



Facultad de Ingeniería y Computación

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**“ANÁLISIS DEL CONTROL DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DEL
PROCESO DE FLOTACIÓN DEL COBRE”**

Trabajo de investigación presentado por alumnos de la Escuela
Profesional de Ingeniería Industrial:

GEORGE HERWER SUAREZ PINEDA

PAUL JAVIER VILCA TACO

Para obtener el grado académico de Bachiller en Ingeniería
Industrial

Asesor: Mg. Pascual Heradio Adriazola Corrales

AREQUIPA, 2020.



RESUMEN

El Perú es el segundo país en el mundo productor de cobre, generando desarrollo y trabajo con aportaciones relevantes al PBI. Esta actividad funciona por las fases de exploración, descubrimiento, desarrollo y producción. La gran minería dedicada a la extracción de cobre utiliza dos tipos de procesos denominados concentración y lixiviación. La presente investigación está dirigida al proceso de concentración que se utiliza para extraer cobre de los minerales sulfurados. Se aborda un proceso específico: flotación. La finalidad del proceso, es obtener la mayor cantidad de pureza de cobre de la roca extraída después de la exploración en la superficie de la tierra en las plantas concentradoras. Además, se investigó cual es el impacto del consumo del agua en la minería, especialmente en plantas concentradoras. Este punto es relevante debido a que el agua es un recurso muy importante para la vida. Se investigó a grandes rasgos la automatización del proceso de concentración del cobre por medio de la monitorización de las variables de control de lo cual se infiere que el proceso de flotación es crítico para obtener la mayor cantidad de concentrado de cobre en una planta concentradora, donde el proceso para la obtención en la industria minero metalúrgica depende plenamente del diseño de la planta, de los procesos y de la metodología utilizada por la compañía minera respectiva. Se concluye que la metodología empleada para la obtención de cobre en una planta concentradora es mediante el uso de celdas de flotación, las cuales operan utilizando burbujas y aprovechando las propiedades de las partículas del cobre; que son brindadas por la adición de reactivos químicos expuestos en la presente investigación.

PALABRAS CLAVE: Concentrado, flotación, variables, control, automatización.

ABSTRACT

Peru is the second country in the world producing copper, generating development and work with relevant contributions to GDP. This activity works through the exploration, discovery, development and production phases. Large mining dedicated to copper extraction uses two types of processes called concentration and leaching. The present investigation is directed to the concentration process that is used to extract copper from sulphide minerals. A specific process is addressed: flotation. The purpose of the process is to obtain the greatest amount of copper purity from the extracted rock after exploration at the earth's surface in concentrator plants. In addition, the impact of water consumption in mining was investigated, especially in concentrator plants. This point is relevant because water is a very important resource for life. The automation of the copper concentration process was investigated in broad strokes by means of the monitoring of the control variables, from which it is inferred that the flotation process is critical to obtain the greatest amount of copper concentrate in a concentrator plant, where The process for obtaining it in the metallurgical mining industry fully depends on the design of the plant, the processes and the methodology used by the respective mining company. It is concluded that the methodology used to obtain copper in a concentrated plant is through the use of flotation cells, which operate using bubbles and taking advantage of the properties of the copper particles; which are provided by the addition of chemical reagents exposed in the present investigation.

KEY WORDS: Concentrate, floatation, variables, control, automation.

DEDICATORIA

A Dios por darnos la oportunidad de estudiar y aprender cada vez más para ser mejores personas. A nuestros padres por creer siempre en nosotros y nuestras capacidades; brindándonos todo el soporte tanto económico como emocional para seguir adelante en los buenos y malos momentos. A nuestros profesores, que sin el arduo trabajo que desempeñan de educar; no hubiéramos sido capaces de realizar la presente investigación. A nuestros asesores Pascual Adriazola y Christian Gárate por su tiempo y dedicación durante este periodo académico; ya que sin su asesoría no hubiera sido posible presentar una buena investigación y mucho menos empezarla.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Católica San Pablo por brindarnos una buena educación tanto científica como también aquella relacionada a la moralidad, ética y valores.

A nuestros dictaminadores Ing. Claudia Ortiz Villegas y Mg. Benigno Sanz; que sin su guía no se habría realizado la presente tesina.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
SIGLAS Y ABREVIATURAS	7
INTRODUCCIÓN	8
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.1. Formulación del problema.....	9
1.2. Sistematización del problema	9
2. OBJETIVOS	10
2.1. Objetivo general.....	10
2.2. Objetivos Específicos.....	10
3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
3.1. Conveniencia	10
3.2. Justificación Teórico.....	11
3.3. Justificación Práctica.....	11
4. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	11
4.1. Delimitación Temática.....	11
5. MARCO REFERENCIAL	11
5.1. Estado del arte.....	11
5.2. Marco conceptual.....	14
5.3. Proceso general de la concentración de cobre.....	15
5.4. Proceso de flotación del cobre	16
5.4.1. Alcances generales del proceso de flotación.....	16
5.4.2. Etapas del proceso de flotación	18
5.5. Tipos de flotación.....	21
5.5.1. Flotación colectiva.....	21
5.5.2. Flotación selectiva.....	23
5.6. Variables de control en el proceso de flotación	24
5.6.1. Dosificación de reactivos.....	24
5.6.1.1. Colector.....	24
5.6.1.2. Espumante	24
5.6.1.3. Porcentaje de sólidos	25
5.6.1.4. Ph	25
5.6.2. Flujo de agua de lavado en celdas columna.....	26
5.6.3. Flujo de aire en las celdas columna	26
5.6.4. Efecto del tamaño de las partículas del mineral de cobre en el proceso de flotación	27
5.6.4.1. Flotación de partículas gruesas.....	27
5.6.4.2. Flotación de partículas finas:.....	28

5.6.5.	Efecto del tamaño de burbuja en el proceso de flotación	29
5.6.6.	Utilización del agua en el proceso de flotación.....	29
5.6.6.1.	Flotación del cobre.....	32
5.6.6.2.	Pérdidas.....	32
5.6.6.3.	Total.....	32
5.7.	Automatización de una planta concentradora	32
6.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	35
6.1.	Descripción del objeto de estudio y unidad de análisis.....	35
6.2.	Descripción del tipo de investigación	36
6.3.	Una descripción detallada de los instrumentos de investigación	36
6.4.	Descripción del paso a paso de como la investigación fue realizada	36
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	38
7.1.	Análisis de referencias.....	38
7.2.	Análisis del marco referencial	39
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
8.1.	Conclusiones	41
8.2.	Recomendaciones	42
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Separación.....	17
Figura 2:	Velocidad de flotación en un banco de celdas.....	18
Figura 3:	Proceso de molienda, flotación rougher y remolienda	21
Figura 4:	Funcionamiento de las celdas	22
Figura 5:	Flotación selectiva.....	23
Figura 6:	Interacción entre la burbuja y la partícula.	29
Figura 7:	Consumo del agua por sector.....	30
Figura 8:	Consumo del agua por proceso minero.....	30
Figura 9:	Requerimiento de agua en cada proceso de una planta concentradora	31
Figura 10:	Servicios Kairos para la mejora continua.....	34
Figura 11:	Gestión de Incidentes.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Listado de Referencias.....	37
Tabla 2:	Análisis de ventajas y desventajas de la investigación	38
Tabla 3:	Análisis de referencias de la investigación	39

SIGLAS Y ABREVIATURAS

INEI	: Instituto Nacional de Estadística e Informática
ANA	: Asociación Nacional del Agua
IPE	: Instituto Peruano de Economía
PBI	: Producto Bruto Interno

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Instituto Peruano de Economía (IPE, 2018), se afirma que la minería es la columna vertebral del país con una aportación del 10% al PBI, un aumento de 0.67% en la producción de cobre en febrero del 2018. Según el anuario Minero 2017 del ministerio de Energía y Minas; Perú es el segundo país productor de cobre.

Entonces, el Perú es un país con extremada riqueza en minerales, debido al movimiento de las placas tectónicas y el choque que se produce entre ellas desde hace millones de años, es que se dió como resultado que los diferentes tipos de rocas surgieran hacia la superficie y estas contengan minerales diseminados o se encuentren metales base y metales preciosos.

Esta investigación tiene como finalidad analizar las principales variables controladas en la explotación del cobre en una planta concentradora; evaluando específicamente el proceso de flotación. Se analiza cada variable de la flotación para optimizar recursos como automatizar procesos con la finalidad de reducir costos y maximizar la rentabilidad de las empresas mineras. Una vez analizadas estas variables y con información tecnológica, se describe los casos de automatización del proceso de flotación en una planta concentradora. Lo mencionado anteriormente ayudará a terminar con la problemática entre países.

Lo que permite plantear las siguientes preguntas: ¿Cuál es el proceso general para la obtención del cobre en una planta concentradora? ¿Cómo se realiza la obtención del cobre mediante el proceso de flotación? ¿Cuáles son las variables principales implicadas en el proceso de flotación del cobre? ¿Cómo se origina la automatización en una planta concentradora?

1. Descripción del problema de la investigación

Recientemente existe una problemática o guerra comercial entre dos potencias; China y Estados Unidos. Esta supuesta guerra está causando una baja del precio del cobre, causada por un aumento de aranceles a los productos chinos por parte de Estados Unidos, y, por consiguiente, como China es el mayor importador de cobre, se entiende la baja de precio.

Ante lo expuesto, los ingenieros industriales que trabajan en el sector minero del cobre, tienen que estudiar los procesos que intervienen en la obtención del cobre mediante la flotación para identificar oportunidades de mejora y aumentar la factibilidad y rentabilidad de sus proyectos. Entonces, para que este proceso aumente su efectividad es preciso enmarcar las variables más relevantes que intervienen en el proceso de flotación del cobre. Por ello, se requiere información detallada, actualizada y transparente sobre la obtención del cobre mediante el proceso de flotación. Una vez identificadas estas variables, se puede proceder a realizar estudios más profundos de cada una de ellas, permitiendo el estudio de metodologías modernas potenciales para su posterior aplicación en la práctica con el objetivo de optimizar las operaciones y costos del proceso de flotación.

1.1. Formulación del problema

- ¿Cuáles son las principales variables de control en la flotación para la producción de cobre?

1.2. Sistematización del problema

- ¿Cuál es el proceso general de la obtención del cobre en plantas mineras?
- ¿Cómo se realiza el proceso de flotación del cobre en plantas mineras?

- ¿Se cuenta con tecnología suficiente para controlar los procesos en una planta concentradora?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Analizar las principales variables de control utilizadas en el proceso de flotación en una planta concentradora para la obtención del cobre.

2.2. Objetivos Específicos

1. Describir el proceso general de la obtención del cobre en una planta concentradora.
2. Describir y detallar el proceso de flotación del cobre.
3. Revisar y sintetizar información de las principales variables del proceso de flotación del cobre.
4. Investigar las tecnologías de control en los procesos de una planta concentradora de cobre.

3. Justificación de la Investigación

3.1. Conveniencia

La presente investigación sobre el proceso de flotación del cobre, obtendrá resultados relevantes para los investigadores, las instituciones y las empresas relacionadas en el rubro de la minería. Debido a que se busca conocer y entender el funcionamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de flotación cuya finalidad es obtener un mayor porcentaje de pureza de cobre en plantas concentradoras. Es decir, mejorar la rentabilidad de las empresas en el sector minero. Además de la aceptación de la

sociedad al desarrollo de este sector e impulsar la inversión que incrementará el PBI, por la información transparente expuesta a interesados.

3.2. Justificación Teórico

Para la presente investigación, se empleó diversas fuentes de información como informes de minas, investigaciones académicas, científicas, así como investigaciones de organizaciones referidas al proceso de flotación del cobre en plantas mineras. El detalle en cuanto a los indicadores más relevantes del proceso de flotación para realizar una correcta extracción del cobre, cantidad de agua utilizada y máquinas o tecnología utilizada.

3.3. Justificación Práctica

La información recopilada durante la investigación se enfocará en el proceso de flotación de cobre. Detallando el uso y desarrollo de tecnologías para dicho proceso. Enfatizando la búsqueda de datos relevantes que sirva de base a terceros que les interese proponer una mejora al tema propuesto.

4. Delimitación de la investigación

4.1. Delimitación Temática

La investigación está enfocada al sector minero, exclusivamente a las plantas concentradoras donde la obtención del cobre se realiza mediante el proceso de flotación.

5. Marco Referencial

5.1. Estado del arte

El proceso de flotación ha ido evolucionando a raíz de descubrimientos en la industria química que se dieron a inicios del siglo XIX. El más importante fue cuando por intermedio de estudios se determinó que los minerales tenían

características humectables. Por lo tanto, se llegó a la conclusión de que dichos minerales podían ser dotados de características hidrofóbicas mediante la aplicación de reactivos químicos.

En la tesis de pregrado titulado "*Variables y propiedades que influyen en el proceso de flotación*" de la Universidad Católica del Norte de Chile (Novoa y Vargas, 2013), refieren la importancia de conocer las variables en el proceso de flotación, analizar y describir como interactúan entre sí en sus diferentes grupos de componentes: químicos, de operación y del equipamiento. También resalta el aumento de la recuperación del cobre mediante la propiedad hidrofóbica del agua y el uso de reactivos, este aumento genera en las empresas un incremento de su productividad. También resaltan que una partícula de mineral es hidrofóbica cuando repele el agua; de manera que, a mediados del año 1906, época en que la industria minera fue testigo de la evolución de la flotación utilizando espumantes; se hicieron otros descubrimientos como es el caso de los colectores que proporcionaban una mayor eficiencia en la flotación de minerales; ya que éstos convertían ciertas partículas en hidrófobas para que se adhirieran a las burbujas y se obtenga una mayor concentración durante el proceso de flotación.

Previo al descubrimiento de la flotación utilizando espumantes y el boom que hubo en esa época en la industria minero metalúrgica; se usaba el método de flotación utilizando aceites (Lobato, 2011). Sin embargo, una vez comprobada la eficiencia que tenía el uso de espumantes por encima de los aceites; es que fueron reemplazados y hasta el día de hoy se utiliza el método de flotación usando espuma.

Los avances tecnológicos en la industria minera; específicamente en el proceso de flotación, no hubieran sido posibles si no tendrían como piedra angular el descubrimiento de las propiedades físico químicas de las partículas; dando hincapié a las ya mencionadas características hidrofóbicas como también hidrofílicas; considerando así la sinergia que tuvieron los colectores y los espumantes. Dicho en palabras simples, se obtuvo un mejor método para clasificar la mena de la ganga (Salas y Hinojosa, 2012).

Así mismo se intensificaron las investigaciones sobre los reactivos químicos (colectores) como el xantato que es uno de los más usados en la industria minero metalúrgica y además del ditiofosfato. Dichos reactivos ayudaron a los espumantes a suplantar de manera definitiva a los aceites, debido que estos colectores le daban propiedades hidrofóbicas a los minerales sulfurados como es el caso del cobre y hacia más eficiente su recuperación en las celdas de flotación, aumentando así el porcentaje de concentrado; concluyeron en las investigaciones de Hernandez, Trujillo y Todac (2010). En la actualidad, existen más colectores como el tiofosfato.

Definitivamente el proceso de flotación ha evolucionado (Salas y Hinojosa, 2012), ya que han aparecido procesos, como por ejemplo la flotación colectiva y la flotación selectiva. Los cuales tienen objetivos muy diferentes en cuanto al requerimiento del concentrado que se desea obtener. En la primera flotación se puede obtener un concentrado bulk (cobre y molibdeno) y en la segunda, se produce la separación del cobre y del molibdeno respectivamente.

5.2. Marco conceptual

- Mineral: El mineral es un compuesto inorgánico que es de origen natural que son formados por procesos geológicos y se encuentran en la corteza terrestre. Éstos pueden estar constituidos por un solo elemento (llamados metales preciosos como por ejemplo el oro) o como generalmente se encuentran conformados por una asociación de distintos elementos (como por ejemplo los óxidos, sulfuros, etc.)
- Mena: Es un conjunto de minerales, como rocas que está constituida por dos partes importantes: Una que es la parte valiosa que puede ser recuperada mediante un proceso determinado, obteniendo así un beneficio económico. Mientras que el resto es la parte estéril o comúnmente conocida como ganga. Cabe resaltar que son términos usualmente usados en la extracción de metales. Además, como dato adicional en el caso de los yacimientos de cobre, menos del 1% contiene dicho mineral.
- Partículas: Son entidades físicas distinguibles.
- Grano: Es un aglomerado pequeño de cierto mineral.
- Liberación del mineral: Se refiere a la separación propia del mineral valioso y la ganga. Dicha liberación se logra mediante un proceso de disminución o reducción de tamaño que en el mundo de la minería se llama conminución.
- Hidrofóbico: Este tipo de partículas con dicho tipo de superficie evitan el contacto con el agua. Adoptan este comportamiento porque las moléculas

en su superficie no forman puentes de hidrogeno, de manera que no es posible formar un enlace con el agua.

- Hidrofílico: Estas partículas cuyas superficies son hidrofílicas, son propensas a estar en contacto con el agua. En otras palabras, las moléculas en su superficie forman puentes de hidrogeno con el agua.

5.3. Proceso general de la concentración de cobre

Diversos estudios¹ concluyen;

El proceso empieza con la voladura, en donde se utilizan explosivos para disminuir el tamaño de las rocas con mineral sulfurado. Posteriormente dichas rocas son llevadas a planta. Aquí la primera etapa es el chancado primario donde se busca reducir el tamaño del mineral (conminución). Dicho mineral llega a la chancadora primaria con una granulometría de 8 pulgadas para ser reducida a 3 pulgadas en promedio. Cabe resaltar que los datos cuantitativos son estándares generales provistos por los autores ya mencionados; según sus investigaciones cada compañía minera tiene parámetros que van de acuerdo al expertiz o know-how de sus procesos respectivos.

A continuación, sigue el proceso de molienda; en donde el objetivo al igual que en el chancado es disminuir el tamaño de mineral de 3 pulgadas a 120 micras. Posteriormente sigue el proceso de flotación, el cual se divide en dos áreas. La primer área es la flotación colectiva en donde el objetivo es obtener un concentrado bulk de cobre-molibdeno, el cual tiene determinadas características

¹ Lobato, 2011

y es producto de diferentes etapas de flotación del área. La segunda área es la de flotación selectiva o también conocida como planta moly (molibdeno). El objetivo en dicha área es a partir de un concentrado bulk; obtener un concentrado de cobre y un concentrado de molibdeno. Básicamente separar el concentrado bulk a través de un proceso de flotación.

Una vez que se recupera el concentrado de cobre; sigue el proceso de espesamiento que tiene por función la separación sólido líquido del concentrado de cobre y recuperar la mayor cantidad de agua posible. Así mismo existen espesadores en donde llegan los relaves obtenidos de las celdas de flotación. De igual forma se busca recuperar el máximo de agua para ser reutilizada en los procesos requeridos.

Finalmente, la pulpa de cobre pasa hacia el área de filtrado. El objetivo es filtrar el agua de la pulpa hasta que tenga un nivel de humedad determinada que establece cada compañía minera de acuerdo a sus parámetros.

5.4. Proceso de flotación del cobre

5.4.1. Alcances generales del proceso de flotación

Este proceso tiene como objetivo concentrar los minerales valiosos, en este caso el cobre que provino del proceso de molienda. Básicamente se realiza la separación de la pulpa en dos productos: El concentrado y la cola. (Ver Figura N°1)

Figura 1: Separación



Fuente: D. Pequeña (2016)

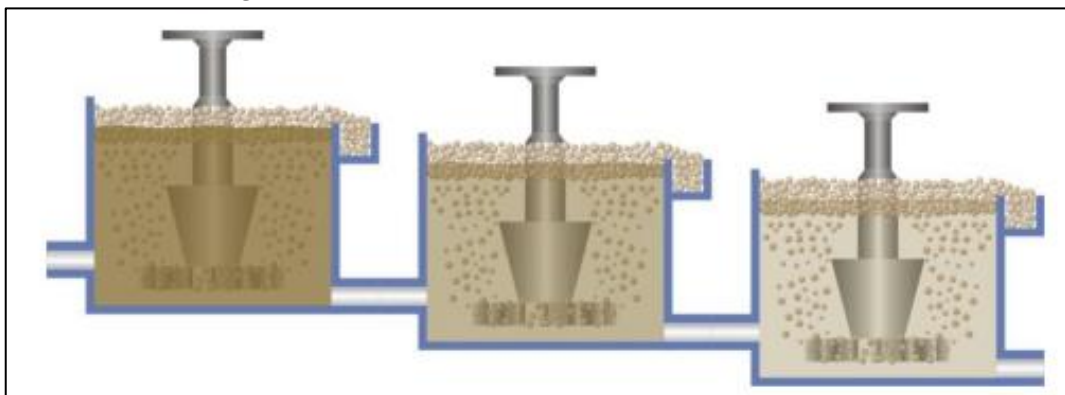
Como se ha de suponer el concentrado debería estar conformado por un 100% de mineral valioso es decir con una ley del 100% y a su vez las colas deberían estar conformadas por un 100% de ganga. Sin embargo, el autor Pequeña (2016) concluye que esto no ocurre en la práctica debido a que los procesos de liberación y separación no son perfectos por lo que siempre va a existir un porcentaje mínimo que no se liberó correctamente. Es por eso que existen diferentes tipos de celdas de flotación como la Rougher, cleaner y la scavenger para recuperar al máximo el mineral valioso. Aun así, solo se obtiene un mineral concentrado al 99.99% de Cu.

Así mismo existen variables durante el proceso de flotación que deben ser controladas (Novoa y Vargas, 2013) para una mayor eficiencia en la concentración; como por ejemplo el porcentaje de sólidos.

Para obtener los sólidos se utiliza la balanza Marcy, dicha variable se utiliza para determinar la cantidad de agua a agregar a la celda de concentración.

Ahora bien, el agua ocupa un rol importante en el proceso de flotación ya que además de ser un **disolvente por excelencia** tiene otras propiedades como por ejemplo su polaridad que ayuda a realizar la recuperación del mineral valioso según Guillen (2010). También es preciso controlar el pH de la pulpa que ingresa a una celda de flotación, que en general tiene un pH básico por lo que este interviene directamente en la velocidad de flotación (Ver Figura 2); en donde se puede observar que el color de cada celda rougher va siendo cada vez más claro debido a que se va recuperando mayor cantidad de cobre; en razón al paso de dicho mineral por las celdas.

Figura 2: Velocidad de flotación en un banco de celdas



Fuente: J. Kuroiwa, F. Castro, J. Montenegro (2014)

5.4.2. Etapas del proceso de flotación

Como ya se mencionó, la flotación tiene como objetivo recuperar el concentrado de cobre. De manera que la pulpa que proviene del área de

molienda ingresa al área de flotación que se divide en las siguientes etapas:

- Primera etapa: La pulpa pasa hacia las celdas rougher las cuales son celdas mecánicas recuperadoras de cobre cuyo funcionamiento consta básicamente que por intermedio de agitadores y el uso de reactivos químicos; provoquen que las partículas de cobre sean recuperadas mediante el rebalse del mismo.

Cabe resaltar que el área de flotación utiliza aproximadamente entre el 40 – 50 % de agua que es lo estándar según el autor Lobato (2013), además del agregado de cal, colectores, espumantes y suministro de aire para que proporcionen condiciones óptimas durante el proceso de recuperación. En esta parte, el mineral concentrado sale por rebalse hacia un hidrociclón que clasificará nuevamente el tamaño de la partícula, de igual forma el que cumpla con el tamaño óptimo pasa por el overflow hacia la siguiente etapa la cual es la de flotación Cleaner.

- Segunda etapa: El concentrado llega hacia las celdas cleaner las cuales son del tipo neumático ya que no poseen agitadores como es el caso de las celdas rougher. El funcionamiento es únicamente en base del suministro de aire a presión, espumantes y colectores que permiten que las impurezas sean clasificadas del concentrado de cobre. De tal forma que el único objetivo de estas celdas es retener cualquier impureza contenida en la pulpa; mientras que las partículas que no cumplan con la granulometría establecida pasan por el underflow de un hidrociclón hacia un proceso de remolienda y

posteriormente nuevamente al hidrociclón para verificar el tamaño correcto de granulometría.

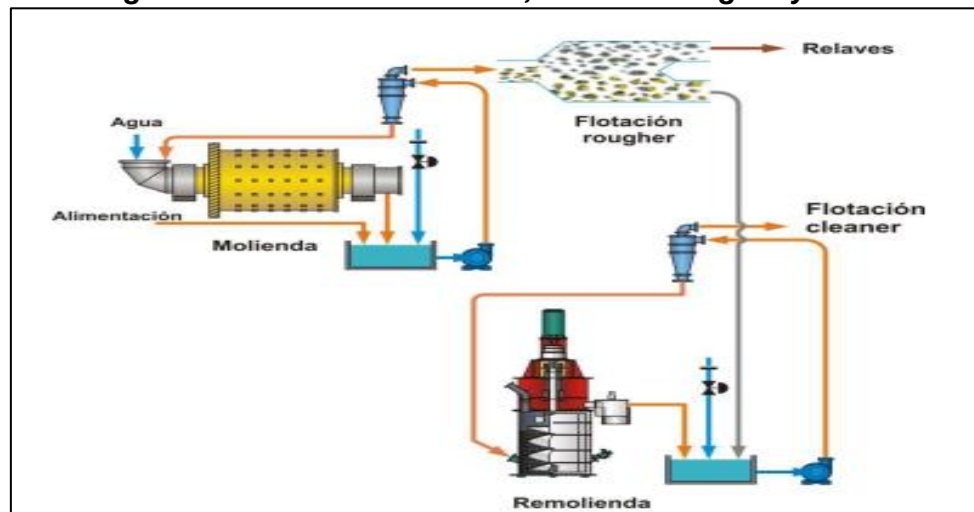
A su vez, la acumulación de las impurezas que se sedimentan en el fondo de las celdas de flotación cleaner y que no quedaron suspendidas, son consideradas como colas o relaves que contienen una cantidad mínima de mineral valioso (cobre). De manera que para recuperar la mayor cantidad de mismo; éstas colas pasan a unas celdas de flotación llamadas scavenger,

- Tercera etapa: Las celdas scavenger tienen una función de devastar; es decir, recuperar el máximo de mineral valioso (mena) y separarlo de la ganga (Concha y Wasmund 2013). Son celdas mecánicas cuyo funcionamiento es muy parecido a las celdas de flotación rougher.

Ahora bien, en cada etapa de flotación se separan diferentes minerales aprovechando las propiedades; específicamente superficiales, de cada uno. Es por eso que es fundamental conocer y entender las propiedades superficiales de los minerales que intervienen y hacen posible el proceso de flotación. En primer lugar, hay que diferenciar las partículas que son hidrofóbicas (repelen el agua); que en este caso vendrían a ser las partículas de cobre las cuales se pegan a las burbujas y salen por rebalse de las celdas. Por otro lado, están las partículas hidrofílicas (afinidad por el agua) que en este caso vendría a ser la ganga que salen de las celdas como colas o relaves. Dichas propiedades son muy importantes ya que determinan la recuperación del cobre según Aguilar (2013).

Como pequeño resumen de lo expuesto anteriormente; en la siguiente imagen se puede apreciar cómo llega la pulpa del área de molienda para luego ser clasificado mediante hidrociclones y posteriormente pasar a las celdas rougher:

Figura 3: Proceso de molienda, flotación rougher y remolienda



Fuente: A. Lobato (2013)

5.5. Tipos de flotación

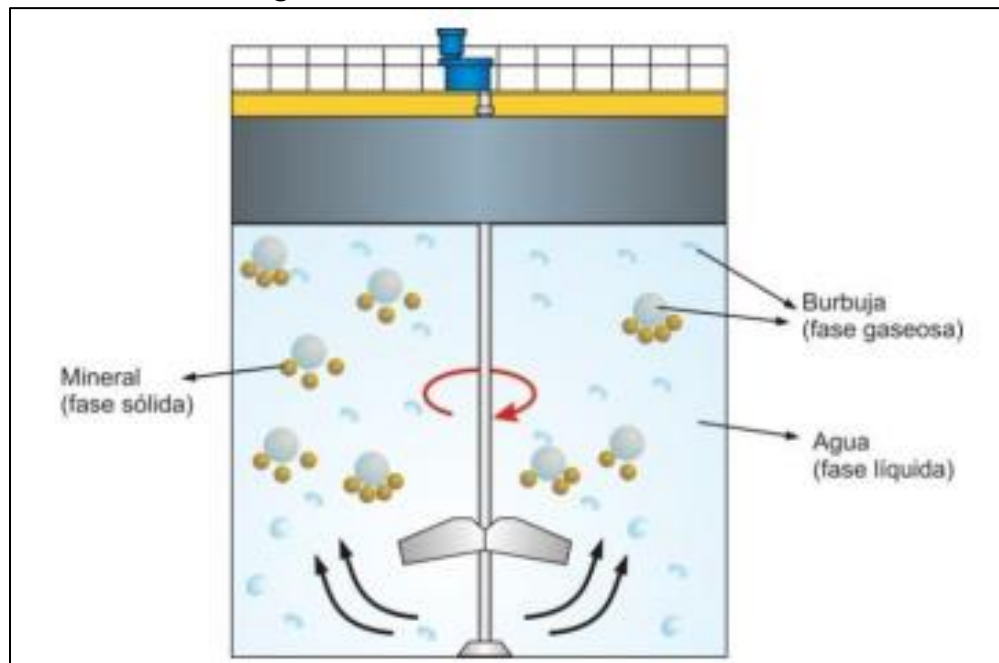
5.5.1. Flotación colectiva:

La flotación colectiva es un proceso físico químico el cual tiene como principal objetivo obtener un concentrado bulk (cobre – molibdeno) para luego pasar a un espesador bulk y posteriormente a flotación selectiva en donde se separará el cobre y el molibdeno. Básicamente el área de flotación colectiva sirve para recuperar el mineral valioso de una pulpa, creando condiciones ideales para la adhesión de partículas de mineral en este caso de cobre y molibdeno, hacia las burbujas de aire. De esta forma se logra la separación del mineral valioso y del estéril, formándose 3 fases muy importantes.

- Fase sólida: Constituida por partículas de mineral finamente molidas. Tiene propiedades superficiales que dependen tanto de su composición como de su estructura.
- Fase líquida: Constituida por agua y reactivos. Como se explicó líneas arriba, la polaridad del agua cumple un rol fundamental que causa la hidratación superficial de algunos minerales en situaciones acuosas.
- Fase gaseosa: Constituida generalmente por aire, ya que en otros casos usan otros gases. El aire se introduce a la celda y se dispersa en forma de pequeñas burbujas.

En la figura 4 se puede observar el funcionamiento de las celdas.

Figura 4: Funcionamiento de las celdas

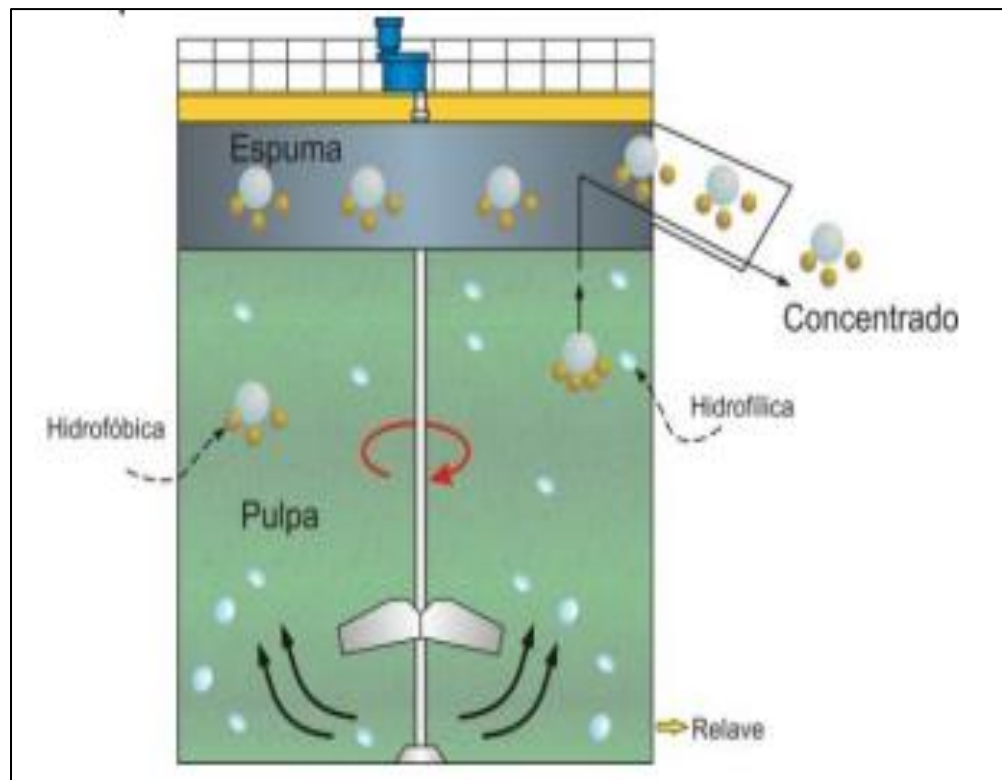


Fuente: A. Hernandez, R. Trujillo, M. Torda (2009)

5.5.2. Flotación selectiva

Este proceso físico químico tiene como principal objetivo recibir el concentrado bulk proveniente de los espesadores bulk y separar el cobre del molibdeno. Al igual que la flotación colectiva se utilizan los mismos reactivos, pero con diferentes características. Así mismo tiene las mismas fases que ocurren en las celdas de flotación colectiva. Cabe resaltar que dependiendo de la compañía minera se puede considerar al cobre como concentrado y al molibdeno como cola o viceversa.

Figura 5: Flotación selectiva



Fuente: Barona (2007)

5.6. Variables de control en el proceso de flotación

La recuperación del concentrado en las celdas de flotación dependerá del control de las variables; ya que estas influyen directamente en dicho proceso (Novoa y Vargas, 2013).

5.6.1. Dosificación de reactivos

5.6.1.1. Colector

Es un reactivo químico cuya función es la de proporcionar a las partículas de cobre la propiedad hidrofóbica. El más usado en la industria minero metalúrgica es el xantato. A continuación, consecuencias del adiconamiento de dicho reactivo:

- Adicionamiento menor al requerido: La recuperación disminuirá por ausencia del efecto de hidrofobicidad de las partículas.
- Adicionamiento mayor al requerido: El porcentaje de ganga aumentará en el concentrado de manera que se reducirá la recuperación metalúrgica del concentrado.

5.6.1.2. Espumante

Es un reactivo químico que tiene como objetivo generar el tamaño óptimo de burbujas con la ayuda del suministro de aire. A continuación, efectos del adiconamiento de espumantes:

- Adicionamiento menor al requerido: Se producirá una mala calidad de espuma que no será capaz de soportar el concentrado en la superficie de la pulpa dentro de las celdas de flotación.

- Adicionamiento mayor al requerido: De igual manera se producirá una mala calidad de espuma ya que habrá un mal soporte del mineral y la recuperación será menor.

5.6.1.3. Porcentaje de sólidos

Es la cantidad que existe de sólidos en relación al agua contenida en la pulpa. A continuación, consecuencias de porcentajes bajos y altos.

- Porcentaje alto: Propenso a generar embancamientos en las celdas. Por lo tanto, una baja recuperación de mineral valioso. Así mismo puede provocar daños en los componentes mecánicos y eléctricos. Como también la velocidad de flotación será menor y disminución de recuperaciones. Entonces las partículas no deseadas pueden adherirse a la mena; obteniendo así concentrados sucios.

5.6.1.4. pH

Es un indicador que determina la basicidad o acidez de una sustancia. Se utiliza cal, nash y ácido sulfúrico en la industria minero metalúrgica. A continuación, efectos del adicionamiento de reactivos que modifican el pH.

- Aumento de pH: Produciría un cambio en el equilibrio químico que afectaría directamente al colector ya que éste dejaría de adsorberse sobre la superficie del mineral.
- Disminución de pH: Podrían flotar elementos no valiosos como es ejemplo la piritita y otros elementos los cuales tienen alto

contenido en hierro. De manera que es un elemento que podría flotar junto al cobre produciendo así un concentrado de baja ley de éste último. Un pH estándar es sobre 11; ya que ayuda a deprimir la flotación de la pirita y así mismo ayuda al colector a ser más selectivo con el cobre.

5.6.2. Flujo de agua de lavado en celdas columna

En seguida se mencionan los resultados que generan el flujo alto o bajo de agua.

- Flujo descendente: Separa la ganga de la espuma y desplaza el agua sucia que está atrapada en la espuma. Dicha agua contiene mineral de limos de ganga que por lo tanto puede reducir la ley de concentrado.
- Flujo ascendente: Generalmente se aumenta la ley de concentrado, sin embargo; el exceso puede disminuir la recuperación porque el porcentaje de sólidos aumentaría.

5.6.3. Flujo de aire en las celdas columna

En seguida se mencionan los efectos ocasionados por el flujo alto o bajo de aire.

- Flujo bajo: Produce una espuma inestable, inamovible y pesada. Afectando directamente a las burbujas ya que estas serían muy finas y no tendrían el tamaño adecuado para atrapar a las partículas hidrofóbicas. Por consiguiente, la recuperación sería menor.
- Flujo alto: Provocaría poca dispersión de aire causando así erupciones violentas en la superficie de la espuma en las celdas. De manera que

se perdería adhesión de las partículas hidrofóbicas y llevar a un concentrado de baja ley.

5.6.4. Efecto del tamaño de las partículas del mineral de cobre en el proceso de flotación

La eficiencia del proceso de flotación se ve impactada negativamente cuando se opera en los extremos, es decir, con partículas finas ($<10\ \mu\text{m}$) o partículas gruesas ($>250\ \mu\text{m}$). Mientras que el rango óptimo de partícula suele estar en fracciones entre $>45\ \mu\text{m}$ y $<250\ \mu\text{m}^2$.

Debido a la ineficiencia de la flotación según la clasificación de partículas gruesas o finas. En 2002 Eriez Flotation Division ha desarrollado dos celdas de flotación para mejorar la eficiencia de la flotación para cada tipo de partícula.

5.6.4.1. Flotación de partículas gruesas

Concha y Wasmund desarrollaron una celda HydroFloat-Tecnología de flotación de partículas gruesas que viene siendo empleado desde el 2004. Además, han demostrado que la celda puede flotar eficientemente partículas mayores a $150\ \mu\text{m}$. Reportando recuperaciones entre 85% - 93% Cu.

Esta celda ha sido planteada para usarse en dos etapas:

- Pre-concentración: Consiste en la clasificación de las partículas finas y gruesas que irá a la celda HydroFloat provenientes de la

² Wyslouzil et al. (2009) citado por (Concha & Wasmund, 2013)

molienda. Con recuperaciones mayores al 85% Cu y generando un relave final.

- Recuperación de relaves: Se estima que alrededor del 30%-50% del Cu que se pierde en los relaves estaría contenido en las fracciones gruesas. Por ello con la celda HydroFloat es posible recuperar entre 60%-90% de Cu en los relaves.

Beneficios:

- Mediante un enfoque cualitativo, se menciona beneficios con la recuperación de agua y reducción de las pérdidas en la evaporación en los relaves.
- Consume 10% del aire consumido por celdas convencionales de flotación.
- Reduce el consumo de reactivos hasta 10%.
- Trabaja en una sola etapa, no necesita de celdas en serie.

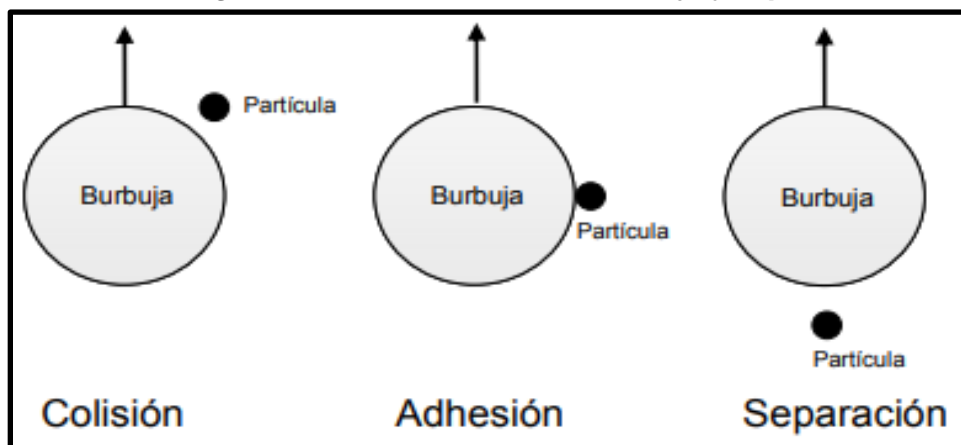
5.6.4.2. Flotación de partículas finas:

Se desarrolló una celda llamada Cavitation para partículas finas de cobre. Su funcionamiento consiste en formar burbujas extremadamente pequeñas para que el área superficial de la burbuja sea mayor, es decir, mejora la probabilidad de adhesión de la partícula en la burbuja. Además, el tiempo del proceso en la celda fue la mitad del tiempo de las celdas convencionales.

5.6.5. Efecto del tamaño de burbuja en el proceso de flotación

La eficiencia en la colisión aumenta al incrementar el tamaño de partícula y al disminuir el tamaño de burbuja³. Pero el tamaño de partícula afecta el tiempo de inducción, el cual aumenta con el tamaño de partícula disminuyendo la eficiencia de adhesión.

Figura 6: Interacción entre la burbuja y la partícula.



Fuente: F. Barona (2010)

Según la Figura N°6 la colisión es cuando la partícula se acerca a una burbuja a una distancia por fuerzas físicas. Luego la burbuja se adhiere a la partícula para transportarla a la superficie y posteriormente terminar la flotación.

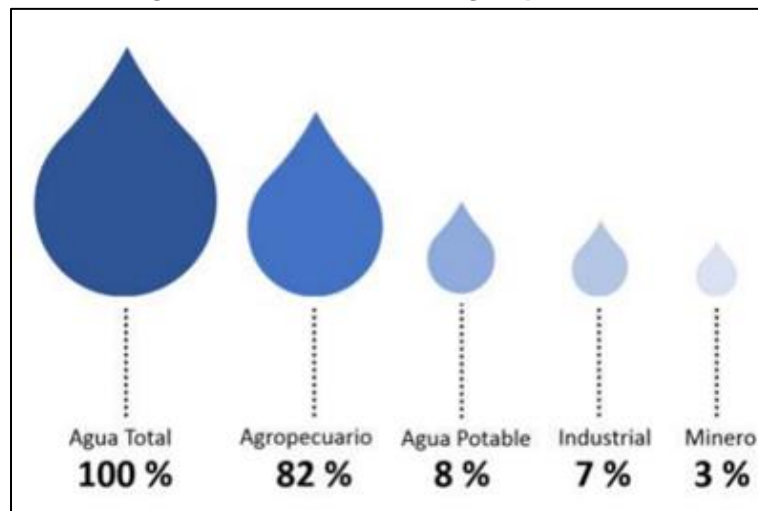
5.6.6. Utilización del agua en el proceso de flotación

En una investigación sobre el consumo del agua en el sector minería Cochilco (2016), informaron los siguientes porcentajes:

³ F. Barona (2007)

En Chile, cerca del 3% del agua es utilizada por el sector minería (Figura 7), el mayor consumo del agua recae en el área de la planta concentradora, donde se encuentra el proceso de flotación con 71.3% de agua utilizada (Figura 8).

Figura 7: Consumo del agua por sector



Fuente: Cochilco (2016)

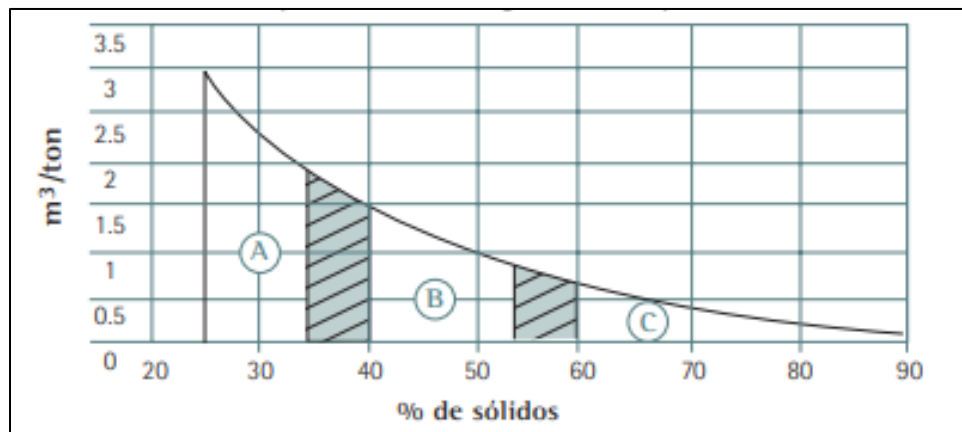
Figura 8: Consumo del agua por proceso minero



Fuente: Cochilco (2016)

En la Figura N°9 se observa que la zona A corresponde al proceso de flotación, la zona B al espesamiento y la zona C a la filtración. La flotación se realiza en un rango de 25% a 35% de sólidos analizado en un laboratorio a escala piloto. El cual la utilización del agua varía entre 3 y 1.5 m³/ton de mineral.

Figura 9: Requerimiento de agua en cada proceso de una planta concentradora



Fuente: Gobierno de Chile y Consejo Minero (2016)

En el análisis de los balances de agua en la planta concentradora de la Sociedad Minera Cerro Verde se concluye⁴ que para extraer 1 TMF se necesita en promedio 98 m³ de agua, derechos de agua superficial 1160 l/s.

⁴ Kuroiwa, Castro & Montenegro (2014)

5.6.6.1. Flotación del cobre

- 3250 l/s de agua necesitada para la flotación.
- 34 l/s se encuentran en el mineral, 102 l/s de licencias y 3114 l/s de agua recuperada.
- 3248 l/s se envía desde la flotación al espesador donde recircula 2129 l/s y 985 l/s recircula del embalse.

5.6.6.2. Pérdidas:

- 13 l/s se evapora en dique de relaves, 379 l/s en el embalse, 150 l/s evaporados en el embalse.

5.6.6.3. Total:

- 3114 l/s recuperado, 2 l/s en los concentrados de cobre, 650 l/s en relaves y 542 l/s de pérdida.

5.7. Automatización de una planta concentradora

En la revista internacional de procesamiento de minerales (Luttrel G y Yoon R, 1991) se publicó un artículo donde se desarrolló un simulador de columna de flotación basado en principios hidrodinámicos basado en las interacciones partícula-burbuja con el objetivo de predecir el rendimiento de las columnas de flotación de sulfuro. Dicho simulador es útil para el control de las variables, la optimización y la resolución de problemas.

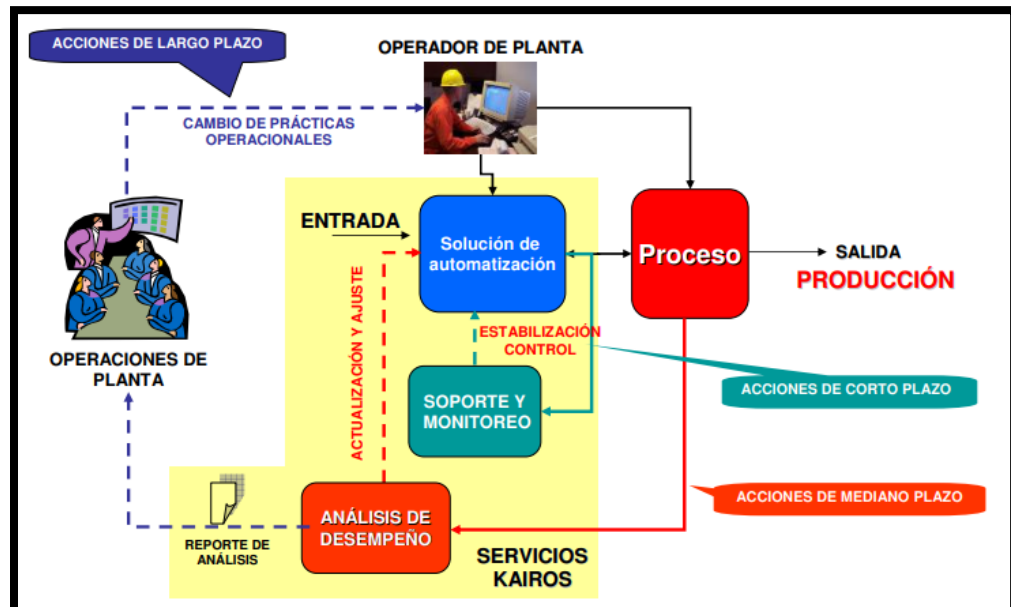
Aliaga (2010), utilizó el diagrama BPMN y Diagrama de roles para modelar el rediseño del proceso productivo de la planta concentradora de cobre, identificando múltiples oportunidades de mejora como contar con un software de integración.

Matamoros (2018) menciona la cámara Visiofroth, un sistema de adquisición y análisis de imágenes en tiempo real que permite obtener propiedades de la espuma de flotación (Metso Minerals, 2006).

En 2006, se funda el programa KAIROS MINIG en alianza de Codelco y Honeywell, con el objetivo de proveer soluciones de automatización integrales para la industria minera ayudando a convertir las averías imprevistas y las paradas operativas en cosa del pasado. Dos años después Honeywell recurrió a SKF como proveedor de mantenimiento predictivo, ya que se estimó que era la única empresa para integrar las áreas de mantenimiento y operaciones dando como resultado la fórmula; monitorización constante.

En la figura N°10, se puede observar la red integrada del funcionamiento del programa Kairos Minig, el cual opera mediante la monitorización de los procesos en plantas concentradoras con los siguientes beneficios: Incrementa la productividad, estandariza los procesos, reduce la variabilidad de la salida, reduce el costo operacional, mejora el control y el aseguramiento de la calidad, reduce el error humano, mitiga la falta de recursos humanos calificados y facilita la auditoria del proceso.

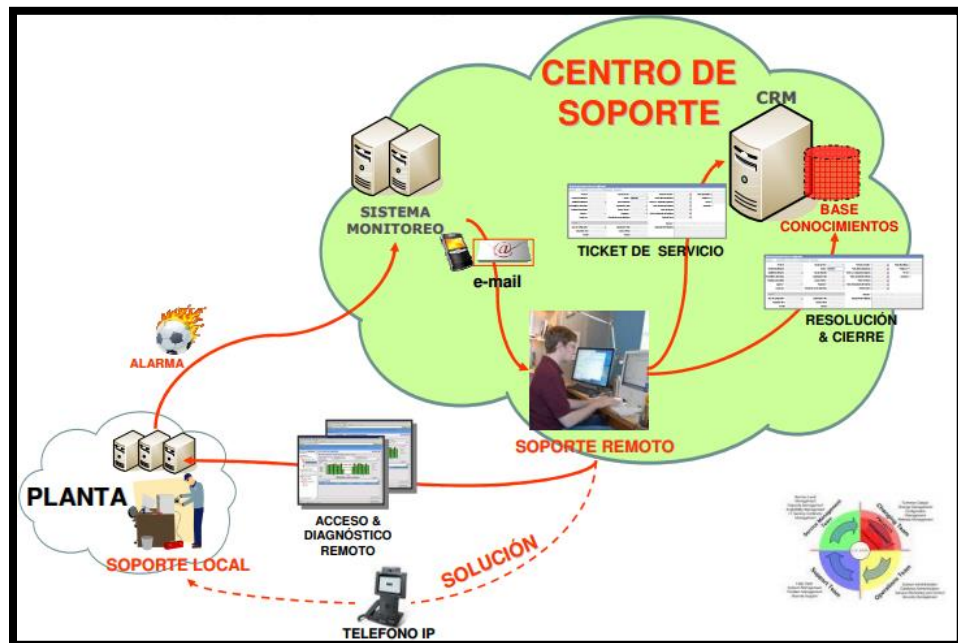
Figura 10: Servicios Kairos para la mejora continua



Fuente: Kairos Mining (S.F.)

Por otro lado, en la figura N°11, el soporte es mediante la recepción automática de alarmas emitidas por la planta en forma de e-mails conteniendo informes de resolución de fallos y notificaciones de usuario gracias al software SKF @Ptitude Decision Support, y el centro de soporte dará una solución inmediata ya que se programan las alarmas del Sistema de Control Digital compatibles con la SKF @Ptitude Monitoring Suite, permitiendo que la planta reciba la información diagnosticada.

Figura 11: Gestión de Incidentes



Fuente: Kairos Mining (S.F.)

6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

6.1. Descripción del objeto de estudio y unidad de análisis

El objeto de la investigación es analizar cómo se obtiene el cobre mediante el método de proceso de flotación y cuál es el control del proceso. Además de la preocupación por el consumo del agua en la flotación. Se investiga también el consumo general del agua en el sector minería para especificar su utilización en la flotación para el procesamiento de minerales sulfurados. La información recabada surgió de distintas fuentes nacionales e internacionales.

6.2. Descripción del tipo de investigación

La presente investigación exploratoria es de tipo deductivo; investigando el proceso general del cobre, enfocándose en el proceso de flotación de plantas concentradoras y finalmente analizar las principales variables de control para su aplicación en la automatización.

6.3. Una descripción detallada de los instrumentos de investigación

La información expuesta fue recopilada de fuentes secundarias confiables como tesis, papers, revistas, informes institucionales, libros, artículos y otros. La técnica empleada fue recopilar la información, clasificarla para convertirla en conocimiento para su análisis.

6.4. Descripción del paso a paso de como la investigación fue realizada

Se presentó la información de manera escrita sintetizando la información relevante referida a los objetivos de la investigación y mediante figuras, para observar y entender la investigación de una manera didáctica.

- Identificar el tema que se desea investigar.

“ANÁLISIS DEL CONTROL DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DEL COBRE”

- Seleccionar las palabras clave de búsqueda, que son los conceptos clave de la investigación, pueden ser redefinidos a medida que avanza la investigación. Flotación del cobre, celdas, mena, liberación del mineral, control, automatización.
- Levantamiento inicial de información en base de datos: El levantamiento de la información fue recabado de informes, artículos, papers de

instituciones, tesis de graduación en el rubro de la minería para el levantamiento teórico relacionado al proceso de flotación del cobre.

- Referencias investigadas:

Tabla 1: Listado de Referencias

Año	Lugar	Autor	Palabras clave	Metodología utilizada
2016	Chile	COCHILCO	Consumo del agua en la minería del cobre	Informe cuantitativo
2014	Perú	Kuroiwa, Castro y Montenegro	Balances de aguas en plantas concentradoras	Informe cuantitativo
2016	Canadá	Concha y Wasmund	Flotación de partículas gruesas	Informe cuantitativo
2013	Canadá	Concha y Wasmund	Flotación de finos y gruesos	Informe cuantitativo
2013	Chile	Novoa y Vargas	Variables y propiedades en la flotación	Informe cuantitativo
2014	Perú	Antonio Bravo	Manual de flotación	Experimental
2013	Perú	Arturo Lobato Flores	Introducción a la metalurgia.	Informe cuantitativo
2010	Barcelona	Morrall, Jimeno y Molera	Metalurgia General-Tomo I.	Informe cuantitativo
2013	Chile	Ademir Ramirez	Minería Chilena.	Informe cuantitativo
2013	Perú	Julio Alberto Aguilar Schafer	Explotación minera, preparación y concentración	Informe cuantitativo
2010	México	Angélica Nohelia Guillén Méndez	Procesos de extracción y concentración de minerales	Informe cuantitativo
2012	Bolivia	Antonio Salas Casado y Octavio Hinojosa Carrasco	Avances tecnológicos en la concentración de minerales.	Informe cuantitativo
2018	Perú	NN	Procesamiento de minerales.	Informe cuantitativo
2016	Perú	Darlin Josue Pequeña	Concentración de Minerales	Informe cuantitativo
2010	Chile	Kairos Mining	Automatización	Informe cualitativo
2018	Chile	Matamoros	Espuma en celdas de flotación	Experimental
2010	Chile	Aliaga C.	Control del proceso, flotación	Informe Experimental

Fuente: Elaboración propia

- Lectura de los textos seleccionados: Se realizó el análisis por referencia y fue citado según su relevancia y relación con los objetivos de la investigación.
- Análisis de ventajas, desventajas y limitaciones de los métodos para superar estas limitaciones:

Tabla 2: Análisis de ventajas y desventajas de la investigación

VENTAJAS	DESVENTAJAS	FORMAS DE SUPERAR
Información base para futuras investigaciones.	Información muy teórica	Investigar en una empresa minera
Resultados para diagnóstico de problema	Datos desactualizados	Recabar información de una institución reguladora del país

Fuente: Elaboración propia

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Análisis de referencias

Se tomaron diecisiete referencias para realizar la investigación. De las cuales:

Seis son referencias nacionales (35.29%) y once son referencias internacionales (64.71%). Cabe resaltar que Chile es el máximo referente con seis referencias; dos en el consumo del agua, una en la automatización del proceso de concentrado y tres en variables de control. Mientras que el resto corresponden a referencias tanto nacionales como internacionales.

Tabla 3: Análisis de referencias de la investigación

	NACIONALES	INTERNACIONALES
LIBRO	4	2
TESIS DOCTORAL		2
ARTICULO	2	3
TESIS DE TITULACION		1
REVISTA		3
SUB TOTAL	6	11
SUB TOTAL (%)	35.29 %	64.71 %
TOTAL (%)	100%	

Fuente: Elaboración propia

7.2. Análisis del marco referencial

Mediante la presente investigación se determinó que el proceso de flotación es crítico para obtener la mayor cantidad de concentrado de cobre en una planta concentradora.

La revisión de múltiples autores permitió identificar lo siguiente:

- En primer lugar, el proceso para la obtención de cobre en la industria minero metalúrgica depende plenamente del diseño de la planta, el diseño de los procesos y de la metodología o know-how utilizada por la compañía minera respectiva. Sin embargo, para el sector de la gran minería del cual se habla en la investigación; se determinó que existe un proceso general que es utilizado como base en las distintas organizaciones mineras. Dicho proceso comprende de: Voladura, chancado, molienda, flotación, espesamiento y filtrado.
- En segundo lugar, el proceso de flotación consiste de un conjunto de etapas para poder obtener el concentrado final de cobre. Cabe resaltar una vez más que dependiendo de la compañía es que hacen el diseño de su

planta. Pero que en general se tienen tres tipos de celdas de flotación; rougher, cleaner y scavenger. A su vez cada celda es una etapa por la cual pasa la pulpa de mineral.

- En tercer lugar, el concentrado final que se obtiene del proceso de flotación depende exclusivamente del control de las variables que se realizan durante dicho proceso. Entre las variables de control más importantes están: Los espumantes, los colectores, el pH, el tamaño de partículas, el porcentaje de sólidos, flujo de agua y flujo de aire.
- El objetivo del proceso de flotación es el de recuperar la mayor cantidad de concentrado de cobre. Debido a que únicamente recupera el cobre y lo separa de las partículas no valiosas que van directamente a los relaves o colas.
- Las celdas de flotación se dividen en dos tipos: Mecánicas y neumáticas. La diferencia básicamente está que en el primer tipo; las celdas contienen agitadores. Mientras que el segundo tipo no. Así mismo, las celdas mecánicas son las rougher y scavenger. Mientras que las celdas neumáticas son las cleaner.
- En la gran minería existen dos tipos de flotación: Colectiva y selectiva. En el primer tipo el objetivo es obtener un concentrado bulk; el cual es un concentrado de cobre y molibdeno. Mientras que en el segundo tipo; el objetivo es separar el cobre del molibdeno. Ambos tipos de flotación utilizan celdas rougher, cleaner y scavenger. Sin embargo, el uso de los reactivos químicos y el control de las variables son dependientes por cada tipo de flotación.

- La automatización del proceso de concentrado del cobre llevada a cabo en Chile ha sido fundamental para ubicarse como el primer país en el mundo productor de cobre. Gracias a sus alianzas con empresas top en tecnología que ayudan a la monitorización de sus procesos.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

Primero. La metodología empleada para la obtención de cobre en una planta concentradora es mediante el uso de celdas de flotación, las cuales operan utilizando burbujas y aprovechando las propiedades de las partículas del mineral cobre (mena); que son brindadas por la adición de reactivos químicos expuestos en la investigación, se adhieren a dichas burbujas y son separadas de las partículas no valiosas (ganga) mediante rebalse.

Segundo. Existe un proceso estándar utilizado en la gran minería para la obtención de cobre en una planta concentradora. Dicho proceso sirve como base para el diseño de planta y metodología de operación que varía de acuerdo al requerimiento y necesidad de una compañía minera.

Tercero. El proceso de flotación consta de tres etapas fundamentales: Etapa de recuperación, de limpieza y de devastado. Así mismo, por cada etapa; las celdas de flotación son de diferentes tipos: En primer lugar, están las celdas rougher que son celdas mecánicas, las cleaner que son celdas neumáticas y finalmente las scavenger

que son celdas mecánicas. Además, existen dos tipos de flotación; las cuales son: Flotación colectiva y flotación selectiva. La primera tiene como fin obtener un concentrado bulk (cobre y molibdeno). Mientras que el objetivo de la segunda es separar el cobre del molibdeno.

Cuarto. Existen variables que se controlan estrictamente durante el proceso de flotación. Como es el caso del pH, porcentaje de sólidos, flujo de agua, flujo de aire, cantidad de espumante y colectores, etc. Así mismo, el porcentaje de concentrado final que se obtiene del proceso de flotación depende específicamente de cómo se controlan dichas variables. Es importante; además, recalcar que los usos de los reactivos químicos detallados en la investigación son aquellos que brindan las propiedades y condiciones requeridas para la realización de un proceso óptimo de flotación.

Quinto. Mediante el control de las variables del proceso de flotación por herramientas como simulares, diagramas BPMN, tecnología de control específica, entre otras se logra una red integradora llamada automatización de procesos.

8.2. Recomendaciones

- El país para un mayor desarrollo tanto económico como social, debe tener instituciones que realicen publicaciones actualizadas sobre los resultados de los procesos mineros. Servirá para controlar y regular a las empresas mineras, y tener una cordial relación entre sociedad-empresa.

- Se recomienda impulsar una investigación profunda de cada una de las variables controladas en el proceso de flotación para ponerlas en práctica en laboratorios y proponer nuevas metodologías con datos cuantitativos actualizados a la fecha.
- Mediante un nuevo estudio de las variables utilizadas en el proceso de flotación se puede optimizar la calidad de concentrado de cobre y reducir los recursos utilizados que en este caso serían las cantidades de los reactivos químicos, entre otros recursos.

REFERENCIAS

- Aguilar, J. (2013). *Explotación minera, preparación y concentración*. Universidad Rafael Landívar. <http://recursosbiblio.url.edu.gt/Libros/2013/cmII/2.pdf>
- Aliaga, C. (2010). *Rediseño del control del proceso productivo de la división Los Bronces para implementarlo en un centro integrado de operaciones*. Universidad de Chile. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103798/cf-aliaga_cm.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Bravo, A. (2014). Constantes Vitales. *Revista de tecnología Evolution*, (1), 3 – 4. <http://evolution.skf.com/es/constantes-vitales/>
- Concha, J. y Wasmund, E. (2013). *Flotación de finos y gruesos aplicada a la recuperación de minerales de cobre*. Delta. <https://www.eriezflotation.com/pdfs/Flotacio%CC%81n%20de%20Finos%20y%20Gruesos%20Aplicada%20a%20Sulfuros%20de%20Cobre.pdf>
- Concha, J. y Wasmund, E. (2016). *Flotación de partículas gruesas aplicadas a minerales sulfurados de cobre*. Delta. https://www.eriezflotation.com/pdfs/Flotacio%CC%81n_Guadalajara_717.pdf
- Gobierno de Chile. (2016). Comisión chilena del cobre, consumo del agua en la minería del cobre al 2016. *Ministerio de Minería*. <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Consumo%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre%20al%202016%20-%20version%20final.pdf>
- Guillén, A. (2010). *Procesos de extracción y concentración de minerales* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional Autónoma de México.

- Kuroiwa, J., Castro, L. y Montenegro, J. (2014). Huella hídrica extendida del mineral de cobre en el Perú. *Universidad Nacional de Ingeniería*.
https://www.researchgate.net/publication/280446105_Huella_Hidrica_Extendida_del_Mineral_de_Cobre_en_el_Peru
- Lobato, A. (2011). Introducción a la metalurgia. *Perumin*, (31), 2-4.
<https://www.convencionminera.com/perumin31/images/perumin/recursos/Metalurgia%20IIMP%20Introduccion%20a%20la%20metalurgia.pdf>
- Matamorros, C. (2018). *Evolución de características de transporte de espuma en celdas de flotación* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María].
<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/24623/3560900258009UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Morral, F.R., Jimeno, E. y Molera, P. (2010). *Metalurgia general*. Editorial Reverte.
- N.N. (2018). Concentración de minerales. *Procesamiento de minerales*, (2), 1 - 1.
<https://procesaminerales.blogspot.com/2012/09/concentracion-minerales.html>
- Novoa, G. y Vargas, L. (2013). Variables y propiedades que influyen en el proceso de flotación. *Universidad de Azuay*.
- Pequeña, D. (2016). *Concentración de minerales*. Universidad Nacional de San Agustín.
- Ramírez, A. (2013). Minera Chilena. *CIDRA*.
https://www.cidra.com/sites/default/files/document_library/BI0492sp_Mineria_Chilena_APR.pdf
- Salas, A. y Hinojosa, O. (2012). *Avances tecnológicos en la concentración de minerales*. [Tesis de Doctorado, Universidad Técnica de Oruro]. Repositorio Institucional – Universidad Técnica de Oruro.

Zamora, C., Castelli, L., Bonomelli, A. y Schifferli, G. (2010). Un enfoque integral para la sustentabilidad a largo plazo de los beneficios de la automatización. *Kairos Mining*.

[https://www.codelco.com/flipbook/codelcodigital5/pdfs/10_AU_5_KAIROSMININ
G_CODELCO.pdf](https://www.codelco.com/flipbook/codelcodigital5/pdfs/10_AU_5_KAIROSMININ_G_CODELCO.pdf)