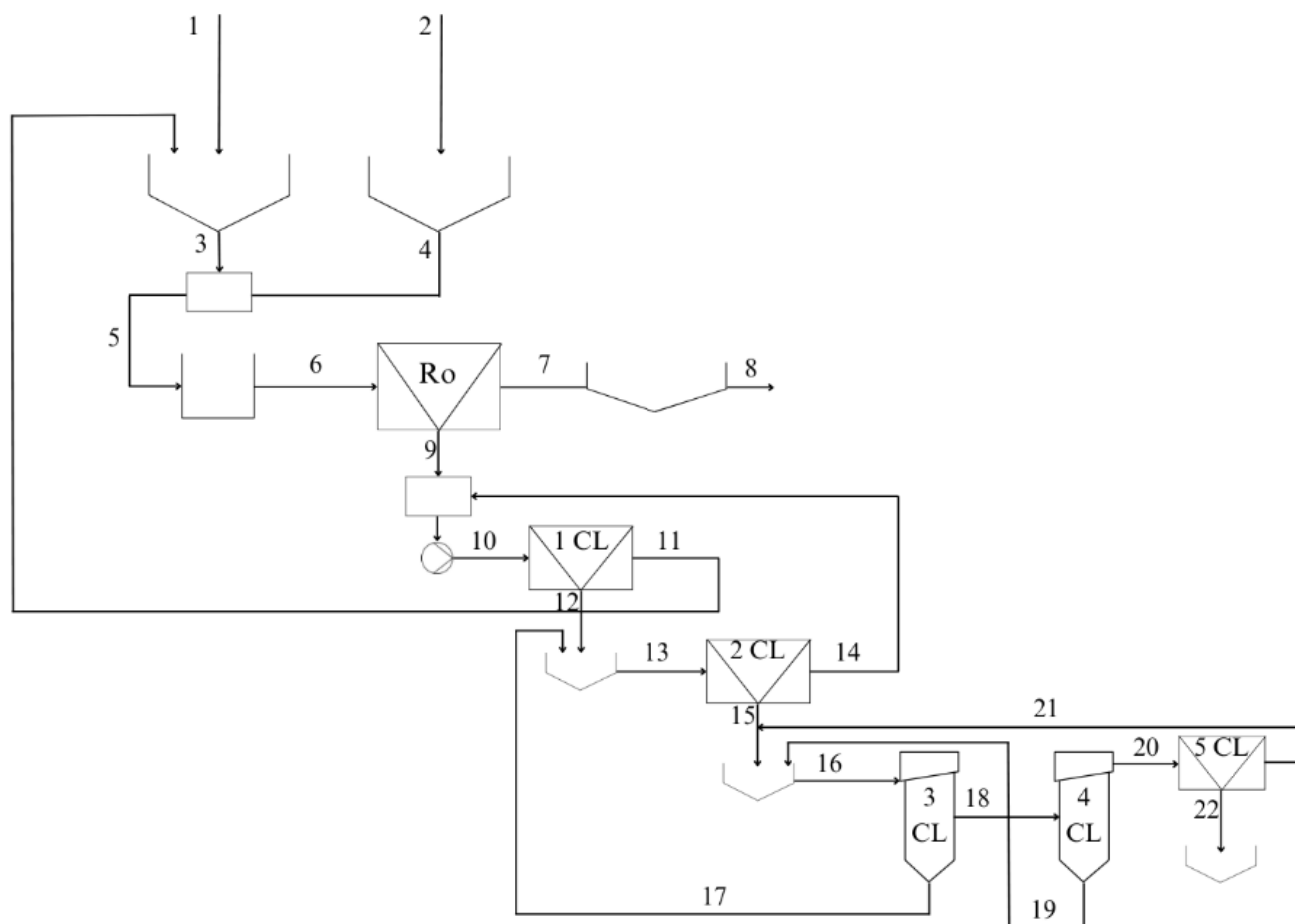


Figura 6. 1:Diagrama de procesos de circuito de flotación

El detalle de cada una de las corrientes podrá ser encontrado en Anexo B. Mientras que las recuperaciones de molibdeno de cada etapa se presentan en la Tabla 6.1.

Tabla 6. 1:Recuperaciones de cada etapa asociada al proceso

Etapa	Recuperación (%)	Simbología
-------	------------------	------------

Rougher	55,79	R_R
1° Limpieza	23,81	R_{C1}
2° Limpieza	27,85	R_{C2}
3° Limpieza	8,84	R_{C3}
4° Limpieza	68,58	R_{C4}
5° Limpieza	78,51	R_{C5}

Además, en la Figura 6.2. se presenta el porcentaje de partículas bajo tamaño ($<20\text{ }\mu\text{m}$) en cada una de las colas de cada etapa, el cual fue fabricado a partir de la aplicación del modelo Rosin-Rammler para distribución de partícula a los datos granulométricos, los valores obtenidos son detallados en Anexo B.2.

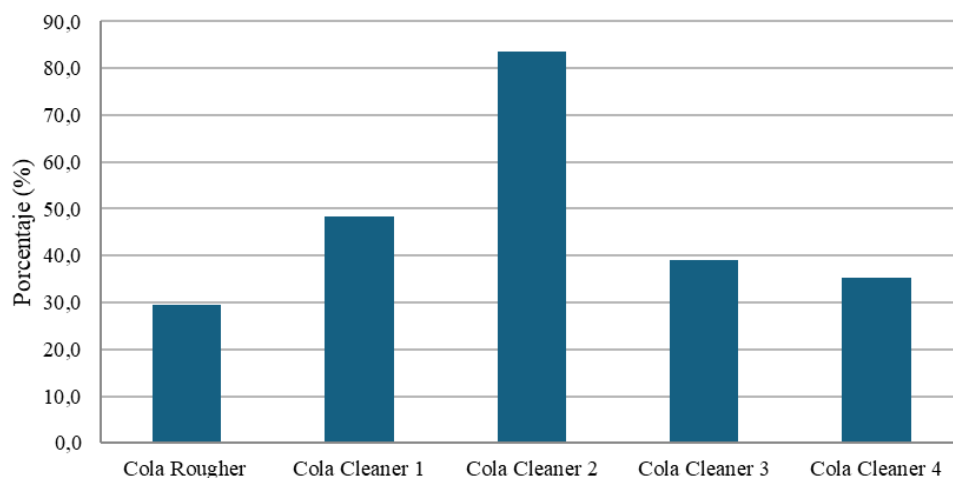


Figura 6. 2: Porcentaje de partículas finas ($<20\text{ }\mu\text{m}$) en colas

Se indican los datos asociados a las colas de cada etapa debido a que estas representan lo que no pudo ser recuperado en su etapa correspondiente. Entre los resultados se destaca el alto porcentaje de partículas finas presentes en la etapa Cleaner 2 con un 83,6% seguida por la cola de Cleaner 1 con un 48,3% mientras que las pertenecientes a las celdas Cleaner 3 y 4 se tienen porcentaje de finos de 39,0 y 35,2% respectivamente. Con este antecedente granulométrico, se evaluará el efecto que tienen las MVHH al ser incluidas dentro del proceso, para implementarlas en un punto donde se optimice el efecto, se realizará un análisis de nodos con el fin de evaluar el cambio en la recuperación global, buscando el máximo valor.

Se considera el diagrama de nodos (Figura 6.3.) obteniendo la expresión indicada en la Ec. 7 para la recuperación global.

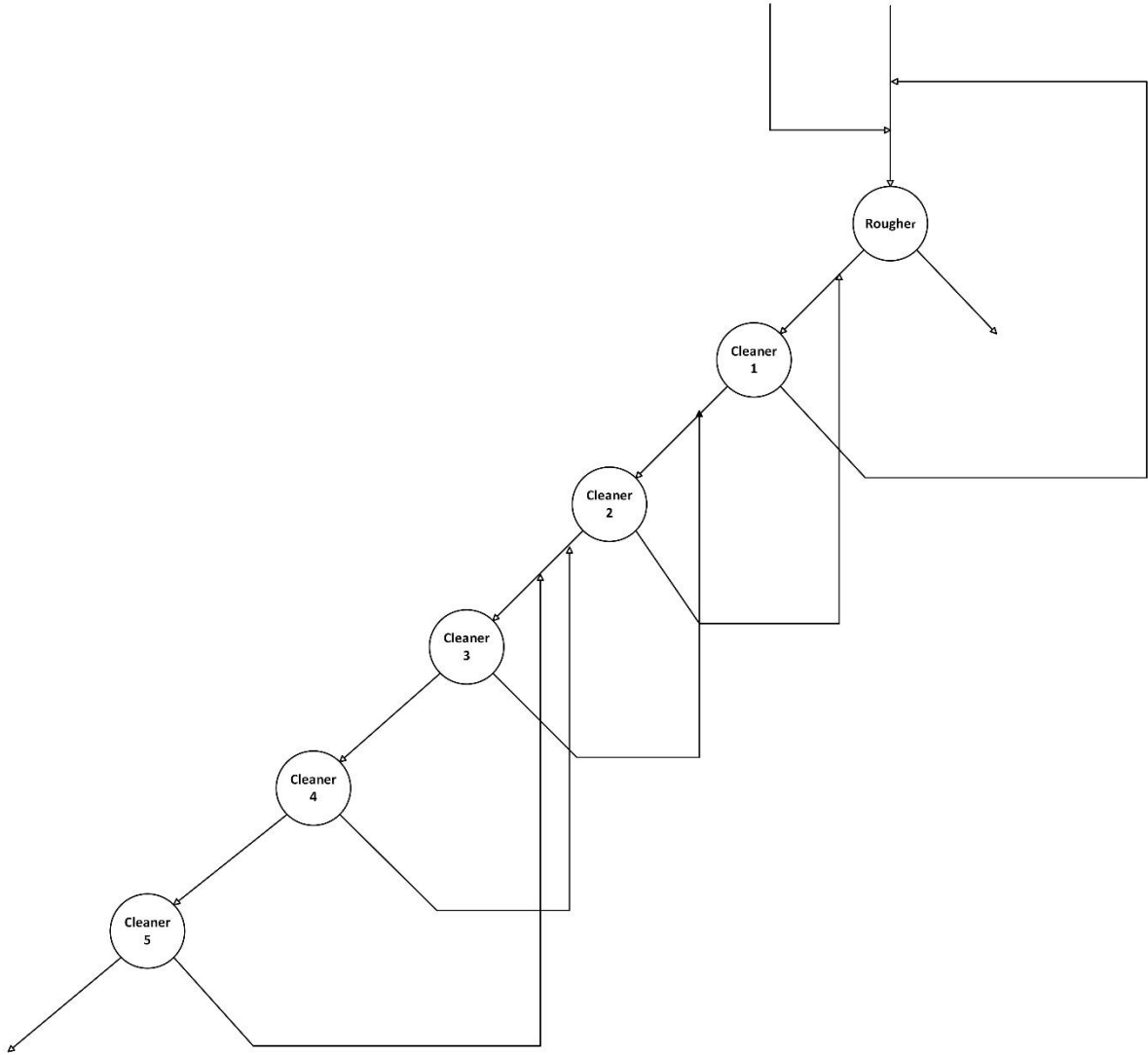


Figura 6. 3:Diagrama de nodos asociado a proceso

$$R_{global}\% = \frac{R_R \cdot R_{C3} \cdot R_{C4}^2}{B} \quad (Ec. 7)$$

Siendo:

$$B = \frac{A - (1 - R_{C3})}{R_{C1}} - A \cdot (1 - R_{C2}) \quad (Ec. 8)$$

$$A = \frac{1 - (R_{C3} - R_{C3} \cdot R_{C4}) - (R_{C3} \cdot R_{C4} - R_{C3} \cdot R_{C4} \cdot R_{C5})}{R_{C2}} \quad (Ec. 9)$$

El diagrama de nodos completo con el detalle de cada corriente podrá ser encontrado en el Anexo B.3.

Para determinar en qué etapa será más eficiente la adición de las MVHH para lograr una mayor recuperación global, se realiza un análisis de sensibilidad. Este análisis tiene el objetivo de identificar que variable, en este caso las recuperaciones de cada etapa, tiene una mayor incidencia en el aumento de la recuperación global.

Para la sensibilización, se considera el cambio de solo una variable mientras que las otras se mantienen constantes, se utilizará como línea base las recuperaciones presentadas en la Tabla 6.1 donde se tiene una recuperación global de un 0,28%.

Mediante los resultados, es posible determinar que la recuperación de la primera celda de limpieza tiene una mayor incidencia en el porcentaje de recuperación global (Figura 6.4.) ya que esta al ser aumentada, logró recuperaciones de hasta un 7%. Los datos podrán ser encontrados en el Anexo B.4.

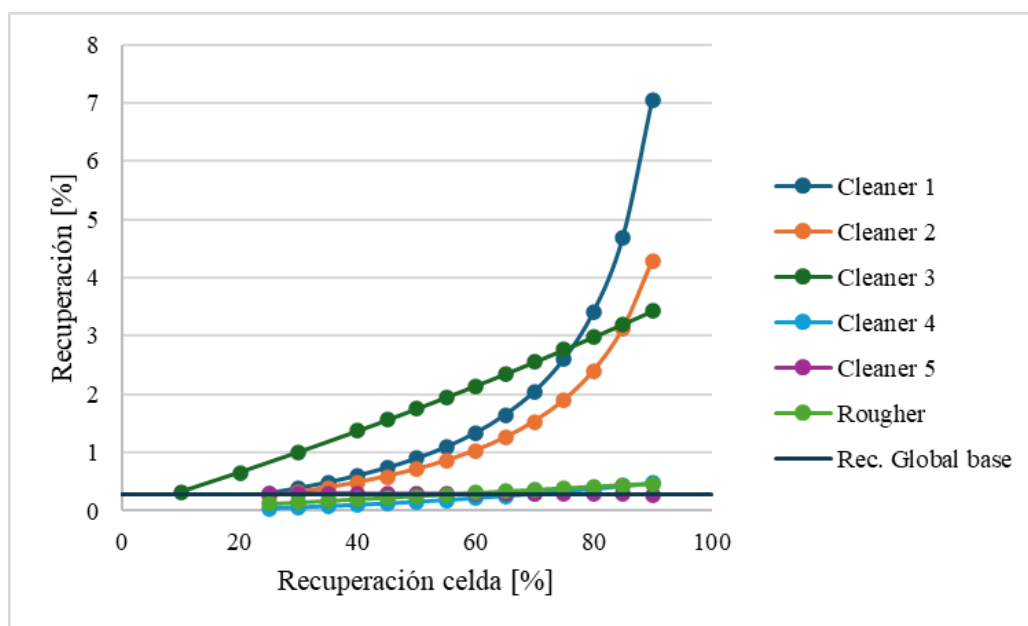


Figura 6. 4: Efecto de sensibilización de etapa cleaner 1 en recuperación global

Por lo tanto, es factible que las MVHH sean adicionadas en la primera etapa de limpieza. Se plantea que la adición de las MVHH sea directamente a la cola de la etapa mencionada previamente, esto para evitar la desviación de MVHH a las etapas siguientes. A continuación, se presenta un estimado de la masa de finos de molibdeno que podría ser recuperado con MVHH en base a las características del flujo másico de la cola Cleaner 1 y considerando una recuperación del 70% de los finos.

Tabla 6. 2: Información corriente cola cleaner 1

Cola Cleaner 1	
Flujo másico	256,1 [tph]
Porcentaje bajo 20 μm	48,3%
Ley Mo	0,52%
Flujo másico finos Mo	0,64 [tph]

Considerando 8200 [h] de producción anuales, se tiene un estimado de aproximadamente 3691 [ton/año] de finos de molibdeno recuperados.

A continuación, se detallará la dosificación de MVVH y los equipos necesarios para la adición del carrier de flotación.

6.3. Dosificación e inyección de MVHH

A través de la metodología detallada en el Anexo C.1 y haciendo uso de la planilla Anexo C.2 es posible determinar una dosificación de MVHH de 201,4 [ppm] por cada tonelada de mineral presente en la cola de la etapa cleaner seleccionada. A partir del flujo másico de la etapa cleaner 1 (Tabla 6.2.) se calcula el requerimiento de 51,6 [kg/ton] que será capas de recuperar 0,6 [tph] de molibdeno, lo cual al considerar 8200 [h/año] de funcionamiento se obtiene una recuperación extra anual de 4920 [ton].

Para la implementación en planta, se considerará la inyección de una pulpa con un flujo de 184,1 [kg/h] la cual contiene un 28% de MVHH en peso y una densidad de 677,1 [kg/m³] por lo cual se tiene un flujo volumétrico de 0,27 [m³/h].

A partir de aquellos resultados, es posible la especificación de los equipos requeridos para la inyección.

Para el almacenamiento de las MVHH se considera un estanque agitado para la homogenización cuyas características se entregan en la Tabla 6.2, el volumen a considerar será el necesario para suplir 336 [h] de funcionamiento.

Tabla 6. 3: Especificaciones técnicas estanque agitado

Especificaciones estanque agitado	
Capacidad	90 [m ³]
Tipo de agitador	Turbina con palas inclinadas

Potencia motor agitador	27 [kW]
Velocidad	130 [rpm]

Para la impulsión de las MVHH al punto de adición, se utilizará una bomba neumática diafragma, donde las especificaciones podrán ser encontradas en la Tabla 6.3

Tabla 6. 4: Especificaciones técnicas bomba diafragma

Especificaciones bomba diafragma	
Marca	Flexbimec
Caudal máximo	55 [L/min]
Altura máxima de succión	5 [m]
Presión de trabajo	2-8 [bar]
Consumo de aire	200 [L/min]
Máximo tamaño de partícula	3 [mm]

Debido a que se trata de una bomba neumática, requiere un suministro de aire por lo que se considera el uso de un compresor cuyas características son detalladas en la Tabla 6.4

Tabla 6. 5: Especificaciones técnicas compresor

Especificaciones Compresor	
Marca	Kerex
Presión de trabajo	8 [bar]
Potencia	15 [kW]
Máximo caudal de aire	210 [L/min]

6.4. Conclusiones

A partir de este capítulo, se desprende que en el caso estudiado la primera etapa de limpieza es la cual tiene una mayor incidencia en la recuperación global, además mediante los datos granulométricos es una etapa con alto porcentaje de partículas finas por lo cual tiene características idóneas para ser sometida al uso de MVHH. Además, se estima que mediante el uso de MVHH se lograría la recuperación de sobre 0,6 [tph] en solo finos de molibdeno.

En cuanto al procedimiento utilizado para determinar el punto óptimo de adición, este puede ser replicado para cualquier sistema de flotación mediante un simple análisis de nodos del sistema, por lo cual es un método útil en caso de una investigación similar.

En cuanto a las recuperaciones que se tienen como base en el caso estudio, para efectos de esta investigación fueron considerados verdaderos, pero se recomienda su revisión ya que se entregan valores que podrían no ser congruentes, debido a la baja recuperación global obtenida.

Para una mejor noción de la factibilidad de la implementación de MVHH se debe realizar un análisis económico, lo cual es abordado en el siguiente capítulo.

Capítulo 7. Determinación de costos y evaluación económica

Para la incorporación de las MVHH es necesario contar con un análisis detallado de los costos de adquisición e implementación de ellas (CAPEX y OPEX), además de los beneficios derivados de su aplicación en el ámbito económico con el fin de contar con una perspectiva integral para la posterior toma de decisiones.

7.1. CAPEX

Como gastos de capital se consideran los gastos e inversiones que se asocian a bienes tangibles los cuales en este caso serán asociados a los equipos necesarios para la inyección de MVHH al sistema.

En el caso de la etapa de homogenización de las MVHH, se considerará que el agitador cueste el 40% del valor del estanque. Y además se considera un costo de mano de obra de un 20% del valor del equipo en total:

Tabla 7. 1: Costos estanque agitado

Equipo	Costo [USD]
Estanque agitado	\$54198
Agitador	\$21679
Mano de obra	\$15175
Total [USD]	\$91052

A continuación, se presenta en la Tabla 7.1 los equipos necesarios para la implementación del proyecto, además para asegurar continuación operacional, se considerará un compresor y una bomba en stand-by

Tabla 7. 2: Costos equipos

Equipo	Cantidad	Precio unitario [USD]	Precio total [USD]
Estanque agitado	1	\$91052	\$91052
Bomba diafragma	2	\$700	\$1400
Compresor	2	\$3700	\$7400
Total [USD]			\$99850

Además, se considera un porcentaje de puesta en marcha de 10%, un porcentaje de la inversión de un 25% en caso de contingencia y un 20% asociado a mano de obra para instalación (Tabla 7.2)

Tabla 7. 3: Detalle de porcentajes de contingencia y puesta en marcha

Detalle	%	[USD]
Inversión equipos		\$99850
Contingencia	25%	\$24963
Puesta en Marcha	10%	\$9985
Mano de obra	20%	\$19970
Total		\$154768

7.2. OPEX

Dentro de estos costos se consideran los de los materiales e insumos que serán requeridos de manera anual. El detalle se presenta en la Tabla 7.3.

Tabla 7. 4: Costos operacionales variables asociados

	Consumo	Unidad	Costo	Costo Total [MMUSD/año]
Insumo MVHH	422030	[kg/año]	176 [USD/kg]	\$74.3
Costo energético	347.164	[kWh/año]	0,127 [USD/kWh]	\$0,04
Total [MMUSD/año]				\$74,34

*La estimación de costo de las MVHH podrá ser encontrada en el Anexo D.1.

Obteniendo un total de costos operacionales de 74,35 [MMUSD/año].

Además, se considerará un estimado de costos de mantención de los equipos como costo fijo (Tabla 7.4)

Tabla 7. 5: Costos de mantención de equipos.

Equipo	Cantidad	Costo total [USD/año]
Estanque agitado	1	\$9.000
Bomba diafragma	2	\$4.000
Compresor	2	\$5.000
Total		\$18.000

7.3. Flujo de caja

En el flujo de caja se analizarán los primeros 12 meses de funcionamiento del proyecto. Además, se consideran los siguientes puntos:

- Financiamiento sin crédito
- 30% de impuesto
- 30% tasa de descuento
- Precio de venta Mo 24 [USD/lb]

Respecto a la depreciación de los equipos, se consideró una depreciación lineal, los detalles pueden ser consultados en Anexo C.1. En cuanto a los resultados del flujo de caja (Anexo C.2.), se evidencia que dentro del primer mes de funcionamiento recupera la inversión con ganancias considerables.

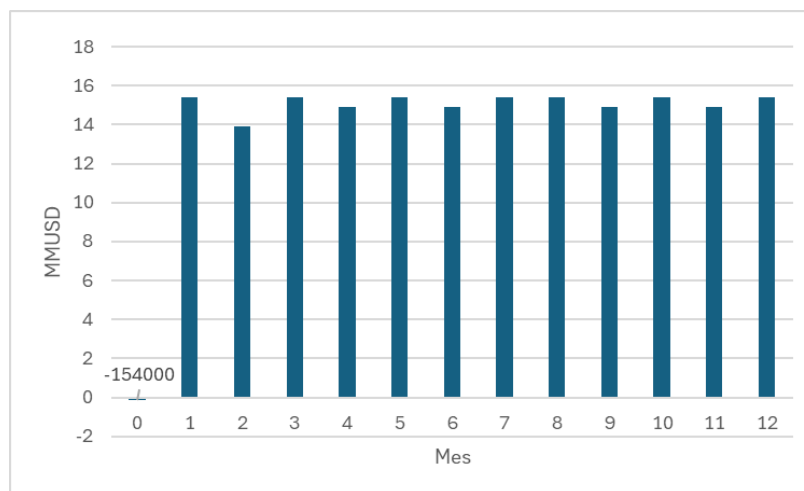


Figura 7. 1: Flujo de caja asociado

7.4. Indicadores económicos

Es necesario la determinación de los indicadores económicos para evaluar la rentabilidad del proyecto, a continuación, se determinará el valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión (Payback).

Los criterios de viabilidad de cada indicador son:

1. VAN

- $VAN > 0$: El proyecto general valor y es viable. Se recupera la inversión inicial y se obtiene un excedente.

- $VAN=0$: El proyecto recupera exactamente la inversión inicial con una rentabilidad igual a la tasa de descuento. Se es indiferente si se acepta o rechaza el proyecto.
- $VAN<0$: El proyecto no genera suficiente valor para recuperar la inversión inicial ni satisfacer la tasa de descuento.

2. TIR

- $TIR > \text{tasa de descuento}$: Proyecto es viable ya que la rentabilidad supera el costo de oportunidad
- $TIR = \text{tasa de descuento}$: Proyecto es indiferente, ya que la rentabilidad es igual al costo de oportunidad.
- $TIR < \text{tasa de descuento}$: Proyecto no es viable, ya que la rentabilidad es menor que el costo de oportunidad.

3. Payback

Este indicador indica el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial mediante los flujos de caja generados. Simplemente si el payback es menor que el horizonte de tiempo del proyecto, será viable.

A partir del flujo de caja se obtienen los siguientes indicadores:

Tabla 7. 6: Indicadores económicos

Indicadores económicos	
VAN [MMUSD]	\$154.942.645
TIR	99%
Payback	1 mes

Los valores obtenidos cumplen con todos los criterios de un proyecto que será viable. El TIR obtenido indica una alta rentabilidad, lo cual coincide con las ganancias generadas en comparación con la inversión inicial. Además, se estima un costo de 7 [USD/lb] producida.

Debido a la alta tasa de retorno, el proyecto se encuentra cubierto dentro del primer mes y con ganancias considerables.

7.5. Análisis de sensibilidad

Se realiza un análisis de sensibilidad del TIR y VAN con los costos de MVHH ya que estos representan el mayor gasto operativo dentro del proceso y también con el costo por libra de molibdeno, ya que como indica la Figura 7.2 este presenta variaciones significativas a lo largo de los años.

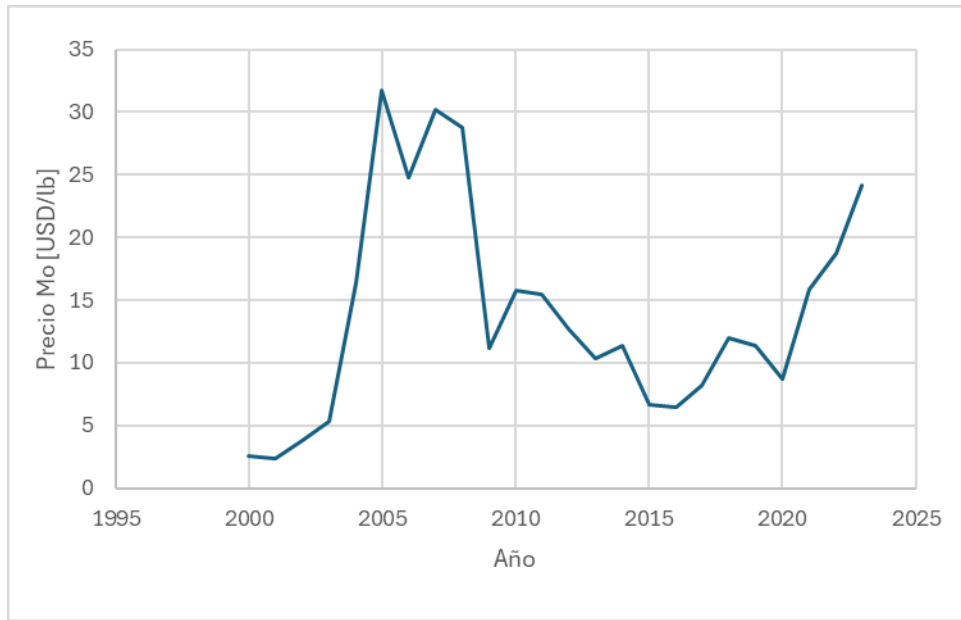


Figura 7. 2: Precio molibdeno a lo largo de los años

7.5.1. Costo de MVHH

En el caso de la variación de costo de las MVHH, los resultados son indicados en la Figura 7.3 el cual indica que las MVHH no pueden superar los 595,3 [USD/kg] ya que sobre dicho valor el proyecto no presente rentabilidad.

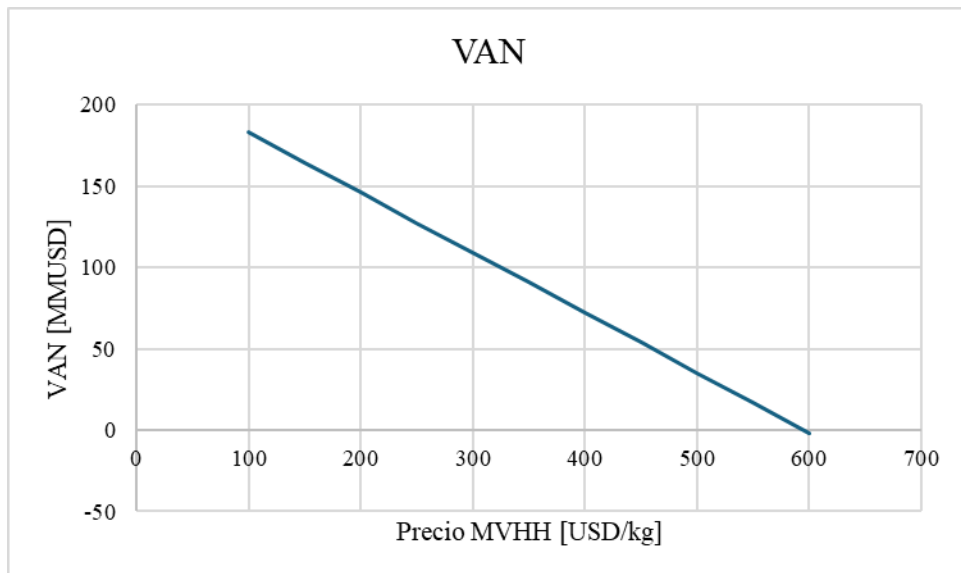


Figura 7. 3: Sensibilización VAN costo MVHH

En cuanto al TIR (Figura 7.4) para un costo de MVHH sobre los 468 [USD/lb] el proyecto deja de ser rentable ya que presta un costo menor a la oportunidad.

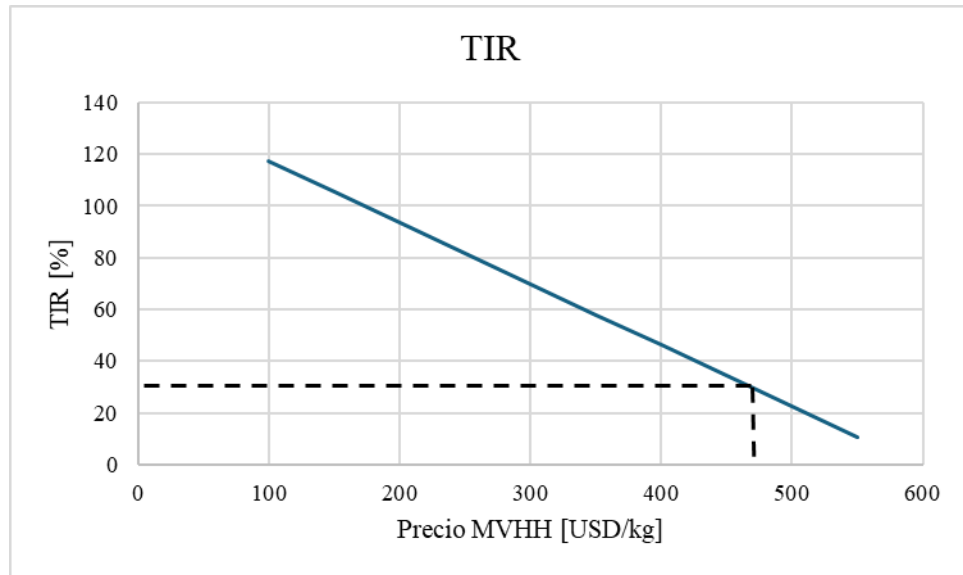


Figura 7. 4: Sensibilización TIR costo MVHH

También fue calculada la elasticidad respecto al efecto del costo de la MVHH en el VAN, donde se obtuvo una elasticidad $E=0,4$ por lo tanto la rentabilidad del proyecto es menos sensible a los cambios que pueda tener los costos de las MVHH.

7.5.2. Precio Mo [USD/lb]

En el caso de VAN, se produce un quiebre para valores bajo los 7,05 [USD/lb] ya que el proyecto deja de ser rentable.

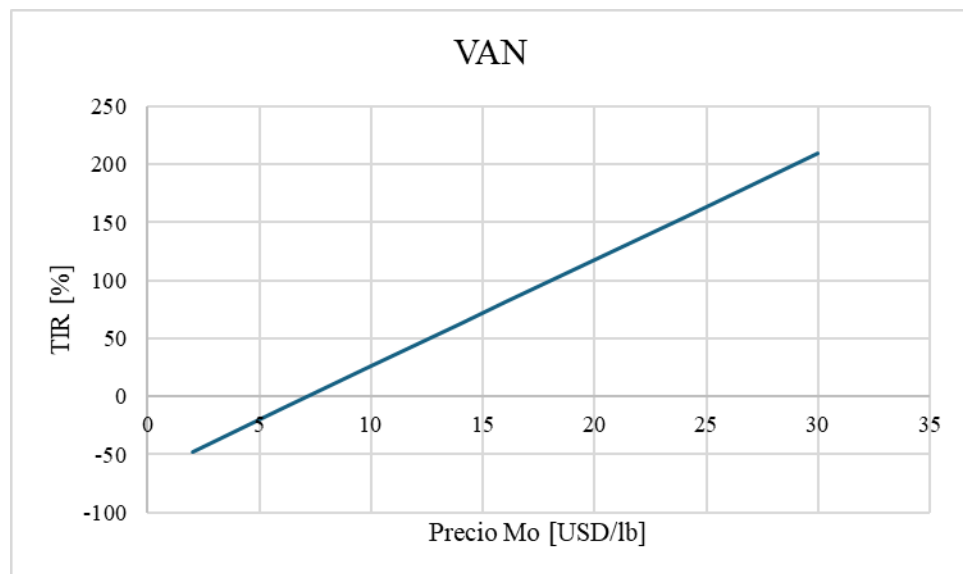


Figura 7. 5: Sensibilización VAN costo Mo

En el caso del TIR, el proyecto pierde su rentabilidad en valores bajos lo 12,3 [USD/lb].

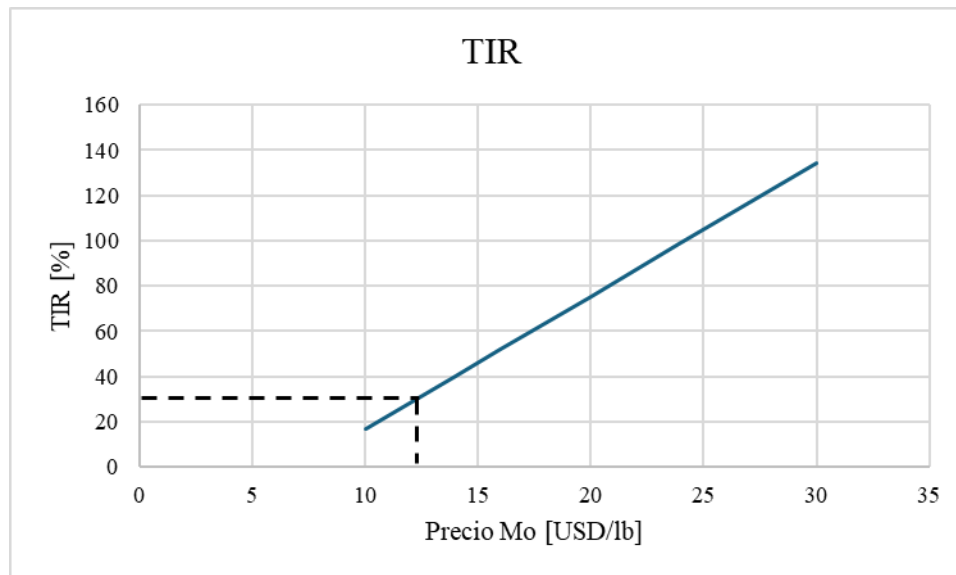


Figura 7. 6: Sensibilización TIR costo Mo

Respecto a la elasticidad en cuanto al precio del molibdeno, esta es de $E=1,4$ lo que indica que el VAN es muy sensible al cambio de esta variable por lo que una baja considerable del precio de molibdeno significaría que el proyecto dejaría de ser rentable.

7.4. Conclusiones

Con la información previamente dispuesta, los principales gastos de inversión están ligados a los equipos utilizados para la inyección de MVHH mientras que los costos operacionales, están sujetos principalmente al consumo de MVHH.

En base a los indicadores económicos, el proyecto es altamente rentable con un VAN de \$155 [MMUSD] y un TIR de 99%, quedando pagado en su totalidad dentro del primer mes.

Para analizar la viabilidad del proyecto en diferentes escenarios se sensibilizó respecto al costo de MVHH y molibdeno [USD/lb], los resultados indican que el proyecto es sensible a la última mencionada, dejando de ser rentable si el valor baja de los 7,05 [USD/lb]

Además, es posible indicar que la inversión realizada puede ser considerada despreciable frente a las ganancias generadas.

Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

Mediante la investigación realizada, es válido hablar sobre la eficiencia de las MVHH como carrier de flotación para partículas finas. Debido a que las pruebas de flotación batch utilizando una dosificación de 1 [g_{MVHH}/kg_{min}], indicaron un aumento de un 12% en la recuperación de partículas finas (25 [μm]) lo cual está directamente ligado al aumento de la probabilidad de colisión partícula-burbuja al adherirse las partículas de molibdeno a la superficie de la MVHH aumentando su tamaño.

Una vez comprobado el efecto del uso de MVHH en la recuperación de minerales, se realizó el análisis de nodos respectivo al sistema con el fin de obtener una expresión para la recuperación final en función de cada una de las etapas, para así realizar un análisis de sensibilidad para identificar que etapa tenía una mayor incidencia en la recuperación global. Los resultados obtenidos indicaron que aumentando la recuperación de la etapa cleaner 1 es posible lograr un aumento considerable en la recuperación global del sistema. Aquello y el hecho de que la cola de dicha etapa es una de las que mayor porcentaje de partículas bajo tamaño (<20 [μm]) la hacen la elección ideal para implementar las MVHH, por lo cual se sugiere la implementación directa en la cola y no en la celda cleaner como tal.

Para la inyección de las MVHH al sistema, se considera añadir las en forma de pulpa con un 28% de peso en sólidos de MVHH con un flujo de 0,27 [m³/h], las cuales serán almacenadas en un estanque agitado con el fin de homogeneizar la mezcla y posteriormente ser inyectadas a través de una bomba neumática diafragma, accionada por un compresor.

Respecto al punto de vista económico, el interés estaba en destacar el beneficio económico que conlleva el uso de las MVHH, para esto se estimaron los gastos operacionales (OPEX) y los gastos de capital (CAPEX). En cuanto al OPEX se estimó un gasto anual de \$74,4 [MMUSD/año] considerando el gasto en insumos y gasto energético de los equipos. Mediante el flujo de caja, se determinaron los indicadores económicos, obteniendo un VAN de \$155 [MMUSD] y un TIR de 99% con un payback al primer mes, dentro del cual se estiman ganancias de \$15,4 [MMUSD/año]. Mediante el análisis de sensibilidad, es posible concluir que el proyecto este sujeto al precio por libra de molibdeno, ya que este presenta una elasticidad mayor a 1 y una rentabilidad solo por valores sobre los 12 [USD/lb].

Finalmente, se concluye que la implementación de las MVHH al caso evaluado conlleva grandes beneficios económicos, contribuyendo al aumento de recuperación de partículas finas disminuyendo así su pérdida irreversible en relaves.

7.2.Recomendaciones

Para investigaciones y aplicaciones futuras que estén vinculadas con el uso de la tecnología de microesferas de vidrio huecas hidrofobizadas, se sugiere lo siguiente:

- Evaluar el efecto que tengan las MVHH que hayan sido funcionalizadas con alcoholes como octanol o dodecanol en la recuperación de molibdeno.
- Evaluar alternativas para la recuperación de MVHH y separación de estas con el mineral.
- Analizar cantidad recuperada y características de hidrofobicidad de las MVHH con el fin de ser reutilizadas en el proceso de flotación para así disminuir costos de insumos.
- Llevar a cabo pruebas a escala industrial con el fin de tener más información sobre el comportamiento de las MVHH en un sistema de flotación.

Referencias

- Aguilar, D. E. (2014). Diseño de un sistema de flotación por aire disuelto (f.a.d) para mejorar la calidad del agua residual de la industria láctea el ordeño y la corpabe [bachelorThesis, Quito : EPN, 2014.]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8646>
- Antakli, S. C., & Serpinet, J. (1987). Determination of the concentration of silanol groups by a chemical reaction with methylolithium and GC measurements of evolved methane. *Chromatographia*, 23(10), 767-769. <https://doi.org/10.1007/BF02312671>
- Araya, R., & Lawson, V. (2018). The Use of the Jameson Cell to Improve Flotation Circuit Design. Glencore Technology.
- Arriagada, S. (2018). Desarrollo y Validación Experimental de Tecnología de Flotación de Partículas Finas Asistidas por Microesferas de Vidrio Huecas Hidrofobizadas. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Atkinson, B. W., Conway, C. J., & Jameson, G. J. (1993). Fundamentals of Jameson Cell Operation Including Size-Yield Responde. Glencore Technology.
- Atkinson, B. W., Griffin, P. T., Jameson, G. J., & Espinosa-Gomez, R. (1993). Jameson Cell Test Work on Copper Streams in the Copper Concentrator of Mount Isa Mines Limited. <https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/xviii-international-mineral-processing-congress---five-volume-set/jameson-cell-test-work-on-copper-streams-in-the-copper-concentrator-of-mount-isa-mines-limited/>
- Bahrami, A., Hassanpour Kashani, R., Kazemi, F., & Ghorbani, Y. (2022). Oxidation-reduction effects in the flotation of copper sulfide minerals and molybdenite – A proof of concept at industrial scale. *Minerals Engineering*, 180, 107505. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107505>
- Ballard, C. C., Broge, E. C., Iler, R. K., St. John, D. S., & McWhorter, J. R. (1961). ESTERIFICATION OF THE SURFACE OF AMORPHOUS SILICA. 20-25.
- Barrios, G. (2017). Evaluación, análisis y simulación de la planta de flotación selectiva de molibdeno de Codelco División El Teniente [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/145590>
- Bolaño, A. (2009). Sistema de flotación por aire disuelto para el tratamiento de aguas residuales industriales. <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3777560>
- Capponi, F., Matiolo, E., Nunes, D., Rubio, J., & Guerrero, C. (2003). ADVANCES IN FLOTATION OF MINERALS FINES.
- Castro, S., Lopez-Valdivieso, A., & Laskowski, J. S. (2016). Review of the flotation of molybdenite. Part I: Surface properties and floatability. *International Journal of Mineral Processing*, 148, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.01.003>
- Chao, Y., Li, S., Gao, L., Sun, L., Li, L., Chai, N., & Cao, Y. (2021). Enhanced Flotation Recovery of Fine Molybdenite Particles Using a Coal Tar-Based Collector. <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/12/1439>

- Chen, P., Chen, Y., Liu, H., Li, H., Chai, X., Lu, X., Sun, W., Wang, H., Luo, Y., & Wang, X. (2021). Novel Approach for Fine Ilmenite Flotation Using Hydrophobized Glass Bubbles as the Buoyant Carrier. <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/3/231>
- Chipfunhu, D., Zanin, M., & Grano, S. (2011). The dependency of the critical contact angle for flotation on particle size – Modelling the limits of fine particle flotation. *Minerals Engineering - MINER ENG*, 24, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.09.020>
- Fornasiero, D., & Filippov, L. O. (2017). Innovations in the flotation of fine and coarse particles. *Journal of Physics: Conference Series*, 879(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/879/1/012002>
- Fuerstenau, D. W., Li, C., & Hanson, J. S. (1988). Shear flocculation and carrier flotation of fine hematite. En A. J. Plimpton (Ed.), *Production and Processing of Fine Particles* (pp. 329-335). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-036448-3.50039-6>
- Garfe, M. (2023). Evaluación Técnica y Económica del Uso de Carriers Hidrofobizados para Incrementar la Recuperación de Finos en Colas Rougher en Planta DMH Codelco. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Hall, S., & Harrison, M. (1995). *New Jameson Cell flotation of industrial minerals*. Glencore Technology.
- Hao, J., Liu, J., Yu, Y., Gao, H., Qin, X., & Bai, X. (2023). Depressants for separation of chalcopyrite and molybdenite: Review and prospects. *Minerals Engineering*, 201, 108209. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108209>
- Hunter, T. N., Wanless, E. J., & Jameson, G. J. (2009). Effect of esterically bonded agents on the monolayer structure and foamability of nano-silica. 181-190.
- Iler, R. (1952). *The Chemistry of Silica* (1st Ed.). Wiley.
- Iler, R. (1979). Method of esterifying the surface of a silica substrate having a reactive silanol surface and product thereof (Patent No. 2,657,149).
- Kelebek, S. (1993). The Effect of Oxidation on the Flotation Behaviour of Nickel-Copper Ores. XVIII International Mineral Processing Congress.
- Kracht, W., Orozco, Y., & Acuña, C. (2016). Effect of surfactant type on the entrainment factor and selectivity of flotation at laboratory scale. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687516300693>
- Lawson, V. (2016). Enhancing the Performance of Cu-Mo Circuits using the Jameson Cell.
- Lei, D., Gui, W., Zhao, X., Tian, X., Xiao, W., Xue, J., Wang, Y., & Peng, X. (2023). New insight into poor flotation recovery of fine molybdenite: An overlooked phase transition from 2H to 1T MoS₂. *Separation and Purification Technology*, 304, 122286. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122286>
- Leistner, T., Peuker, U. A., & Rudolph, M. (2017). How gangue particle size can affect the recovery of ultrafine and fine particles during froth flotation. *Minerals Engineering*, 109, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.02.005>

- Li, S., Ma, X., Wang, J., Xing, Y., Gui, X., & Cao, Y. (2020). Effect of polyethylene oxide on flotation of molybdenite fines. *Minerals Engineering*, 146, 106146. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106146>
- Lin, Q., Gu, G., Wang, H., Wang, C., Liu, Y., Fu, J., & Zhu, R. (2018). An effective approach for improving flotation recovery of molybdenite fines from a finely-disseminated molybdenum ore. *Journal of Central South University*, 25(6), 1326-1339. <https://doi.org/10.1007/s11771-018-3829-1>
- Lin, Y., Xu, W., Jiang, L., Han, B., & Yang, M. (2023). A Novel Chalcopyrite Depressant for Selective Separation of Molybdenite from Cu-Mo Sulfide Ores and Its Interaction Mechanisms. *Minerals*, 13(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/min13121548>
- Morin, E., & Lawson, V. (2015). Jameson Cell Project Evaluation in the Cleaner Circuit at Codelco Andina. Glencore Technology.
- Nakhaei, F., & Irannajad, M. (2014). Investigation of effective parameters for molybdenite recovery from porphyry copper ores in industrial floatation circuit. <https://doi.org/10.5277/ppmp140205>
- Ossenkamp, G. C., Kemmitt, T., & Johnston, J. H. (2001). New Approaches to Surface-Alkoxylated Silica with Increased Hydrolytic Stability. 3975-3980.
- Ossenkamp, G., Kemmitt, T., & Johnston, J. (2002). Toward Functionalized Surfaces through Surface Esterification of Silica. *Langmuir*, 18. <https://doi.org/10.1021/la015732z>
- Peng, H., Wu, D., Abdalla, M., Luo, W., Jiao, W., & Bie, X. (2017). Study of the Effect of Sodium Sulfide as a Selective Depressor in the Separation of Chalcopyrite and Molybdenite. *Minerals*, 7(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/min7040051>
- Peng, Y., & Zhao, S. (2011). The effect of surface oxidation of copper sulfide minerals on clay slime coating in flotation. *Minerals Engineering*, 24(15), 1687-1693. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.007>
- Peres, A. E. C., Gonçalves, K. L. C., Andrade, V. L. L., & Turrer, H. D. G. (2005). Effect of pulp potential on the flotation of a sulfide copper ore. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 22(3), 168-172. <https://doi.org/10.1007/BF03403132>
- Pestryak, I. V., Morozov, V. V., National University of Science and Technology “MISiS”, Moscow, Russia, Tumen-Ayush, B., KOO “Enterprise “Erdenet”, Erdenet, Mongolia, Ochir, E., & KOO “Enterprise “Erdenet”, Erdenet, Mongolia. (2019). Analysis of the reasons for molybdenite losses and improvement of recirculating water conditioning regimes in the process of copper-molybdenum ore flotation. *Non-Ferrous Metals*, 9-16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2019.02.02>
- Rodrigues, R. T., & Rubio, J. (2007). DAF–dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. *International Journal of Mineral Processing*, 82(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.07.019>
- Rubio, J., Souza, M. L., & Smith, R. W. (2002). Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals Engineering*, 15(3), 139-155. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(01\)00216-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00216-3)
- Trahar, W. J. (1981). A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 8(4), 289-327. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(81\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0301-7516(81)90019-3)

- Triffett, B., Veloo, C., Adair, B. J. I., & Bradshaw, D. (2008). An investigation of the factors affecting the recovery of molybdenite in the Kennecott Utah Copper bulk flotation circuit. *Minerals Engineering*, 21(12-14), 832-840. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.03.003>
- Wan, H., Yi, P., Song, X., Luukkanen, S., Qu, J., Yang, W., Li, H., & Bu, X. (2023). Role of improving molybdenite flotation by using aromatic hydrocarbon collector in high-calcium water: A multiscale investigation. *Minerals Engineering*, 191, 107984. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107984>
- Wang, C., Liu, R., Wu, M., Xu, Z., Tian, M., Yin, Z., Sun, W., & Zhang, C. (2021). Flotation separation of molybdenite from chalcopyrite using rhodanine-3-acetic acid as a novel and effective depressant. 162. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687520305677>
- Wang, L., Peng, Y., Runge, K., & Bradshaw, D. (2015). A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation. *Minerals Engineering*, 70, 77-91. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.003>
- Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2005). 12—Froth flotation. En B. A. Wills & T. Napier-Munn (Eds.), *Wills' Mineral Processing Technology (Seventh Edition)* (pp. 267-352). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075064450-1/50014-X>
- Yang, B., Wu, J., Deng, B., Shao, H., Song, S., & Quintana, M. (2024). Improving the Flotation of Unoxidized and Oxidized Molybdenite Fines Using Dodecylamine as a Collector: Flotation Tests and Interaction Mechanism. *Minerals*, 14(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/min14050468>
- Yi, G., Macha, E., Van Dyke, J., Ed Macha, R., McKay, T., & Free, M. L. (2021). Recent progress on research of molybdenite flotation: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 295, 102466. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102466>
- Yianatos, J. (2005). Flotación de Minerales (UTFSM). <https://es.scribd.com/document/132342529/Yianatos-Flotacion-de-Minerales-UTFSM>
- Yianatos, J., Contreras, F., Díaz, F., & Villanueva, A. (2009). Direct measurement of entrainment in large flotation cells. *Powder Technology*, 189(1), 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.05.013>
- Zhao, Q., Liu, W., Wei, D., Wang, W., Cui, B., & Liu, W. (2018). Effect of copper ions on the flotation separation of chalcopyrite and molybdenite using sodium sulfide as a depressant. *Minerals Engineering*, 115, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.10.008>
- Zheng, X., Franzidis, J. P., Johnson, N. W., & Manlapig, E. V. (2005). Modelling of entrainment in industrial flotation cells: The effect of solids suspension. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687504001438>

Anexos

Anexo A: Resultados experimentales

Anexo A.1: Resultados pruebas de flotación batch

Tabla A. 1: Masa en concentrado y leyes asociadas

Número de test	Condición	Corriente	Masa (g)	Ley		
				Cu (%)	Mo (ppm)	Fe (%)
1	P80 = 25 μ m, sin M.V.H.H.	Alimentación	2060	0,44	82	2,47
		Concentrado 1 (1 min)	166,7	0,87	495	8,34
		Concentrado 2 (3 min)	85	4,29	554	13,91
		Concentrado 3 (6 min)	29	9,81	316	15,6
		Concentrado 4 (10 min)	17,5	2,71	92	6,77
		Concentrado 5 (15 min)	17,7	0,73	24	4,26
		Concentrado 6 (20 min)	17,3	0,32	20	3,99
		Relave	1726,8	0,07	10	1,67
2	P80 = 25 μ m, sin M.V.H.H.	Alimentación	2107,5	0,51	184	2,83
		Concentrado 1 (1 min)	117,5	0,87	1265	7,46
		Concentrado 2 (3 min)	64	5,67	1135	9,74
		Concentrado 3 (6 min)	15	10,09	1096	13,35
		Concentrado 4 (10 min)	14,6	2,28	241	7,22
		Concentrado 5 (15 min)	11,8	0,57	55	4,28
		Concentrado 6 (20 min)	6,7	0,32	22	2,92
		Relave	1877,9	0,08	10	1,74
3		Alimentación	2104,5	0,51	70	2,54

	P80 = 25 μ m, con M.V.H.H.	Concentrado 1 (1 min)	175,8	0,87	650	6,37
		Concentrado 2 (3 min)	73,9	8,03	795	11,55
		Concentrado 3 (6 min)	18,4	14,52	678	13,59
		Concentrado 4 (10 min)	21,5	3,33	142	6,25
		Concentrado 5 (15 min)	20,7	1,14	44	3,6
		Concentrado 6 (20 min)	20,1	0,86	38	2,94
		Relave	1774,1	0,06	10	1,56

Anexo A.2: Datos reconciliados

Tabla A. 2: Resultados reconciliados

Número de test	Condición	Corriente	Medido			Ajustado		
			Cu (%)	Mo (ppm)	Fe (%)	Cu (%)	Mo (ppm)	Fe (%)
1	$P_{80} = 25 \mu m$ Sin M.V.H.H.	Alimentación	0,44	82	2,47	0,41	57	2,30
		Concentrado	2,58	424	9,87	5,55	425	9,88
		Relave	0,07	10	1,67	0,09	34	1,83
2	$P_{80} = 25 \mu m$ Sin M.V.H.H.	Alimentación	0,51	70	2,83	0,40	123	2,45
		Concentrado	2,87	1054	8,17	5,55	1058	8,19
		Relave	0,08	10	1,74	0,10	67	2,10
3	$P_{80} = 25 \mu m$ Con M.V.H.H.	Alimentación	0,51	70	2,54	0,40	55	2,20
		Concentrado	3,41	576	7,54	5,55	577	7,56
		Relave	0,06	10	1,56	0,10	24	1,88

Anexo B: Caso de estudio y determinación punto de adición

Anexo B.1: Descripción de corrientes de diagrama de circuito de flotación

Tabla B. 1: Descripción de cada corriente asociada al proceso

Corriente	Descripción
1	Alimentación espesador

2	Alimentación espesador
3	Alimentación mezclador
4	Alimentación mezclador
5	Alimentación estanque acondicionador
6	Alimentación Rougher
7	Cola Rougher y alimentación espesador
8	Descarga espesador
9	Concentrado Rougher
10	Alimentación Cleaner 1
11	Cola Cleaner 1
12	Concentrado Cleaner 1
13	Alimentación Cleaner 2
14	Cola Cleaner 2
15	Concentrado Cleaner 2
16	Alimentación Cleaner 3
17	Cola Cleaner 3
18	Concentrado Cleaner 3 y alimentación Cleaner 4
19	Cola Cleaner 4
20	Concentrado Cleaner 4 y alimentación Cleaner 5
21	Cola Cleaner 5
22	Concentrado Cleaner 5

Anexo B.2: Datos granulométricos

Tabla B. 2: Información granulométrica de cada corriente

	Abertura	Micrones	Peso [gr]	Media geometrica	Peso [gr]	% Retenido	% Retenido acum
Alimentación Rougher	#48	297	0	250	0	0,0	0,0
	#65	210	0	177	1,2	0,4	0,4
	#100	149	1,2	125	4,6	1,6	2,0
	#150	105	4,6	88	12,4	4,3	6,3
	#200	74	12,4	63	21,3	7,4	13,7
	#270	53	21,3	48	15	5,2	18,9

	#325	44	15	21	233,2	81,1	100,0
	#-325	-44	233,2	Total	287,7		
			287,7				
Concentrado Rougher	#48	297	0	250	0,2	0,1	0,1
	#65	210	0,2	177	0,1	0,0	0,1
	#100	149	0,1	125	0,8	0,3	0,4
	#150	105	0,8	88	3,7	1,3	1,7
	#200	74	3,7	63	10,2	3,7	5,4
	#270	53	10,2	48	9,6	3,4	8,8
	#325	44	9,6	21	254,8	91,2	100,0
	#-325	-44	254,8		279,4		
			279,4				
Cola Rougher	#48	297	0	250	0,4	0,1	0,1
	#65	210	0,4	177	0,7	0,2	0,4
	#100	149	0,7	125	14,3	4,9	5,3
	#150	105	14,3	88	23,4	8,1	13,4
	#200	74	23,4	63	33	11,4	24,7
	#270	53	33	48	22,2	7,6	32,4
	#325	44	22,2	21	196,3	67,6	100,0
	#-325	-44	196,3		290,3		
			290,3				
Alimentación 1 limpieza	#48	297	0	250	0,1	0,0	0,0
	#65	210	0,1	177	0,5	0,2	0,2
	#100	149	0,5	125	2,6	0,9	1,1
	#150	105	2,6	88	7,5	2,6	3,7
	#200	74	7,5	63	11,2	3,9	7,7
	#270	53	11,2	48	8,4	2,9	10,6
	#325	44	8,4	21	255,7	89,4	100,0
	#-325	-44	255,7		286		
			286				
Concentrado 1 Limpieza	#48	297	6,1	250	20,4	8,5	8,5
	#65	210	14,3	177	8,4	3,5	12,0
	#100	149	8,4	125	6,4	2,7	14,7

	#150	105	6,4	88	6,8	2,8	17,5
	#200	74	6,8	63	13,1	5,5	23,0
	#270	53	13,1	48	5,7	2,4	25,4
	#325	44	5,7	21	178,7	74,6	100,0
	#-325	-44	178,7		239,5		
			239,5				
Cola 1 Limpieza	#48	297	0	250	0	0,0	0,0
	#65	210	0	177	0,2	0,1	0,1
	#100	149	0,2	125	1,2	0,4	0,5
	#150	105	1,2	88	12	4,2	4,7
	#200	74	12	63	14,8	5,2	10,0
	#270	53	14,8	48	12,3	4,3	14,3
	#325	44	12,3	21	242,5	85,7	100,0
	#-325	-44	242,5		283		
			283				
Alimentación 2 limpieza	#48	297	0	250	0,3	0,1	0,1
	#65	210	0,3	177	6,7	2,4	2,5
	#100	149	6,7	125	6,7	2,4	4,8
	#150	105	6,7	88	10,2	3,6	8,4
	#200	74	10,2	63	24,7	8,7	17,1
	#270	53	24,7	48	9,7	3,4	20,5
	#325	44	9,7	21	226,2	79,5	100,0
	#-325	-44	226,2		284,5		
			284,5				
Concentrado 2 limpieza	#48	297	0,7	250	6,1	2,2	2,2
	#65	210	5,4	177	8,9	3,2	5,4
	#100	149	8,9	125	12,3	4,4	9,8
	#150	105	12,3	88	32,7	11,7	21,5
	#200	74	32,7	63	38,2	13,7	35,1
	#270	53	38,2	48	15,9	5,7	40,8
	#325	44	15,9	21	165,6	59,2	100,0
	#-325	-44	165,6		279,7		
			279,7				

Cola 2 limpieza	#48	297	3,7	250	6,7	2,4	2,4
	#65	210	3	177	2	0,7	3,1
	#100	149	2	125	2	0,7	3,8
	#150	105	2	88	3,3	1,2	5,0
	#200	74	3,3	63	7,9	2,8	7,8
	#270	53	7,9	48	5,6	2,0	9,8
	#325	44	5,6	21	253,2	90,2	100,0
	#-325	-44	253,2		280,7		
			280,7				
Alimentación 3 limpieza	#48	297	0,6	250	5,4	1,9	1,9
	#65	210	4,8	177	4,9	1,7	3,6
	#100	149	4,9	125	12	4,2	7,8
	#150	105	12	88	26,4	9,2	17,0
	#200	74	26,4	63	47,9	16,7	33,7
	#270	53	47,9	48	15,9	5,6	39,3
	#325	44	15,9	21	173,9	60,7	100,0
	#-325	-44	173,9		286,4		
			286,4				
Concentrado 3 limpieza y alimentación 4 limpieza	#48	297	0,5	250	1,1	0,4	0,4
	#65	210	0,6	177	1	0,4	0,7
	#100	149	1	125	5,3	1,9	2,6
	#150	105	5,3	88	16,2	5,8	8,4
	#200	74	16,2	63	38,9	13,9	22,3
	#270	53	38,9	48	31,8	11,3	33,6
	#325	44	31,8	21	186,5	66,4	100,0
	#-325	-44	186,5		280,8		
			280,8				
Cola 3 limpieza	#48	297	9,7	250	20,7	7,2	7,2
	#65	210	11	177	7,2	2,5	9,7
	#100	149	7,2	125	9,1	3,2	12,9
	#150	105	9,1	88	32	11,2	24,1
	#200	74	32	63	30,3	10,6	34,6
	#270	53	30,3	48	11,9	4,1	38,8

	#325	44	11,9	21	175,6	61,2	100,0
	#-325	-44	175,6		286,8		
			286,8				
Concentrado 4 limpieza	#48	297	1,8	250	4,2	1,5	1,5
	#65	210	2,4	177	1,7	0,6	2,1
	#100	149	1,7	125	4,9	1,7	3,8
	#150	105	4,9	88	20,4	7,2	11,0
	#200	74	20,4	63	35	12,3	23,3
	#270	53	35	48	26,8	9,4	32,7
	#325	44	26,8	21	191,1	67,3	100,0
	#-325	-44	191,1		284,1		
			284,1				
Cola 4 limpieza	#48	297	7,9	250	12	3,8	3,8
	#65	210	4,1	177	2,1	0,7	4,5
	#100	149	2,1	125	8,3	2,7	7,2
	#150	105	8,3	88	23	7,3	14,5
	#200	74	23	63	53,2	17,0	31,5
	#270	53	53,2	48	32,2	10,3	41,8
	#325	44	32,2	21	182,4	58,2	100,0
	#-325	-44	182,4		313,2		
			313,2				
Alimentación 5 limpieza	#48	297	3,3	250	7	2,5	2,5
	#65	210	3,7	177	3,8	1,3	3,8
	#100	149	3,8	125	5,7	2,0	5,8
	#150	105	5,7	88	17,9	6,3	12,1
	#200	74	17,9	63	37	13,0	25,1
	#270	53	37	48	22,9	8,0	33,1
	#325	44	22,9	21	190,4	66,9	100,0
	#-325	-44	190,4		284,7		
			284,7				
Concentrado 5 limpieza	#48	297	1,6	250	3,1	1,1	3,6
	#65	210	1,5	177	1,6	0,6	8,9
	#100	149	1,6	125	5	1,7	16,2

	#150	105	5	88	19	6,6	35,5
	#200	74	19	63	40,3	14,0	58,1
	#270	53	40,3	48	30,7	10,7	67,5
	#325	44	30,7	21	187,7	65,3	100,0
	#-325	-44	187,7		287,4		
			287,4				

Aplicación del modelo Rosin-Rammler (Ec. B.1) a cada una de las corrientes

$$f(x) = 100 \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_r} \right)^m \right] \right) \quad (\text{Ec. B.1})$$

Obteniendo los siguientes valores:

Tabla B. 3: Datos ajuste modelo Rosin-Rammler

Corriente	m	x _r
Alimentación Rougher	0,8867	32,02
Concentrado Rougher	0,6877	14,20
Cola Rougher	1,1044	51,86
Alimentación Cleaner 1	0,7665	20,41
Concentrado Cleaner 1	0,341	21,96
Cola Cleaner 1	1,0052	30,24
Alimentación Cleaner 2	0,806	34,13
Concentrado Cleaner 2	0,8893	63,36
Cola Cleaner 2	0,28	2,42
Alimentación Cleaner 3	0,9061	58,76
Concentrado Cleaner 3/Alim Cleaner 4	0,9965	45,91
Cola Cleaner 3	0,6474	59,47
Concentrado Cleaner 4	0,8241	43,20
Cola Cleaner 4	0,8153	55,75
Alimentación Cleaner 5	0,7385	43,15
Concentrado Cleaner 5	1,3005	107,57

Anexo B.3: Diagrama de nodos detallado

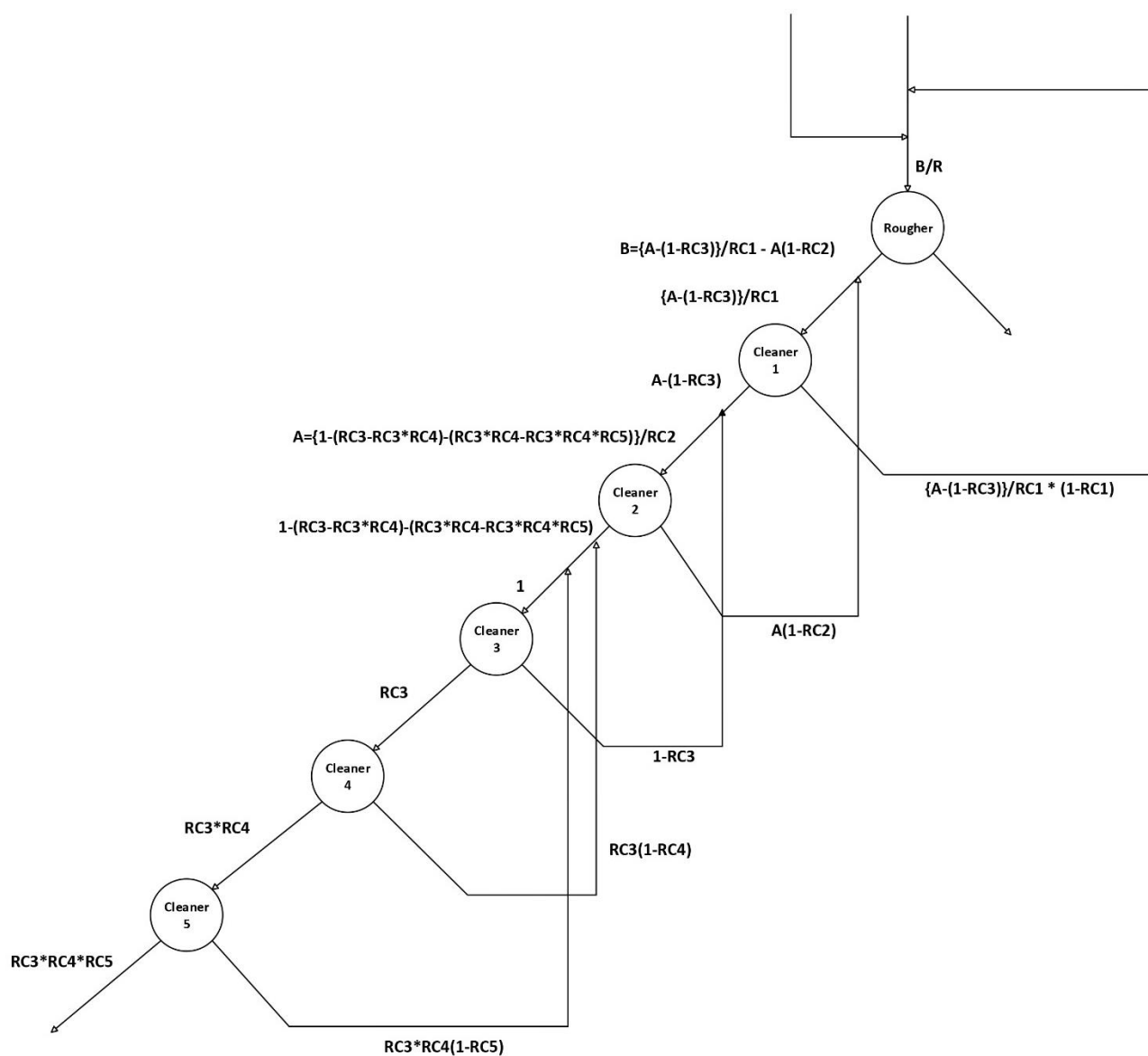


Figura B. 1: Diagrama de nodos con corrientes detalladas

Anexo B.4: Datos sensibilización

Tabla B. 4: Datos sensibilización por etapa

	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RR	RG
Cleaner 1	0,25	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,30
	0,3	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,39
	0,35	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,49
	0,4	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,60
	0,45	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,74

	0,5	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,90
	0,55	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	1,09
	0,6	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	1,34
	0,65	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	1,64
	0,7	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	2,05
	0,75	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	2,60
	0,8	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	3,41
	0,85	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	4,69
	0,9	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	7,05
Cleaner 2	0,2381	0,25	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,25
	0,2381	0,3	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,32
	0,2381	0,35	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,39
	0,2381	0,4	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,48
	0,2381	0,45	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,59
	0,2381	0,5	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,71
	0,2381	0,55	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	0,86
	0,2381	0,6	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	1,03
	0,2381	0,65	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	1,25
	0,2381	0,7	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	1,53
	0,2381	0,75	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	1,90
	0,2381	0,8	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	2,40
	0,2381	0,85	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	3,13
	0,2381	0,9	0,0884	0,6858	0,7851	0,5579	4,29
Cleaner 3	0,2381	0,2785	0,1	0,6858	0,7851	0,5579	0,32
	0,2381	0,2785	0,2	0,6858	0,7851	0,5579	0,66
	0,2381	0,2785	0,3	0,6858	0,7851	0,5579	1,01
	0,2381	0,2785	0,4	0,6858	0,7851	0,5579	1,37
	0,2381	0,2785	0,45	0,6858	0,7851	0,5579	1,56
	0,2381	0,2785	0,5	0,6858	0,7851	0,5579	1,75
	0,2381	0,2785	0,55	0,6858	0,7851	0,5579	1,94
	0,2381	0,2785	0,6	0,6858	0,7851	0,5579	2,14
	0,2381	0,2785	0,65	0,6858	0,7851	0,5579	2,35
	0,2381	0,2785	0,7	0,6858	0,7851	0,5579	2,55
	0,2381	0,2785	0,75	0,6858	0,7851	0,5579	2,77
	0,2381	0,2785	0,8	0,6858	0,7851	0,5579	2,98
	0,2381	0,2785	0,85	0,6858	0,7851	0,5579	3,20
	0,2381	0,2785	0,9	0,6858	0,7851	0,5579	3,43
Cleaner 4	0,2381	0,2785	0,0884	0,25	0,7851	0,5579	0,04
	0,2381	0,2785	0,0884	0,3	0,7851	0,5579	0,06
	0,2381	0,2785	0,0884	0,35	0,7851	0,5579	0,08

	0,2381	0,2785	0,0884	0,4	0,7851	0,5579	0,10
	0,2381	0,2785	0,0884	0,45	0,7851	0,5579	0,13
	0,2381	0,2785	0,0884	0,5	0,7851	0,5579	0,15
	0,2381	0,2785	0,0884	0,55	0,7851	0,5579	0,19
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6	0,7851	0,5579	0,22
	0,2381	0,2785	0,0884	0,65	0,7851	0,5579	0,26
	0,2381	0,2785	0,0884	0,7	0,7851	0,5579	0,30
	0,2381	0,2785	0,0884	0,75	0,7851	0,5579	0,34
	0,2381	0,2785	0,0884	0,8	0,7851	0,5579	0,38
	0,2381	0,2785	0,0884	0,85	0,7851	0,5579	0,43
	0,2381	0,2785	0,0884	0,9	0,7851	0,5579	0,48
Cleaner 5	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,25	0,5579	0,30
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,3	0,5579	0,30
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,35	0,5579	0,30
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,4	0,5579	0,30
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,45	0,5579	0,29
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,5	0,5579	0,29
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,55	0,5579	0,29
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,6	0,5579	0,29
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,65	0,5579	0,29
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7	0,5579	0,29
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,75	0,5579	0,29
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,8	0,5579	0,28
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,85	0,5579	0,28
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,9	0,5579	0,28
Rougher	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,25	0,13
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,3	0,15
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,35	0,18
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,4	0,20
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,45	0,23
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,5	0,26
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,55	0,28
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,6	0,31
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,65	0,33
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,7	0,36
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,75	0,38
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,8	0,41
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,85	0,43
	0,2381	0,2785	0,0884	0,6858	0,7851	0,9	0,46

Anexo C: Evaluación de caso estudio

Anexo C.1: Calculo dosificación de MVHH

La dosificación necesaria estará dada por la superficie de MVHH disponible para la adherencia de partículas, recordando que en el proceso las partículas serán de molibdenita (MoS_2). Para determinar la superficie y volumen de una MVHH:

$$A_{MVHH} = 4\pi r_{MVHH}^2$$

$$V_{MVHH} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{MVHH}^3$$

Luego, es necesario determinar el volumen de molibdenita presente en la corriente a tratar:

$$V_{\text{MoS}_2} = \frac{F_{\text{mineral}} \cdot \text{Ley}_{\text{Mo en mineral}}}{\text{Ley}_{\text{Mo en MoS}_2} \cdot \rho_{\text{MoS}_2}}$$

Se calcula el volumen y área de una partícula media, asumiendo forma esférica

$$V_{\text{part}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{\text{part}}^3$$

$$A_{\text{part}} = 4\pi r_{\text{part}}^2$$

Es posible obtener la cantidad de partículas de molibdenita con el tamaño seleccionado

$$N_{\text{part}} = \frac{V_{\text{MoS}_2}}{V_{\text{part}}}$$

Se obtiene el área superficial total que requiere suplir la MVHH

$$A_{\text{total}} = N_{\text{part}} \cdot A_{\text{part}}$$

Finalmente es posible obtener la cantidad de MVHH necesaria, estimando un porcentaje de recubrimiento y eficiencia de colección:

$$N_{MVHH} = \frac{A_{\text{total}}}{A_{MVHH}}$$

$$MVHH[\text{ppm}] = N_{MVHH} \cdot V_{MVHH} \cdot \rho_{MVHH} \cdot \frac{1000}{\frac{\%_{\text{rec}}}{100} \cdot \frac{\%_{\text{col}}}{100}}$$

Finalmente, se repite el procedimiento para diferentes tamaños de partícula para obtener la dosificación necesaria para la recuperación según el tamaño y luego es multiplicado por la fracción granulométrica para obtener así una dosis ponderada.

Anexo C.2: Planilla de cálculo

Cálculo de coleccion de partículas de molibdenita pr glass bubbles											
sensibilizado usando sdistribucion de tamaños											
por clase de tamaño, fraccion											
Características glass bubbles											
60 micrometros, diámetros											
370 kg/m3 densidad											
0,00003 m, radio											
1,13E-13 m3 de una GB											
4,18E-11 kg de una Gb											
1,13E-08 m2,superficie de una GB											
Balance de mineral,											
4,7 densidad ton/m3 MoS2											
95,5 MW Mo											
160,07 MW MoS2											
0,597											
1 tonelada de mineral seco											
0,52 % de Mo en el minral, cola cleaner es alto											
0,0052 toneladas de Mo por ton de mineral											
0,008716 toneladas de MoS2 por ton de mineral											
0,001854 m3 de MoS2 por ton de mineral											
40 micrometros tamaño de partícula media de molibdenita											
0,00002 m, radio partícula media											
3,35E-14 m3, vol de una partícula											
5,53E+10 cantidad de partículas de molibdenita											
3,14E-10 m2 area transversal d e una partícula, para recibir GB, considera est											
17,4 m2 de superficie d e una partícula, para recibir GB, considera est											
1,54E+09 cantidad de glass bubbles (cubiertas en 100%) por partículas de mol											
0,064326 kg de glass bubbles necesaria por ton de mineral											
64,3 ppm de glass bubbles											
80 % de recubrimiento de glass bubble: va a ser mas con mas de una capa											
80 % efectividad en la coleccionmy flotacion											
0,64 eficiencia eficiencia total, va a demandar mas glass bubbles											
100,5 ppm consumo teórico para todas las partículas											
201,4 ppm glass bubbles por tonelada											
28	37	50	63	77	88	100	cumulativo				
28	9	13	13	14	11	12	fracciones				
60	60	60	60	60	60	60					
370	370	370	370	370	370	370					
0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003					
1,13E-13	1,13E-13	1,13E-13	1,13E-13	1,13E-13	1,13E-13	1,13E-13					
4,18E-11	4,18E-11	4,18E-11	4,18E-11	4,18E-11	4,18E-11	4,18E-11					
1,13E-08	1,13E-08	1,13E-08	1,13E-08	1,13E-08	1,13E-08	1,13E-08					
4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7					
95,5	95,5	95,5	95,5	95,5	95,5	95,5					
160,07	160,07	160,07	160,07	160,07	160,07	160,07					
0,597	0,597	0,597	0,597	0,597	0,597	0,597					
1	1	1	1	1	1	1					
0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52					
0,0052	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052					
0,008716	0,008716	0,008716	0,008716	0,008716	0,008716	0,008716					
0,001854	0,001854	0,001854	0,001854	0,001854	0,001854	0,001854					
10,2	14,7	21,2	30,5	44,0	63,3	91,2					
5,12E-06	7,37E-06	1,06E-05	1,53E-05	2,2E-05	3,17E-05	4,56E-05					
5,61E-16	1,67E-15	5E-15	1,49E-14	4,46E-14	1,33E-13	3,97E-13					
3,31E-12	1,11E+12	3,71E+11	1,24E+11	4,16E+10	1,39E+10	4,67E+09					
2,05E-11	4,26E-11	8,84E-11	1,83E-10	3,8E-10	7,88E-10	1,63E-09					
68,0	47,2	32,8	22,8	15,8	11,0	7,6					
6,01E+09	4,17E+09	2,90E+09	2,01E+09	1,40E+09	9,71E+08	6,74E+08					
0,251518	0,174665	0,121295	0,084233	0,058495	0,040622	0,028209					
251,5	174,7	121,3	84,2	58,5	40,6	28,2					
80	80	80	80	80	80	80					
80	80	80	80	80	80	80					
0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64					
393,0	272,9	189,5	131,6	91,4	63,5	44,1					
110,0	24,6	24,6	17,1	12,8	7,0	5,3					

Figura C. 1: Planilla de calculo dosificación de MVHH

Anexo D: Evaluación económica

Anexo D.1: Costo MVHH

Calculo MVHH escala lab									
Alcoholes	Precio US	m3	kg/m3	kg	USD/kg				Producción 100 gramos de MVHH
Butanol	27,425	0,001	810		0,81	33,8580247			Butanol
Octanol	113	0,0025	830		2,075	54,4578313			dosis kg USD/100 g
Dodecanol	45	0,001	833		0,833	54,0216086			MVHH 0,1 0,6
Etanol	4,522	0,001	789		0,789	5,73130545			Alcohol 0,26 8,80308642
Acetona	10,115	0,001	790		0,79	12,8037975			Etanol 0,15 0,859695817
									Acetona 0,3 3,841139241
									Energía 7h 0,553085
MVH	6				1	6			Total 14,65700648
Producción de 100 grs de MVHH									+mano de ob 17,58840777
Energía	W	kW	USD/kW	horas de func	USD				USD/kg 175,8840777
Placa calefactora	500	0,5	0,127	7	0,4445				
Bomba persaltica	75	0,075	0,127	7	0,066675				
Bomba vacio	220	0,22	0,127	1,5	0,04191				
				Total	0,553085				

Figura D. 1: Planilla estimación de costo MVHH

Anexo D.2: Depreciación de equipos

Tabla D. 1: Depreciación de equipos anual

Equipo	Valor inicial [USD]	%Residual	Vida útil	Depreciación [USD/año]
Estanque agitado	\$91052	15%	10	\$7740
Bomba diafragma	\$700	10%	20	\$63
Compresor	\$3700	10%	10	\$333

Anexo D.1.: Flujo de caja

Año	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Periodo	0	1	2	3	4	5
Ingresos	-	\$ 170.882.227	\$ 162.743.572	\$ 162.743.572	\$ 162.743.572	\$ 162.743.572
Costo Fijo		\$ 18.000	\$ 18.000	\$ 18.000	\$ 18.000	\$ 18.000
Costo Variable		\$ 10.520.124	\$ 10.520.124	\$ 10.520.124	\$ 10.520.124	\$ 10.520.124
Costos totales		\$ 10.538.124	\$ 10.538.124	\$ 10.538.124	\$ 10.538.124	\$ 10.538.124
Margen operacional		\$ 160.344.103	\$ 152.205.448	\$ 152.205.448	\$ 152.205.448	\$ 152.205.448
Depreciación		\$ 6.760	\$ 6.760	\$ 6.760	\$ 6.760	\$ 6.760
Interes						
Perdidas del ejercicio anterior						
Ingreso venta activo						
Valor libro						
Utilidades antes de impuestos		\$ 160.337.343	\$ 152.198.688	\$ 152.198.688	\$ 152.198.688	\$ 152.198.688
Impuestos		\$ 43.291.083	\$ 41.093.646	\$ 41.093.646	\$ 41.093.646	\$ 41.093.646
Utilidades después de impuestos		\$ 117.046.260	\$ 111.105.042	\$ 111.105.042	\$ 111.105.042	\$ 111.105.042
Valor libro						
Perdidas del ejercicio anterior						
Depreciación		\$ 6.760	\$ 6.760	\$ 6.760	\$ 6.760	\$ 6.760
Inversion activo fijo	\$ 98.764					
Capital de trabajo						
Creditos						
Recuperacion capital de trabajo						
Flujo de caja privado	\$ -98.764	\$ 117.053.020	\$ 111.111.802	\$ 111.111.802	\$ 111.111.802	\$ 111.111.802
Flujo de caja Acumulado		\$ 117.053.020	\$ 228.164.823	\$ 339.276.625	\$ 450.388.427	\$ 561.500.229

Figura D. 2: Flujo de caja asociado al proyecto