

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



Identificación de variables operativas en la flotación de cobre que incrementan el rendimiento en términos de ley del mineral y recuperación

Trabajo de investigación para la obtener el grado académico de BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

AUTOR:

Diego Arturo Quispe Livano

ASESOR:

José Alan Rau Álvarez

Lima, mayo, 2020

RESUMEN

Este trabajo de investigación es un estudio cualitativo, es decir, se basó en la recolección de diferentes fuentes de autores que permitan resolver las hipótesis planteadas. Como objetivo principal se investigó las variables operativas que afectan la flotación del cobre. La principal incógnita para esta investigación fue identificar si el tamaño del mineral ingresante al proceso de flotación es determinante para obtener altos rendimientos. Para responder a dicha pregunta se planteó el siguiente procedimiento: Primero, para mejor comprensión del trabajo presentado, se presentaron conceptos claves de ingeniería y otros propios de esta investigación como la descripción del proceso de obtención de concentrados de cobre a partir minerales sulfurados. Luego, se presentaron seis casos de estudios realizados en diferentes partes del mundo donde se describen y estudian diferentes variables que fueron determinantes al momento de mejorar los procesos de flotación de sus circuitos de obtención de concentrados de cobre. Por último, se escogieron, de las variables recogidas, aquellas que pueden ser analizadas y llevadas hacia un entorno de pequeña minería para su aplicación. En los resultados se encontró que en base a diferentes investigaciones se demuestra que es primordial la manipulación del tamaño del mineral ingresante a la flotación. Además, se encontró que existen más variables como el medio de la molienda (ambiente oxidante), que afecta significativamente a la recuperación de cobre en la flotación por brindar un medio favorable para el accionar de los reactivos.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
Hipótesis	3
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Sector minería en el Perú	4
2.2. Proceso productivo de concentrado	4
2.3. Capacidad.....	7
2.4. Indicadores de producción	8
CAPÍTULO 3. INVESTIGACIONES PREVIAS.....	9
3.1. Caso 1.....	9
3.2. Caso 2.....	11
3.3. Caso 3.....	13
3.4. Caso 4.....	15
3.5. Caso 5.....	16
3.6. Caso 6.....	18
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	21
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	24
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caso de investigación realizada en China sobre la eficiencia en la flotación	9
Tabla 2. Resultados del caso 1.....	10
Tabla 3. Caso de investigación realizada en Turquía sobre las razones de pérdida de cobre en la concentración	11
Tabla 4. Resultados del caso 2.....	11
Tabla 5. Caso de investigación realizado en Brasil.....	13
Tabla 6. Resultados del caso 3.....	14
Tabla 7. Caso de investigación realizada para Journal of Cleaner Production.....	15
Tabla 8. Caso de investigación sobre los efectos del medio de la molienda en el rendimiento de la flotación.....	17
Tabla 9. Composición de la muestra empleada en el Caso 5	17
Tabla 10. Investigación sobre el efecto ocasionado por la adición de un colector pre y post molienda.....	19
Tabla 11. Composición de la muestra empleada en el Caso 6	20
Tabla 12. Comparación de variables analizadas por cada caso.....	21

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circuito de chancado.....	5
Figura 2. Circuito de molienda.....	6
Figura 3. Circuito de Flotación.....	6
Figura 4. Circuito de Espesamiento y filtrado.....	7
Figura 5. Circuito de flotación usado en el caso 2.....	12
Figura 6. Modelo de circuito para diferentes tamaños de minería	13
Figura 7. Rendimiento de la flotación de la calcopirita a diferentes niveles de reactivo y en diferentes medios	18



INTRODUCCIÓN

En la industria minera del cobre, los minerales más abundantes en el mundo son los sulfuros, Calcopirita, Calcosina y Covelina, con un 69.2% de las reservas mundiales, frente a un 30.8% de los óxidos (COCHILCO, 2017). Al existir dos tipos de formaciones de los minerales de cobre, existen dos métodos para su procesamiento, flotación para los sulfuros y lixiviación para los óxidos.

Debido a la gran cantidad reservas de sulfuros que hay en el mundo, el proceso de flotación es mayormente adoptado por las empresas concentrados, sobre todo por las proyecciones de la existencia de tan solo un 12% de óxidos para el 2027 (COCHILCO, 2017).

Por ello resulta importante para las empresas conocer sobre herramientas que le permitan incrementar su competitividad para poder confrontar un incremento potencial de la competencia en el largo plazo.

El contenido de la investigación será dividido en 5 capítulos:

En el capítulo 1 se explicarán los aspectos generales de la investigación, es decir, se explicarán los objetivos generales y específicos, así como también se planteará la hipótesis respectiva.

Luego, en el capítulo 2, se describirá el marco teórico a utilizar en la investigación y se expondrá y explicará que rumbo está tomando el sector, además se explicaran los conceptos teóricos necesarios para una fácil comprensión del contenido de la investigación.

En el capítulo 3, expondrán las investigaciones previas referentes al tema de la investigación y se extraerán puntos claves para la solución de la hipótesis.

En el capítulo 4 se mostrarán y evaluarán los resultados de las investigaciones previas. Finalmente, en el capítulo 5, se brindarán las conclusiones de la investigación.

CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES

Para efectos de esta investigación, en primera instancia, se plantearán los objetivos generales. Luego, se plantearán los objetivos específicos, los cuales profundizarán el objetivo general dividiéndolo en objetivos puntuales, de modo que se pueda delimitar con precisión el objeto de estudio. Por último, se plantearán las hipótesis necesarias, estas brindarán suposiciones respecto al tema de la investigación, es decir, se plantearán preguntas específicas que se tratarán de responder a lo largo de esta investigación, con ayuda de recolección de casos de estudios previos en la industria.

Objetivo general

Desde que nos referimos a una pequeña empresa, se puede entender que el capital y el nivel de sus operaciones e ingresos no son muy elevados. Esto nos indica que su capacidad para invertir en grandes operaciones está limitada. Por ello, para incrementar el beneficio, es importante realizar mejoras y estar pendiente de los factores más importantes que influyan en el proceso de concentración.

Entonces, con el planteamiento anterior, se propone como finalidad de esta investigación averiguar cuáles son los principales factores que intervienen en el éxito operacional en la flotación de una pequeña empresa concentradora de minerales de cobre.

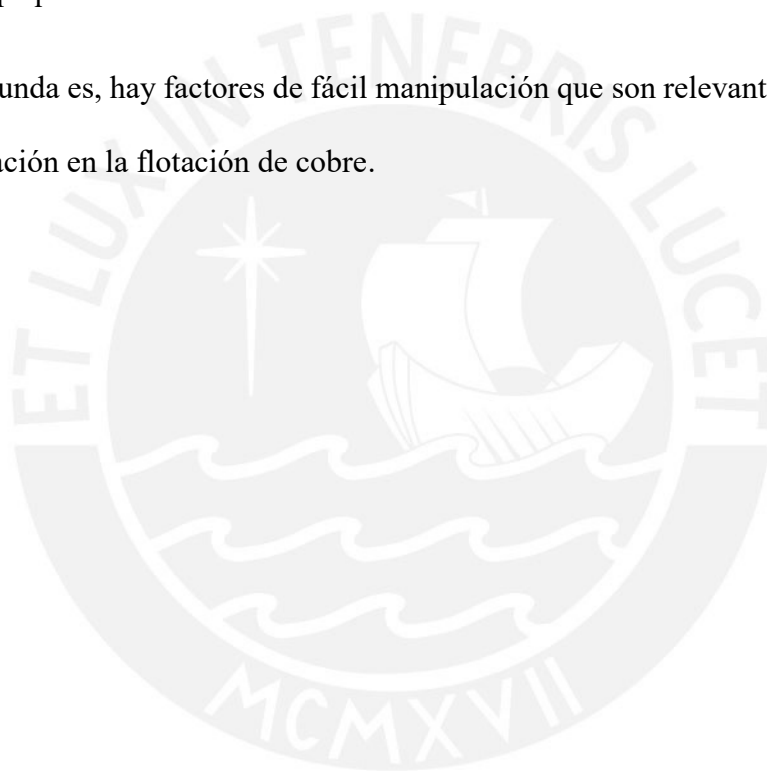
Objetivos específicos

Este trabajo busca analizar el proceso de flotación de minerales sulfurados de cobre de diferentes empresas mineras e identificar los factores importantes que afecten la producción, haciendo uso de los conceptos de recuperación y ley del mineral, para luego analizar si es posible su aplicación en pequeñas mineras del Perú.

Hipótesis

Frente a la problemática presentada y en base a conocimientos previos, existen dos hipótesis importantes a realizarse. Estas servirán para direccionar de manera adecuada la investigación:

- El tamaño de mineral ingresante a la etapa de flotación es un factor importante para obtener una mejor recuperación y ley de mineral (%Cu) en una empresa minera de tamaño pequeño.
- Y la segunda es, hay factores de fácil manipulación que son relevantes para mejorar la recuperación en la flotación de cobre.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abordarán los conceptos necesarios que permitan la correcta comprensión del contexto del trabajo. Su división se realizará de la siguiente forma: Primero se abordará el sector minería en el Perú, explicando su situación actual. Segundo, se explicarán los procesos de obtención del concentrado de cobre en la actualidad. Por último, se dará a conocer los conceptos de ingeniería industrial relacionados al sistema productivo de una empresa.

2.1. Sector minería en el Perú

Según lo explicado en el informe del sector minero publicado por BBVA Research (2020), la producción minera peruana se contrajo en el año 2019 hasta en un 20% respecto a 2016. Sin embargo, la inversión del sector se mantuvo a un fuerte ritmo de expansión. Gracias a ello es que se esperaba que para el 2020 la producción incrementara un 4% respecto al año anterior. Sobre todo, impulsada por la ampliación de la mina de Toquepala (cobre) y la ampliación de la unidad minera de Marcona (hierro). Dentro de este sector, según Informe Económico trimestral (INEI, 2018) uno de los subsectores más importantes es la minería metálica pues representa el 84.64% de participación. Dentro de este componente, la producción de cobre es la que más participación posee con un 30.16%. Es por ello que este mineral posee un 72% del total de la cartera de proyectos de inversión minera.

2.2. Proceso productivo de concentrado

Como se indicó en la introducción de la investigación, los sulfuros de cobre son los de mayor abundancia en el mundo, por lo que se explicará el proceso para obtener concentrado de cobre a partir de sulfuros de cobre, según la información recopilada de CODELCO (2019).

El proceso usado por las plantas de beneficio se divide en 4 etapas: Chancado, molienda, flotación y espesamiento y filtrado.

2.2.1. Chancado

Esta operación es realizada en dos etapas, para ello se elaboró la Figura 1. En la primera, denominada chancado primario, se reduce el diámetro del mineral hasta 5/2 in, en la segunda, chancado secundario, se reduce el diámetro hasta 1/2 in. Culminada esta operación, el mineral se dirige a la molienda.

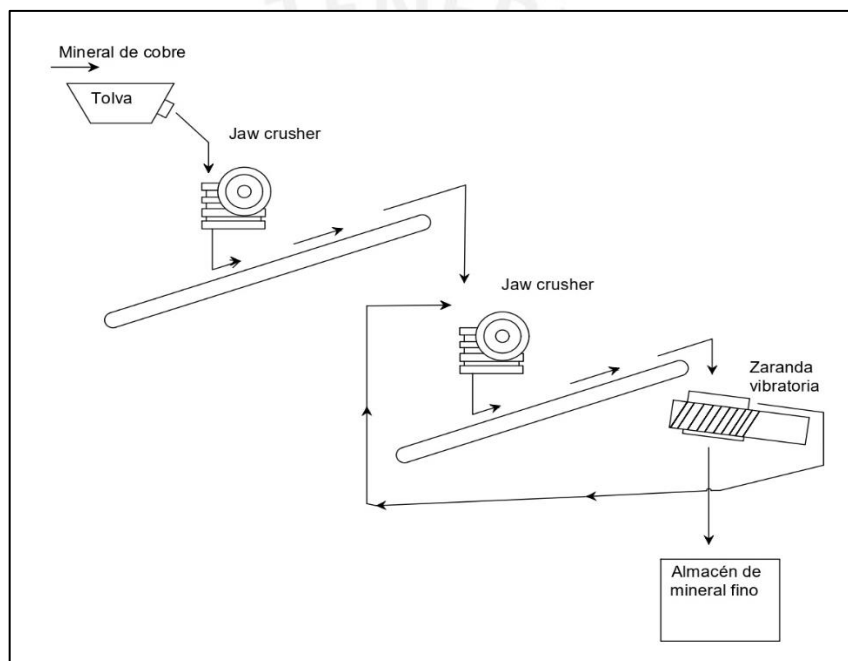


Figura 1. Circuito de chancado

2.2.2. Molienda

En esta operación el mineral “chancado” es triturado hasta conseguir un diámetro de hasta 0.15mm. En la actualidad existen tres modos para la molienda: Molienda SAG, de barras y de bolas. Usualmente, en pequeñas empresas, se usan molinos de bolas debido a su bajo costo. La Figura 2, elaborada previamente, muestra la distribución del circuito normalmente usado.

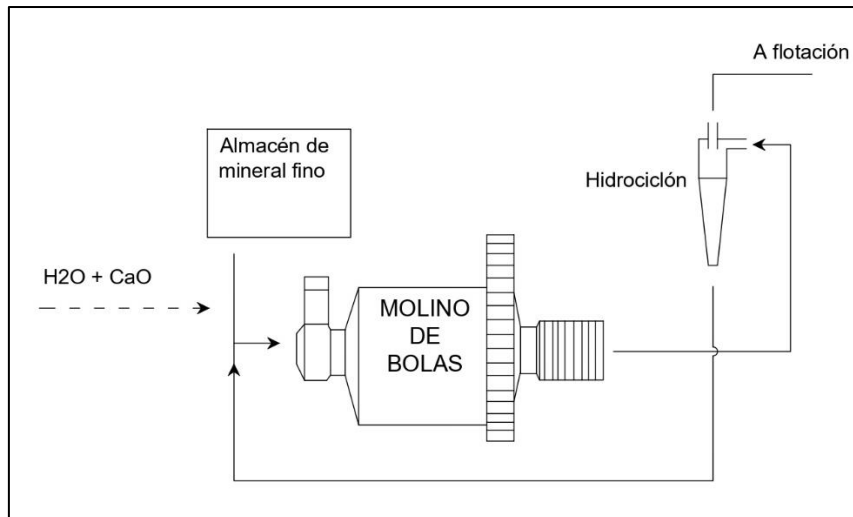


Figura 2. Circuito de molienda

2.2.3. Flotación

Llegada esta fase, el mineral es ingresado a un conjunto de celdas de flotación las cuales, según el reactivo añadido, pueden ser denominadas como: Rougher, Scavenger y Cleaner. Estos reactivos añadidos pueden clasificarse en colectores, depresores y modificadores. Según se requiere, en cada celda, se añaden reactivos para poder separar el producto final de la escoria u otros minerales. La Figura 3 fue elaborada para el caso y representa el proceso descrito.

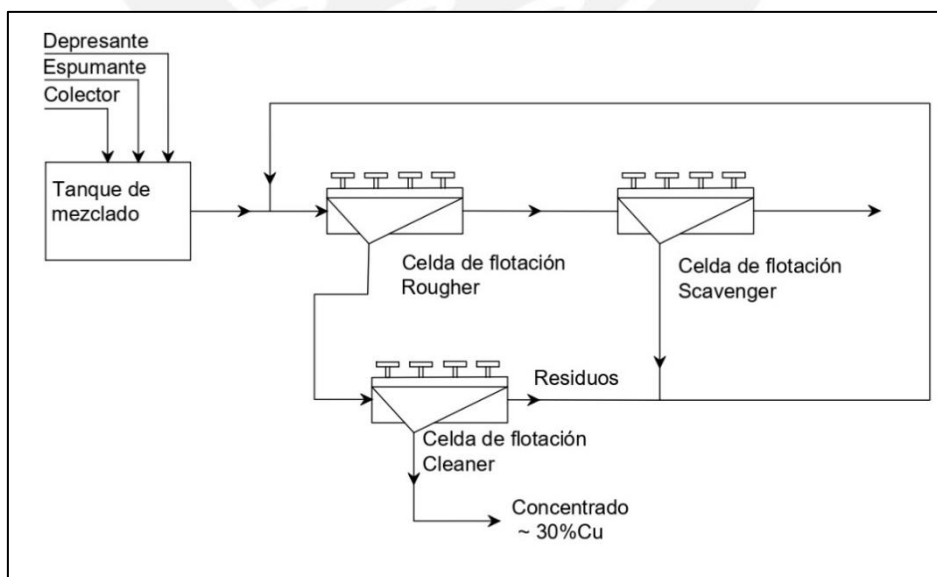


Figura 3. Circuito de Flotación

2.2.4. Espesamiento y filtrado.

Esta es la última etapa en la planta, aquí se elimina el exceso de humedad del concentrado mediante un espesado convencional y filtrado en filtros de prensa. De esta operación, se obtiene finalmente un aproximado del 30% de pureza de cobre con una humedad aproximada del 10%. Para esquematizar lo mencionado anteriormente, se elaboró la Figura 4.

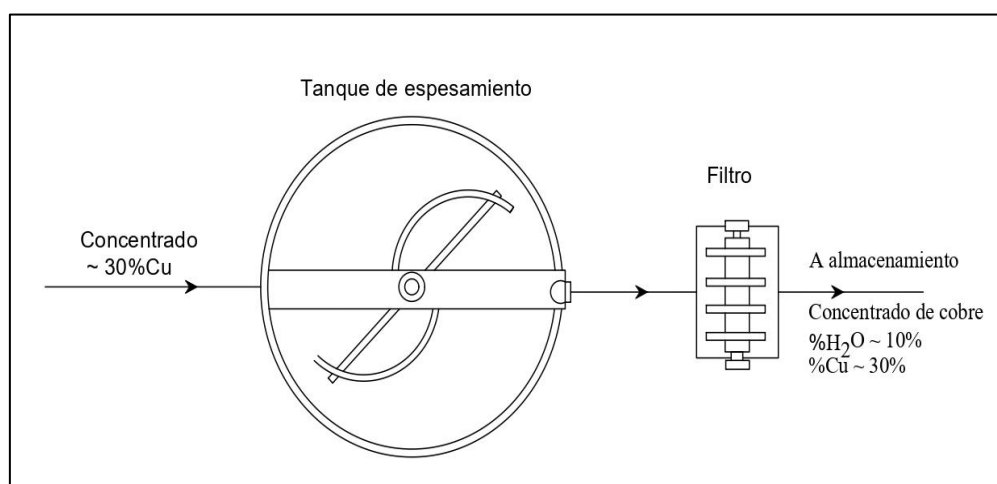


Figura 4. Circuito de Espesamiento y filtrado

2.3. Capacidad

Se entiende capacidad como la relación existente entre el volumen producido, almacenado, etc. y el tiempo. En una planta productiva podemos identificar tres versiones de capacidad: Diseño, instalada y real. (A, Barrera, comunicación personal, 6 de abril de 2018)

- **Capacidad de diseño**

Es el nivel máximo de producción que una planta puede alcanzar considerando condiciones operativas ideales.

- **Capacidad instalada**

Es la cantidad de producción que la planta puede llegar, tomando en consideración las restricciones de tiempo, es decir, días y turnos de trabajo.

- **Capacidad real**

Es una fracción de la capacidad instalada, principalmente añadiendo reducciones en la producción ocurridas por situaciones como paradas de planta o tiempos muertos.

2.4. Indicadores de producción

Los indicadores de producción son importantes al momento de analizar los procesos porque nos permiten cuantificar su desempeño actual (Krajewski, L., Ritzman, L., y Malhotra, M., 2008). Existen diferentes tipos de indicadores en cuanto a producción se refiere, sin embargo, esta investigación se apoyará en dos: *Throughput*, eficiencia y utilización.

- ***Throughput***

El *Throughput*, según Hennel, P. (2014), es la cantidad de unidades por unidad de tiempo en la que una máquina u operación produce.

- **Eficiencia**

En temas de producción en una planta, se puede medir como la relación entre capacidad real y la instalada. Esto nos daría un acercamiento a qué tanto de máxima capacidad se ha utilizado.

- **Utilización**

Cuando hablamos de utilización en la planta nos referimos a la relación existente entre la capacidad real y la capacidad de diseño, esto nos informaría que tanto de la máxima capacidad estamos usando con la gestión de recursos actual

CAPÍTULO 3. INVESTIGACIONES PREVIAS

En este capítulo se recogerán seis investigaciones que permitan poder abordar el tema de la investigación y se presentarán con una breve explicación de cada una, en tablas elaboradas previamente. Luego, se seleccionarán variables o puntos importantes de cada una, con el objetivo de responder a las hipótesis planteadas.

3.1. Caso 1

En la Tabla 1, se muestra la información de una investigación que se realizó en China, para identificar los efectos que producen los distintos tamaños de partículas en la recuperación de minerales. En la Tabla 2 se presentan sus resultados.

Tabla 1. Caso de investigación realizada en China sobre la eficiencia en la flotación

Título	<i>Effects of particle size on flotation performance in the separation of copper, gold and lead</i>
Institución	Kunming University of Science and Technology
Presentada por	Ran, J.-c., Qiu, X.-y., Hu, Z., Liu, Q.-j., Song, B.-x. y Yao, Y.-q. (2018).
Objetivo del Estudio	
<i>“Investigar el efecto del tamaño de las partículas en el rendimiento del proceso de flotación en la separación de cobre, oro y plomo.”</i>	
Metodología de Implementación	
Para el desarrollo de la presente investigación se realizaron los siguientes pasos: <ul style="list-style-type: none">- Recolección de muestras de minerales- Identificar los reactivos a utilizar ($K_2Cr_2O_7$, DDTC y MIBC)- Clasificación de las pruebas- Pruebas de flotación- Cálculo de la cinética de flotación- Análisis de las curvas de evolución de Fuerstenau	

Fuente: (Ran, J.-c. et al, 2018)

Tabla 2. Resultados del caso 1

Resultados
<ul style="list-style-type: none"> - Las pruebas dieron como resultado que la acumulación de recuperación de cobre, oro y plomo presentaron un alto valor inicial, sin embargo, a mediados que se incrementaba el tamaño de las partículas, este fue decayendo. - Por último, los resultados para el cobre dieron que la máxima recuperación de cobre fue obtenida en el tamaño de $-74 + 58\mu\text{m}$ con un 89.34%, seguido de $-43 + 20\mu\text{m}$ y $-58 + 43 \mu\text{m}$.

Fuente: (Ran, J.-c. et al, 2018)

Características generales:

Para objetivo de esta investigación, la muestra utilizada contenía en su mayoría minerales de calcopirita, galena, piritita y esfalerita. Por otro lado, su composición se dividía en: un 15.67% de cobre, 43.69% de plomo, 0.44% de zinc, 21.38% de azufre además de 45.57g/t de oro. Por otro lado, la investigación fue llevada a cabo en un laboratorio que replica las condiciones obtenidas en una planta de concentración real. Para el análisis, se utilizaron 6 diferentes modelos que grafican la cinética de flotación donde las principales variables a controlar (independientes) fueron el tiempo de flotación y el tamaño de las partículas.

Aplicaciones:

Las plantas de concentración de cobre, dedicadas a sulfuros, procesan en su mayoría calcopirita, calcocita y covelita, sin embargo, a menudo se presenta oro y plata que se asocian a los sulfuros mencionados (DANAFLOAT, s.f.). Por ello esta investigación se encargó de analizar el último caso (sulfuros con oro presente) y utilizando mecanismos relacionados a la flotación de minerales de este tipo. Por tanto, este artículo es válido si se considera como *input* a una carga de mineral que contenga oro disperso en los minerales principales (calcopirita y galena) de forma micro-granular incrustada en estas. Por el lado de las variables que fueron controladas, tiempo de flotación y tamaño de partículas, estas son fáciles de manejar en todas

las plantas de concentración. La primera, incrementando el tiempo de residencia de los minerales en las celdas y la segunda, incrementando el tiempo de molienda.

3.2.Caso 2

En la Tabla 3, se muestra la información de una investigación que se realizó en Turquía, para identificar las razones de las pérdidas de cobre en los relaves y de la dilución de cobre en el concentrado final. En la Tabla 4 se presentarán los resultados.

Tabla 3. Caso de investigación realizada en Turquía sobre las razones de pérdida de cobre en la concentración

Título	<i>Influence of process mineralogy on improving metallurgical performance of a flotation plant</i>
Institución	Hacettepe University
Presentada por	Celik, B., Can, M. y Sherazadishvili, J. (2011)
Objetivo del Estudio	
<i>“Identificar las razones de la dilución de cobre al final del concentrado y la perdida de cobre en los relaves.”</i>	
Metodología de Implementación	
Para el desarrollo de la presente investigación se realizaron los siguientes pasos:	
<ul style="list-style-type: none"> - Recolección de muestras de minerales - Balanceo de masa de los procesos de flotación y conminución - Estudios de mineralogía cuantitativa - Pruebas de flotación en lotes 	

Fuente: (Celik, B. et al, 2011)

Tabla 4. Resultados del caso 2

Resultados
<ul style="list-style-type: none"> - El grado de liberación máximo se obtuvo para las partículas entre el rango +0.020 0.044mm, sin embargo, al mismo tiempo se obtuvo altas cantidades de contaminantes (pirita). - En el reproceso de los lodos resultantes de las celdas de flotación, se demostró que incrementando el tiempo de residencia y añadiendo mayores cantidades del colector, se puede incrementar la recuperación de cobre.

Fuente: (Celik, B. et al, 2011)

Características generales:

En esta investigación se utilizaron diferentes minerales que contienen cobre, entre ellos se tienen: Calcopirita, calcocita y covelita. Por el lado de las pruebas de flotación, estas se dieron en un medio con pH de 12 y se elaboraron en un circuito con 2 *Rougher*, 1 *Scavenger* y 2 *Cleaner*. Además, el análisis se realizó con muestras tomadas de cada una de las salidas de relaves y las salidas de concentrado de cada una de las estaciones, incluyendo al concentrado final. Por último, las variables modificadas a lo largo de esta investigación fueron: el tiempo de residencia, el tamaño de las partículas y la cantidad aplicada de sustancias colectoras.

Aplicaciones:

Los autores realizaron la investigación con un circuito diseñado para una planta concentradora de altas capacidades como es la JSC Madneuli Copper Plant. Sin embargo, es posible replicar los resultados en una planta pequeña que procesa minerales con características similares a las utilizadas en el caso de estudio, debido a que el *flowsheet* de las celdas de concentración que se utilizó (Figura 5) es similar en orden más no en cantidad de las que se utiliza en la minería pequeña (Figura 6), lo cual permite la obtención de resultados similares en los concentrados al modificar las variables mencionadas anteriormente.

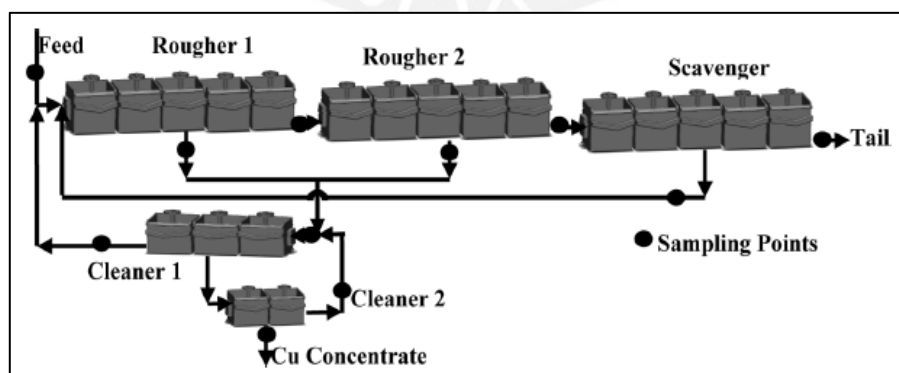


Figura 5. Circuito de flotación usado en el caso 2

Tomado de "Influence of process mineralogy on improving metallurgical performance of a flotation plant" por Celik, B. et al, 2011

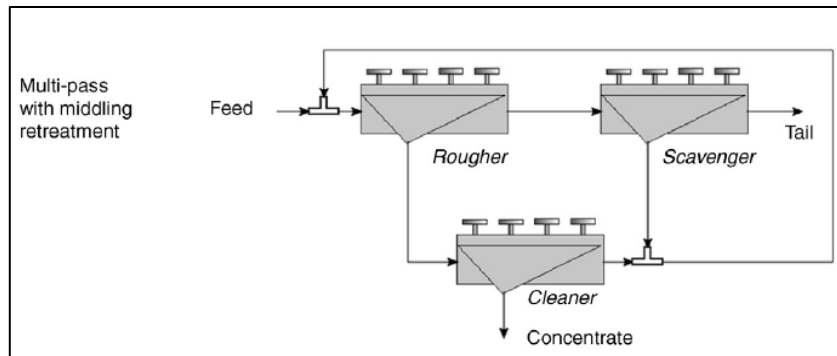


Figura 6. Modelo de circuito para diferentes tamaños de minería

Tomado de “*Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*” por A. Gupta y DS. Yan, 2016

3.3.Caso 3

En la Tabla 5, se muestra la información de una investigación que se realizó en Brasil para corroborar la existencia de efectos en la flotación causados por el medio de la molienda.

En la

Tabla 6 se presentarán los resultados.

Tabla 5. Caso de investigación realizado en Brasil

Título	<i>The effect of grinding conditions on the flotation of a sulphide copper ore</i>
Institución	<i>Universidade Federal de Minas Gerais y Companhia Vale do Rio Doce</i>
Presentada por	Gonçalves, K.L.C, Andrade, V.L.L. y Peres, A.E.C. (2003).
Objetivo del Estudio	
<i>“Determinar la existencia de efectos en la flotación ocasionados por medio utilizado en la molienda.”</i>	
Metodología de Implementación	
<p>Para el desarrollo de la presente investigación se realizaron los siguientes pasos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Recepción y análisis de muestra de minerales, proporcionada por CVRD - Selección de reactivos a utilizar - Análisis de distribución de tamaños post molienda - Análisis de recuperación de cobre vs ley de cobre en diferentes medios de molienda 	

Fuente: (Gonçalves, K. et al, 2003)

Tabla 6. Resultados del caso 3

Resultados
<ul style="list-style-type: none">- En base a los análisis realizados, se determinó que el medio de molienda afecta significativamente en el rendimiento de la flotación, siendo el medio con mejor recuperación, la molienda con rodillos de acero inoxidable, seguido de bolas de molienda de cerámica, principalmente por brindar un medio ideal (medio oxidante) para la acción del agente colector (Xantato).

Fuente: (Gonçalves, K. et al, 2003)

Características generales:

Para fines de esta evaluación, la muestra inicial se dividió en 4. Cada una de estas fueron procesadas en un medio diferente de molienda (rodillos de acero inoxidable, bolas de acero al carbono, rodillos de acero al carbono y bolas de molienda de cerámica), con tiempos diferentes de molienda, con el objetivo de obtener tamaños de partículas similares de tal forma que este factor no afecte al rendimiento de la flotación. Luego, se evaluaron los potenciales de oxidación de cada una de las muestras, para determinar qué medio brindó un mejor escenario para la posterior oxidación de los xantatos.

Aplicaciones:

Los resultados de este estudio son importantes dado que se comprueba que los minerales presentan comportamientos distintos dependiendo de la exposición a la que se encuentre, sobre todo la calcocita, bornita y digenita, los cuales fueron los minerales de este estudio. Además, incentiva a que las empresas lleven a cabo investigaciones sobre los minerales que procesan, de tal forma que puedan incrementar la recuperación de cobre, con cambios que afecten sólo a la molienda, generando un ambiente favorable para obtener el más alto rendimiento en la flotación. Para ello se debe monitorear el potencial de reducción en los lodos, considerando

que, a mayor valor, mejor es el comportamiento de los minerales en la flotación debido a la acción de los Xantatos.

3.4. Caso 4

En la Tabla 7, se muestra la información de una investigación realizada para la *Journal of Cleaner Production*, para determinar la relación entre la estabilidad de la flotación y el tamaño de las partículas.

Características generales:

En esta investigación los autores utilizaron tres diferentes muestras de lodos de las celdas de flotación, con un % de cobre inicial de 0.27, 0.27 y 0.32 cada una. Además de tres diferentes tamaños de partículas para cada tipo de muestra. Se modificaron variables como la velocidad superficial del aire en las celdas de flotación y el tamaño de las partículas. Por otro lado, se utilizó la recuperación del aire de las celdas de flotación como indicador de la estabilidad de la flotación. La última mencionada, sirve para determinar la respuesta (recuperación) de la flotación de acuerdo con las condiciones presentadas.

Tabla 7. Caso de investigación realizada para *Journal of Cleaner Production*

Título	<i>The link between particle size and froth stability - Implications for reprocessing of flotation tailings</i>
Institución	University College London & Pontificia Universidad Católica de Chile
Presentada por	Mackay, I., Videla, A. y Brito-Parada, P. (2019)
Objetivo del Estudio	
<i>“Determinar el efecto que tienen las partículas finas en la estabilidad del proceso de flotación.”</i>	
Metodología de Implementación	
Para el desarrollo de la presente investigación se realizaron los siguientes pasos:	
<ul style="list-style-type: none"> - Recolección de muestra de materiales - Experimento en celda de flotación que rebose continuo - Análisis de las pruebas 	
Resultados	

- Se determinó que existen dos factores que tienen efectos significativos en la flotación para la recuperación de cobre a partir del reproceso de los lodos de las celdas, la velocidad de aire y el tamaño de las partículas que alimenta las celdas, para partículas con tamaño menor a 220 μm .

Fuente: (Mackay, I. et al, 2019)

Aplicaciones:

Esta investigación investigó los efectos del tamaño de las partículas, la velocidad superficial de los gases en el rendimiento de la flotación de los minerales presentes en los relaves de cobre. Con ello, se demostró que la manipulación de estas variables brinda mejores valores de recuperación en la flotación. De esta forma, se promueve la investigación con mayor profundidad de las condiciones de operación para el reproceso de los relaves y de esta forma disminuir el impacto ambiental. En base a lo mencionado, los beneficios que trae este tipo de reprocesos son favorables cuando se requiere incrementar la recuperación del mineral, sin embargo, este tipo de reprocesos involucran una inversión elevada por lo que se entiende que sólo medianas y grandes empresas pueden aplicarlos.

3.5. Caso 5

Este caso de estudio fue realizado para corroborar la existencia de efectos en el rendimiento de la flotación ocasionados por el tipo de medio en la molienda, bolas de hierro fundido (CIB) o bolas de cerámica (CB). Los resultados y la metodología están presentados en la Características generales:

Para este estudio los autores utilizaron una muestra de calcopirita cuya composición se muestra en la Tabla 9. La molienda del mineral se realizó en un laboratorio, utilizando un molino vertical, de capacidad 200 mL y agua desionizada. La medida de partícula alcanzada en este proceso de molienda fue en promedio 74 μm . Luego, las pulpas obtenidas fueron divididas en 6 diferentes muestras para los posteriores análisis. La flotación se realizó en un

equipo de laboratorio de capacidad 100 mL y también se utilizó agua desionizada. Por último, los productos de flotación fueron secados a baja temperatura y pesados para calcular la recuperación del mineral.

Tabla 8.

Características generales:

Para este estudio los autores utilizaron una muestra de calcopirita cuya composición se muestra en la Tabla 9. La molienda del mineral se realizó en un laboratorio, utilizando un molino vertical, de capacidad 200 mL y agua desionizada. La medida de partícula alcanzada en este proceso de molienda fue en promedio 74 μm . Luego, las pulpas obtenidas fueron divididas en 6 diferentes muestras para los posteriores análisis. La flotación se realizó en un equipo de laboratorio de capacidad 100 mL y también se utilizó agua desionizada. Por último, los productos de flotación fueron secados a baja temperatura y pesados para calcular la recuperación del mineral.

Tabla 8. Caso de investigación sobre los efectos del medio de la molienda en el rendimiento de la flotación

Título	<i>Effects of grinding media on grinding products and flotation performance of chalcopyrite</i>
Institución	Northeastern University, Michigan Technological University,
Presentada por	Zhang, X., Han, H., Gao, P. y Li, Y. (2019)
Objetivo del Estudio	
<i>“Investigar las influencias del medio en la molienda (CB o CIB) en el proceso de flotación siguiente”</i>	
Metodología de Implementación	

Para el desarrollo de la presente investigación se realizaron los siguientes pasos:

- Recolección de materiales (muestra, reactivos y medio de molienda)
- Elección del tipo de molienda y flotación
- Análisis de la distribución de tamaño de partículas
- Análisis de las propiedades químicas de la pulpa
- Morfología de las superficies
- Medición del ángulo de contacto
- Medición del potencial Z

Resultados

- Se identificó que en el medio con CB la recuperación es 16% mayor que en el caso con CIB.
- En el medio CB la superficie post molienda de la calcopirita presentó más suavidad y menos corrosión lo cual mejoró significativamente su hidrofobia.

Fuente: (Zhang, X. et al, 2019)

Tabla 9. Composición de la muestra empleada en el Caso 5

	Cu	S	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
Contenido %	32.56	31.9	28.71	4.51	0.79	0.94

Fuente: (Zhang, X. et al, 2019)

Aplicaciones:

En este caso de investigación, se analizaron diferentes medios de molienda y se analizó su efecto en el rendimiento de la flotación de la calcopirita. Resultado de esta investigación, se demostró que existe una interacción del medio de molienda pues aquellos materiales inertes, brindan un ambiente favorable para la acción de los reactivos, es decir, que las bolas de molienda fabricadas de cerámica favorecen a la flotación de mejor forma que las de hierro fundido. Esto nos lleva a pensar en un escenario donde las empresas deben optar por el cambio hacia este tipo de tecnología pues incrementa la recuperación del mineral entre otros beneficios. Como se puede ver en la Figura 7, es notoria la brecha existente entre un material y otro, siendo consistente desde la nula aplicación de un reactivo hasta la utilización en altas cantidades.

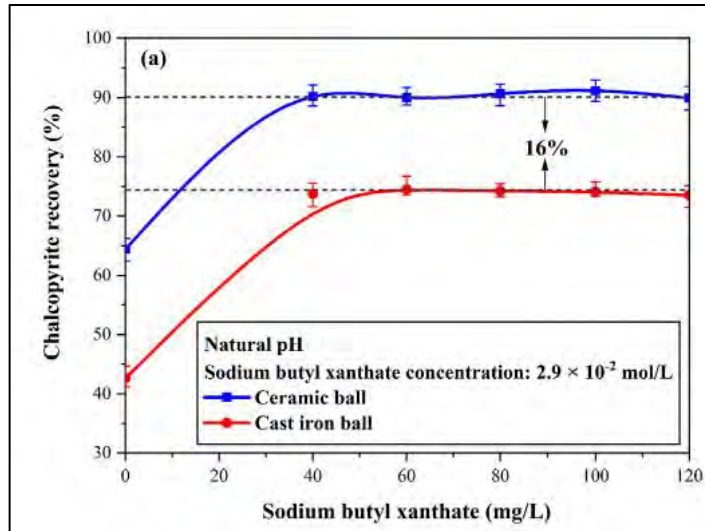


Figura 7. Rendimiento de la flotación de la calcopirita a diferentes niveles de reactivo

Tomado de “*Effects of grinding media on grinding products and flotation performance of chalcopyrite*” por

Zhang, X. et al, 2019

3.6. Caso 6

Esta investigación fue realizada con el objetivo de determinar si se presenta un efecto en el rendimiento de la flotación, ocasionado por la adición un agente colector antes o después de la molienda. Los métodos de estudios y resultados serán presentados en la Los experimentos fueron realizados a escala de laboratorio, de tal forma que se pueda simular las condiciones reales, por lo que se utilizó un molino y bolas del molino hechas de acero de bajo carbono. Por último, se dividió la muestra en 2 para poder llevar a cabo dos circuitos diferentes. El primero tuvo la siguiente secuencia: adición del colector antes de la etapa de molienda, 3 minutos de molienda, 3 minutos de mezcla y 3 minutos de flotación. En el segundo la secuencia fue: 3 minutos de molienda, adición del colector, 3 minutos de mezcla y 3 minutos de flotación.

Tabla 10.

Características generales:

Las muestras de minerales que se tomaron fueron principalmente calcopirita. Fue escogida a mano y luego procesada hasta obtener un tamaño de partícula de +0.074 – 0.5mm.

La composición de esta muestra se observa en la Tabla 11. Se utilizó insumos específicos, como colector, el butil xantato de sodio (SBX) y, como regulador de pH, soda caustica (NaOH). Los experimentos fueron realizados a escala de laboratorio, de tal forma que se pueda simular las condiciones reales, por lo que se utilizó un molino y bolas del molino hechas de acero de bajo carbono. Por último, se dividió la muestra en 2 para poder llevar a cabo dos circuitos diferentes. El primero tuvo la siguiente secuencia: adición del colector antes de la etapa de molienda, 3 minutos de molienda, 3 minutos de mezcla y 3 minutos de flotación. En el segundo la secuencia fue: 3 minutos de molienda, adición del colector, 3 minutos de mezcla y 3 minutos de flotación.

Tabla 10. Investigación sobre el efecto ocasionado por la adición de un colector pre y post molienda

Título	<i>Flotation performances and surface properties of chalcopyrite with xanthate collector added before and after grinding</i>
Institución	Wuhan University of Technology, China
Presentada por	Peng, H., Wu, D. y Abdelmonem, M. (2017)
Objetivo del Estudio	
<i>“Determinar el efecto ocasionado en la flotación debido a la adición de xantatos antes o después de la molienda.”</i>	
Metodología de Implementación	
<p>Para el desarrollo de la presente investigación se realizaron los siguientes pasos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Recolección de muestra de minerales (otorgados por Wushan Copper Mine) - Pruebas de molienda y flotación - Medidas del potencial de la pulpa - Análisis del tamaño de las partículas - Análisis XPS 	
Resultados	

- Los resultados del rendimiento de la flotación mostraron que la adición de un agente colector, previo a la molienda, favorece el rendimiento, siendo considerablemente mejor. Además, se confirma la existencia de un efecto ocasionado por el tamaño de las partículas en la flotación resultando, para tamaños menores a 20 μm , en un decaimiento en la recuperación.
- En la muestra utilizada, se demuestra que la mejor recuperación se obtiene para tamaño de partículas cercanas a 35 μm .

Fuente: (Peng, H. et al, 2017)

Tabla 11. Composición de la muestra empleada en el Caso 6

	Cu	Fe	S	SiO ₂
Contenido %	32.02	29.13	33.16	3.63

Fuente: (Peng, H. et al, 2017)

Aplicaciones:

En investigaciones previas se demostró que existe un efecto favorable para el medio en la flotación al utilizar bolas de molienda de un material inerte como la cerámica, sin embargo, existen otras formas de obtener ese dicho efecto, tales como la aplicación de los reactivos colectores antes de la molienda, esta opción es económicamente más factible que la anterior y también presenta resultados favorables como la mejora del rendimiento de la flotación, debido a que permite incrementar las capacidades de adsorción de los reactivos. La factibilidad mencionada es atribuida a su facilidad de implementación pues involucra un cambio en el punto de aplicación (antes de la molienda) en los circuitos no automatizados. Cabe resaltar que estos resultados fueron obtenidos en una muestra compuesta principalmente de calcopirita, por lo que la efectividad puede variar dependiendo el mineral. No obstante, queda demostrado la existencia de dicho efecto en el proceso.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de las investigaciones previas. Para ello se seleccionarán aquellas variables que sean críticas que permitan validar o rechazar las hipótesis planteadas. Luego, se realizará una comparación de las variables para desarrollar de manera más comprensible qué es lo que significan estas y el porqué de dichos resultados.

Presentación y comparación de resultados

Para poder presentar conclusiones sobre los factores que afectan el rendimiento en la flotación de sulfuros de cobre, es relevante la comprensión de los resultados que las investigaciones previas recolectadas muestran sobre las variables a analizar. Esta se realizará con la ayuda de una matriz cruzada donde en el eje vertical se presentarán las variables y en el eje horizontal los casos de estudio. Además, las variables presentadas en la Tabla 12, elaborada previamente, cumplen con el criterio de que estas puedan ser aplicadas directamente en empresas mineras de tamaño pequeño o cuyo efecto pueda ser replicado con facilidad, debido a la naturaleza de esta investigación.

Tabla 12. Comparación de variables analizadas por cada caso

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Tamaño de partículas	✓	✓		✓		✓
Tiempo de residencia en la flotación		✓				
Adición de colector antes de la molienda						✓
Medio de molienda			✓		✓	
Velocidad de aire en las celdas de flotación				✓		

De acuerdo con la tabla de resultados, se observa que, en cuatro de los seis casos de estudio consultados (Caso 1, Caso 2, Caso 4 y Caso 6), el tamaño de las partículas de los minerales que se procesan en la flotación es relevante cuando se quiere obtener una alta ley o recuperación del mineral. El tamaño de partículas se refiere al diámetro que presentan las partículas del mineral a procesar.

- A) En el Caso 1, se estudió una muestra que contenía principalmente calcopirita y galena, y se obtuvo que la máxima recuperación de cobre (89.34%) se daba para los tamaños comprendidos entre $-74 + 58\mu\text{m}$, siendo el rango mencionado uno intermedio entre ultrafino y grueso.
- B) En el Caso 2, la muestra utilizada presentó altos valores de silicatos y se encontraron altos valores de recuperación en la flotación de partículas de tamaño entre $-44 + 20\mu\text{m}$, este rango fue el de características más pequeñas y el resultado se debe a factores vinculados a la conminución del mineral, pues se esperaba que el rango intermedio sea el de mayor recuperación.
- C) En el Caso 4, se estudiaron diferentes lodos obtenidos de las celdas de flotación, si bien el estudio está basado en un reproceso de minerales, el autor analizó las características de la flotación, indicando que las distribuciones del tamaño de partícula en las celdas influyen en la estabilidad óptima de la flotación, lo que se traduce en una mejor recuperación de cobre.
- D) En el Caso 6, el mineral estudiado fue principalmente calcopirita. En este estudio se encontró que el mejor tamaño de partícula para la flotación fue cercano a $35\mu\text{m}$.

El segundo factor relevante encontrado, según los casos 3 y 5, es el medio de la molienda. Este se refiere al material del cual este fabricado el molino, los rodillos o las bolas de molienda, según sea el tipo de molino. En el mercado existen diferentes materiales de

fabricación para los rodillos y las bolas de molienda, sin embargo, se encontró que los fabricados a base de cerámica y a base de acero inoxidable fueron los que mejores resultados presentaron, en comparación con aquellos fabricados de acero al carbono o de hierro fundido.

A) En el caso 3, se analizaron cuatro materiales diferentes para la molienda y se determinó que los mejores fueron el de rodillos de acero inoxidable y de bolas de molienda de cerámica, debido a que proporcionaron un ambiente propicio para la oxidación de los agentes colectores, y con ellos una mejor flotabilidad, según los autores.

B) En el caso 5, la mejor recuperación de calcopirita se obtuvo con las bolas de molienda de cerámica debido a que en dicho medio el punto isoeléctrico es menor.

Por último, existen otras variables operativas cuya influencia en el resultado al momento de calcular la recuperación y ley de los minerales ha sido demostrada. Entre ellas se encuentran el tiempo de residencia en la flotación, es decir, el tiempo que permanece el mineral en las celdas de flotación en acción de los reactivos, y la velocidad del aire en las celdas de flotación.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

A lo largo de esta investigación se recogieron diferentes fuentes de información relacionadas al rendimiento del proceso de flotación, principalmente se buscó información que permita analizar diferentes variables que afectan a dicho proceso. El estudio se concentró en seleccionar variables que puedan ser controladas en empresas de tamaño pequeño.

Los casos recogidos presentaron diferentes variables de las cuales fueron dos, tamaño de partículas y medio de molienda, las que tuvieron mayor relevancia. Esto se debe a que en ambos casos los resultados de recuperación y de ley de mineral fueron altos.

Respecto al tamaño de partículas, los autores afirman que existe un efecto ocasionado por dicha variable, sin embargo, en cada uno de los estudios se encuentran diferentes valores óptimos, esto se debe principalmente a que las muestras utilizadas en cada caso presentan características diferentes como su composición mineralógica y diferencias en los circuitos utilizados para las pruebas. No obstante, de los estudios analizados se puede resaltar que en toda planta es de suma importancia realizar un estudio previo del tipo de mineral que se está procesando, esto con el objetivo de calcular el rango óptimo para las partículas a que serán enviadas hacia el circuito de flotación.

Por el lado del medio de molienda, los casos de estudio recogidos concuerdan en que el mejor medio para dicho proceso es aquel que proporciona un ambiente oxidante en la pulpa, de esta forma, mejora el funcionamiento de los agentes colectores y se obtiene una mejor recuperación de cobre. Este medio es proporcionado por dos diferentes tipos de molinos: Molino de barras de acero inoxidable y molino de bolas de molienda de cerámica. Frente a estas opciones, una pequeña planta concentradora puede escoger entre ambas, dependiendo de su capacidad adquisitiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BBVA Research. (2020). Sector Minero Evolución reciente y perspectivas de corto plazo. https://www.bbvarsearch.com/wp-content/uploads/2020/01/2029_01_07-Per%C3%BA.SectorMi nero-2020-2.pdf
- Celik, B., Can, M. y Sherazadishvili, J. (2011). Influence of process mineralogy on improving metallurgical performance of a flotation plant. *Mineral Processing & Extratctive Metall.*, 32, 30-46. doi: 10.1080/08827508.2010.509678
- Chase, R., Jacobs, R. y Aquilano, N. (2009). *Administración de operaciones. producción y cadena de suministros (12da. ed.)*, México DF, México: Mc. Graw Hill
- COCHILCO. (2017). Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades. https://www.cochilco.cl/Listado%20Tematico/sulfuros%20primarios_desaf%3ADos%20y%20oportunidades.pdf
- CODELCO. (2019). Flotación “Burbujas de cobre”. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005132/flotacion_media_t_cnico_060119.pdf
- CODELCO. (2019). Molienda “Todo a la juguera”. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005343/molienda_media_t_cnico_060119.pdf
- CODELCO. (2019). Chancado “Reduciendo la roca”. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004934/chancado_media_t_cnico_060119.pdf
- DANAFLOAT. (s.f). MINING Minerales de cobre. http://www.danafloat.com/_literature_39431/ES_Mining_ores_-_cobber
- Corvo H. (Sin fecha). Indicadores de Producción: Principales Indicadores y Ejemplos. <https://www.lifeder.com/indicadores-produccion/>
- Gonçalves, K.L.C., Andrade V.L.L. y Peres A.E.C. (2003). The effect of grinding contidions on the flotation of a sulphide copper ore. *Minerals Engineering*, 16, 1213-1216. doi: 10.1016/j.mineng.2003.05.006
- Gupta A. y Yan D. (2016) *Mineral processing and operations: an introduction* (2da. ed.). doi: 10.1016/C2014-0-01236-1
- Hennel, P. (2014). Manufacturing Metrics that Matter the Most: A Comprehensive Checklist. Lugar de publicación: CERASIS. <https://cerasis.com/manufacturing-metrics/>
- INEI. (2018). Perú: Informe económico Trimestral IV trimestre 2018. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1649/libro.pdf
- Krajewski, L., Ritzman, L., y Malhotra, M. (2008). *Administración de operaciones* (8va. ed.). México DF, México: PEARSON EDUCACIÓN

- Mackay, I., Videla, A. y Brito-Parada, P. (2019). The link between particle size and froth stability – Implications for reprocessing of flotation tailings. *Journal of Cleaner Production*, 242. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118436
- Peng, H., Wu, D. y Abdelmonem, M. (2017). Flotation performances and surface properties of chalcopyrite with xanthate collector added before and after grinding. *Results in Physics*, 7. 3567-3573. doi: 10.1016/j.rinp.2017.09.028
- Ran, J.-c., Qiu, X.-y., Hu, Z., Liu, Q.-j., Song, B.-x. y Yao, Y.-q. (2018). Effects of particle size on flotation performance in the separation of copper, gold and lead. *Powder Technology*, 344, 654-664. doi: 10.1016/j.powtec.2018.12.045
- Zhang, X., Han, H., Gao, P. y Li, Y. (2019). Effects of grinding media on grinding products and flotation performance of chalcopyrite. *Minerals Engineering*, 145. doi: 10.1016/j.mineng.2019.106070

