UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

ESTUDIO DE LA FLOTACIÓN DE COBRE PROVENIENTE DE ESCORIAS UTILIZANDO MEZCLAS DE AGUAS COMO AGUA DE PROCESO

Trabajo de Titulación para optar al Título de Técnico Universitario en MINERÍA Y METALURGIA

Alumna:
Sofía Andrea Salvo Zamora
Javiera Constanza Escobar Alfaro

Profesor Guía:
Magister Erik Kohnenkamp

2023

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN
PROBLEMÁTICA
OBJETIVOS
OBJETIVO GENERAL
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

CAPÍTULO 1: CARACTERIZAR MÉTODOS DE FLOTACIÓN CON AGUA DE MAR, MEDIANTE INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA, DETERMINANDO SU FACTIBILIDAD.
1.1. FLOTACIÓN
1.1.1. Reactivos
1.1.2. Etapas de la Flotación
1.2. DEMANDA DE AGUA EN LA MINERÍA DEL COBRE
1.2.1. Área Mina
1.2.1. Área Planta
1.3 AGUA DE MAR
1.3.1 Desalación del agua
1.1.2. Agua de mar en la Minería
1.4. FLOTACIÓN CON AGUA DE MAR

CAPITULO 2: GENERAR CURVAS DE RECUPERACIÓN DE COBRE PRESENTE EN ESCORIAS, MEDIANTE ENSAYOS DE FLOTACIÓN EN LABORATORIO, OBTENIENDO LA RECUPERACIÓN MÁXIMA ALCANZABLE DE COBRE.

2.1. ENSAYOS DE FLOTACIÓN EN LABORATORIO
Gráfico 1: Eficiencia Másica de Flotación
2.2. FLOTACIÓN CON AGUA DE MAR
2.2.1. PLANTA LAS LUCES
2.2.2. MINERA CENTINELA
2.3. RECUPERACIÓN DE COBRE Y MOLIBDENO CON AGUA DE MAR
2.3.1. Parámetros de recuperación de cobre y molibdeno

CAPÍTULO 3: ANALIZAR LA FLOTACIÓN CON AGUA DE MAR, MEDIANTE ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO APLICADA AL REEMPLAZO DEL AGUA DE PROCESO, VALIDANDO LA POSIBILIDAD DE DESARROLLAR ESTE CAMBIO AL PROCESO.

3.1. CONSUMO DE AGUA DE MAR EN LA MINERÍA

3.2. CORROSIÓN DEL AGUA DE MAR

3.3. CONSUMO DE AGUA EN LA MINERÍA CHILENA AL AÑO 2019

3.3.1. Tratamiento del Agua de Mar:

3.3.2. CÁLCULO DE COSTOS ASOCIADOS AL USO DE AGUA DE MAR

3.3.3. COSTOS ASOCIADOS

CONCLUSIÓN

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de las operaciones mineras en Chile, están ubicadas en el Norte grande del país (78%de las empresas de extracción de cobre), en gran parte de este territorio está localizado el desierto de Atacama, considerado el desierto más árido del mundo, donde se han registrado periodos de incluso 400 años sin lluvias en su sector central. Mientras que Arica, al ser una ciudad que se encuentra situada dentro del desierto de Atacama, ostenta el récord de poseer el promedio anual de lluvias más bajo a nivel mundial, alcanzando los 0,5 milímetros por año. En este territorio están solamente el 0,13% de las escorrentías de aguas nacionales, según estudios realizados por Cochilco.

En Chile existen siete fundiciones: Chuquicamata, Caletones, Altonorte, Potrerillos, Chagres, Hernán Videla Lira y Ventanas. De ellas, Chuquicamata, Potrerillos y Ventanas tiene una refinería. Cinco fundiciones están bajo el control de la cuprera estatal Codelco y la compañía nacional Enami, mientras que Altonorte y Chagres pertenecen a la firma suiza Glencore y a la londinense Anglo American, respectivamente.

La sequía que está viviendo la región de Coquimbo, es la más grave de los últimos 40 años, la que ha provocado que se encuentre en estado de catástrofe desde el año 2012. Por lo que evidentemente el territorio minero posee escasos recursos hídricos superficiales, y por otro lado enfrenta un escenario complejo debido al aumento de la demanda de agua por parte de las diversas actividades productivas, la ganadería, el consumo de la población, entre otras.

Debido a lo dicho anteriormente, es muy importante destacar lo que están realizando las empresas mineras como modo de mitigar esta escasez y apuntar a otras fuentes de extracción como el agua de mar, con el fin de desestresar las fuentes continentales de aguas frescas para sus operaciones.

Esta creciente escasez de agua dulce en la zona norte y centro del país, causada por su sobreexplotación y las escasas precipitaciones, así como por el aumento de temperaturas producto del Cambio Climático, llevó a las diferentes empresas al uso de agua de mar directamente sin tratar, o desalinizada mediante el proceso de Osmosis Inversa, proceso que se describe en el Capítulo 1.

Debido a lo expuesto anteriormente, se ha realizado este estudio utilizando agua de mar como agua de proceso, y también la escoria, de manera que se pueda reutilizar para darle un valor económico favorable.

PROBLEMÁTICA

En el proceso metalúrgico de la flotación, específicamente en el tratamiento de escoria, no existen estudios publicados del uso del agua de mar como agua de proceso. En la minería, actualmente el agua de mar está siendo muy utilizado, debido a la escasez de agua que existe a nivel mundial, por lo que debe ser cuidado tanto en las industrias, como también en los hogares.

En el último tiempo, se ha utilizado el agua de mar como una de las soluciones a la falta de disponibilidad de recurso hídrico. Es una solución viable y muy atractiva para el procesamiento de minerales, dado su bajo impacto hacia el medio ambiente y comunidades. Sin embargo, el uso de agua de mar trae consecuencias en las operaciones de flotación de cobre, debido a la interacción entre los componentes del agua de mar y los reactivos utilizados. El ejemplo más claro es la cal (principal reactivo depresante de pirita en la industria) constituye el reactivo más afectado por la presencia de agua de mar.

La cal es un regulador de pH para la flotación de cobre, el efecto que este tiene con el uso de agua de mar, es que este recurso funciona como efecto buffer, evitando que se alcancen los pH básicos requeridos para la flotación. A pH superior a 9.5, produce la precipitación de iones secundarios, por ejemplo, hidróxido de magnesio y carbonato de calcio, los cuales reaccionan con los iones hidróxidos perjudicando el rendimiento de la flotación de cobre en presencia de cal.

Las fundiciones de cobre en Chile por cada tonelada de cobre producido se generan alrededor de 2,2 toneladas de escoria y a nivel nacional se producen anualmente un aproximado de 4,5 millones de toneladas de escoria.

También, las escorias constituyen un pasivo ambiental y minero: se dejan acumuladas por mucho tiempo y no se le da ninguna reutilización operacional. Es por esto que se pensó en el impacto ambiental que pudiese llegar a tener a largo plazo y mejorando los sistemas de las plantas mineras y su almacenamiento. Además, no existe ningún estudio realizado sobre el tratamiento de escorias por lo cual se plantea este tema como material de investigación.

OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la factibilidad técnico-económica de la flotación de cobre presente en las escorias mediante el uso de distintas proporciones de mezcla de agua de mar y agua desionizada comparando con métodos tradicionales.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar métodos de flotación con agua de mar, mediante investigación bibliográfica, determinando la factibilidad de esta.
- Generar curvas de recuperación de cobre presente en escorias, mediante ensayos de flotación en laboratorio, obteniendo la recuperación máxima alcanzable de cobre.
- Analizar la flotación con agua de mar, mediante análisis técnico económico aplicada al reemplazo del agua de proceso, validando la posibilidad de desarrollar este cambio al proceso.

CAPÍTULO 1: MÉTODOS DE FLOTACIÓN CON AGUA DE MAR EN MINERÍA

1. MÉTODOS DE FLOTACIÓN CON AGUA DE MAR EN MINERÍA

1.1. FLOTACIÓN

La flotación es un proceso de concentración de minerales, que se realiza principalmente en la minería. Éste permite concentrar el cobre de la pulpa de material mineralizado, proveniente del proceso de molienda.

La figura 1-1, muestra el diagrama de las etapas que ocurren antes de llegar la etapa de flotación.

Fuente: Elaboración propia

Figura 1-1. Diagrama de flujo de Flotación

La flotación utiliza celdas, en las cuales se inyectan gases para formar burbujas desde el fondo, normalmente aire, de manera que las partículas de cobre presentes en la pulpa se adhieran a las burbujas de aire, formando un agregado burbuja-mineral, pudiendo transportar las partículas de material, hasta la zona de espuma. Esta espuma rebosa hacia canaletas que bordean las celdas, para luego ser trasportadas a la etapa siguiente.

Además, se le agregan reactivos como: colectores, depresores, espumantes y otros aditivos. Estos reactivos ayudan a aumentar la selectividad del proceso de flotación, es este caso de cobre, para que la mayor cantidad de cobre posible sea extraído y pase a la siguiente etapa.

Existen distintas etapas dentro de la flotación, las cuales son: Rougher, Scavenger y Cleaner.

En este proceso se utiliza agua desalinizada, pero también se puede utilizar agua de mar donde hay que tener en cuenta los componentes químicos presentes los cuales se deben controlar porque pueden afectar al proceso y reaccionar de mala manera con los reactivos.

1.1.1. Reactivos

Los reactivos colectores tienen la función de hacer que las partículas de cobre y molibdeno se vuelvan hidrofóbicas. Su objetivo es que el mineral para que este se separe del agua y se adhiera a las burbujas de aire.

Los reactivos depresores tienen por función generar el efecto inverso que los reactivos colectores, es decir, inhiben la hidrofobicidad de los minerales. Estos son seleccionados para disminuir la recuperación de minerales que no son de interés, los cuales en la práctica están presentes en las "piscinas". Por ejemplo, la pirita es un sulfuro que no tiene cobre, por ende, se agregará un colector que impida su paso a la espuma.

Los reactivos espumantes generan burbujas resistentes. Esto es que las burbujas permanezcan estables durante su ascenso desde el fondo de la celda, hasta la zona de espuma.

Y otros aditivos cumplen la tarea de estabilizar la acidez del material en un valor de pH determinado, para que el proceso de flotación pueda llevarse a cabo sin problemas. Un ejemplo de estos aditivos es la cal.

1.1.2. Etapas de la Flotación

1.1.2.1. Rougher

La flotación primaria o también conocida como etapa Rougher consiste en recuperar una alta proporción de las partículas valiosas, utilizando las mayores concentraciones de reactivos (colectores y/o depresores del circuito), altas velocidades de agitación y baja altura de la zona de espumas, siendo este selectivo. Y eliminando gran parte de la ganga, opera con la mayor granulometría posible.

El concentrado Rougher, no es un producto final y deberá pasar a las etapas de limpieza o Cleaner.

Al circuito Rougher llega la alimentación del proceso de flotación, como también puede llegar los concentrados de la etapa Scavenger o las colas de la etapa Cleaner.

1.1.2.2. Scavenger

La flotación Scavenger es una etapa en la que se recupera la mayor cantidad de mineral valioso posible. Su relave es el descarte final, mientras que su concentrado deberá retornar generalmente a la etapa Rougher para incrementar su ley.

Las cargas circulantes deben tener concentraciones (o leyes) similares a los flujos a los cuales se unen; así el concentrado Scavenger deberá tener una ley cercana a la de alimentación fresca y al relave de la primera limpieza ya que los tres se unen.

1.1.2.3. Cleaner

La flotación de limpieza o etapa Cleaner se utiliza para describir las operaciones en las que los concentrados primarios o la de las unidades de procesamiento están sujetas a flotaciones repetidas para mejorar la calidad del concentrado.

Su finalidad es obtener concentrados de alta ley, en desmedro de la recuperación. En algunos casos en estas etapas para hacer más selectivo el proceso, se requieren bajos porcentajes de sólidos en las pulpas de flotación, menores velocidades de agitación, mayor altura en la zona de espumas y principalmente menor concentración de reactivos colectores que en la etapa Rougher. También es habitual añadir a esta etapa reactivos depresores que incrementan la selectividad de la flotación.

Los relaves de la etapa Cleaner generalmente no son descartados y regresan para su retratamiento a la etapa Rougher.

1.2. DEMANDA DE AGUA EN LA MINERÍA DEL COBRE

1.2.1. Área Mina

Las minas a rajo abierto, en general, se explotan por un sistema de bancos o cortes escalonados que involucran perforación, tronadura, carguío y transporte tanto del mineral hacia la planta de tratamiento como del material estéril (lastre o minerales de baja ley) a los botaderos. En este caso, el mayor consumo de agua viene dado por la supresión de polvo en los caminos, variando según la superficie expuesta, el clima y la morfología del terreno, entre otros factores. En la etapa de perforación se requiere del recurso tanto para la perforación con agua o espumas. El volumen de pérdida de agua durante las actividades de perforación depende, en gran medida, de las condiciones del subsuelo. Ejemplos de ello son el grado de fractura de la roca, el clima, la permeabilidad de la roca y la presencia de fallas.

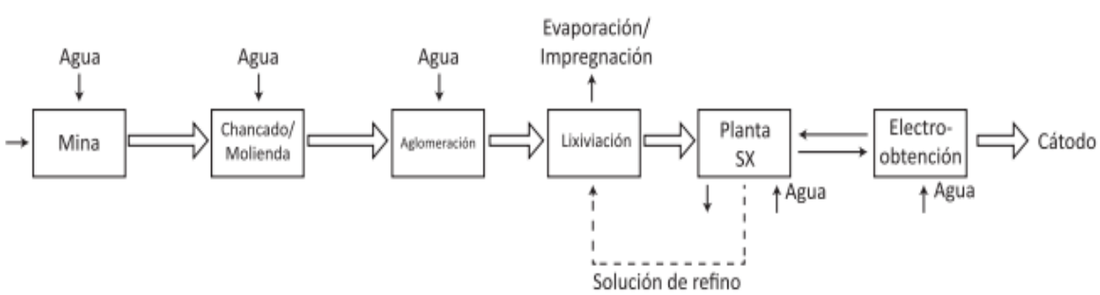
Las minas subterráneas que explotan yacimientos de cobre en forma masiva utilizan generalmente el sistema de hundimiento de bloques. En el nivel inferior, que corresponde

a producción, se extrae el mineral. En esta etapa, el mineral es transportado mediante camiones, correas y/o por ferrocarril, hasta las plantas de tratamiento. En la explotación de minerales de cobre en minas subterráneas se hace menor uso de agua, ya que no es necesaria la supresión de polvo en suspensión en la misma medida que en la minería a cielo abierto. Luego, el mineral es sometido a una etapa de trituración o de chancado primario, con el fin de reducir el tamaño de la roca. El equipo triturador o chancador generalmente está ubicado junto al rajo, desde donde se traslada el mineral machacado a la planta para continuar con el proceso de molienda. A partir de la planta de tratamiento, los procesos son diferentes según se trate de minerales oxidados o sulfurados.

1.2.1. Área Planta

Mediante la molienda, se continúa reduciendo el tamaño de las partículas que componen el mineral, para obtener la granulometría deseada, que permite finalmente la liberación de la mayor parte de los minerales de cobre en forma de partículas individuales. Al interior del molino SAG, el material seco se mezcla con agua. Esta mezcla de material molido mezclado con agua se llama pulpa. La molienda húmeda precisa menos energía por tonelada de mineral tratado y exige menos espacio que la clasificación en seco. El cobre se obtiene a partir de dos tipos de minerales: sulfuros y óxidos.

Tratamiento de minerales oxidados:

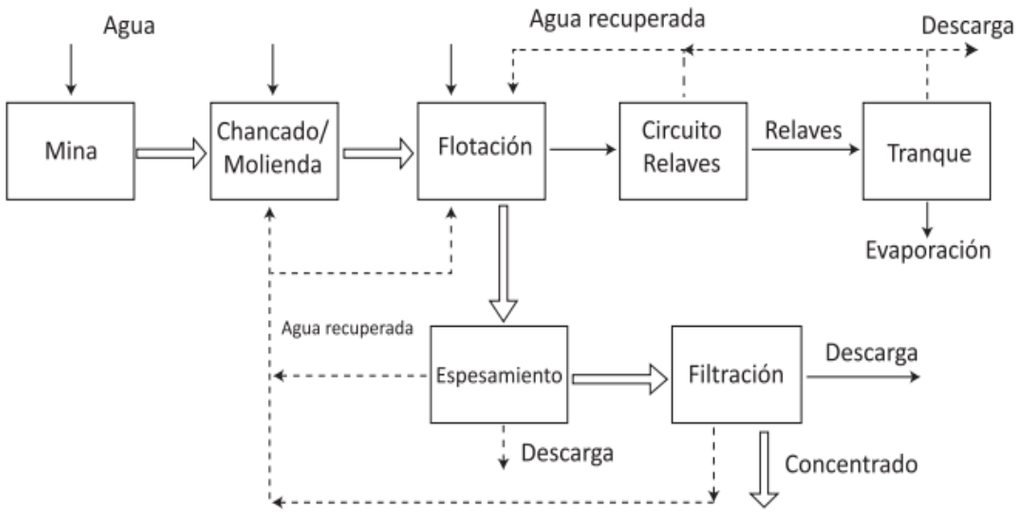


Fuente: COCHILCO, Consumo de Agua en la Minería 2017[2]

Figura 1-2. Uso de agua en el procesamiento de minerales oxidados.

En el caso de los minerales oxidados en el proceso de hidrometalurgia los principales consumos resultan como consecuencia de la evaporación de las pilas, el descarte de las soluciones y el lavado de las soluciones orgánicas.

Tratamiento de minerales sulfurados- concentradora



Fuente: COCHILCO, Consumo de Agua en la Minería 2017

Figura 1-3. Uso de agua en el procesamiento de minerales sulfurados

Luego del chancado, el mineral se somete a un proceso de molienda húmeda, obteniéndose el material apto para la flotación.

Los consumos más significativos de agua en la planta concentradora se presentan en la flotación, el transporte de pulpa, concentrados y relaves, y por evaporaciones e infiltración de los tranques de relaves.

Tabla 1-1. Principales fuentes de agua para las operaciones mineras

Fuente	Descripción
Lagos y Ríos	Reciben su aporte desde la escorrentía y/o acuíferos dentro y a lo largo de su área. Son susceptibles a cambios estacionales en su nivel y caudal.
Manantiales	Afloramiento de aguas subterráneas.
Aguas lluvias	Se entiende por aguas pluviales aquellas que proceden inmediatamente de las lluvias.
Escorrentía	Flujo temporal sobre la superficie, producto de las precipitaciones.
Salares	Por debajo de las lagunas de agua salobre, frecuentemente existen depósitos de agua con una menor concentración de agua salina.

Aguas Subterráneas	Acuíferos profundos con recarga de fuentes de precipitación lejanas. Los acuíferos poco profundos, ocasionalmente son capaces de almacenar lo suficiente.
Aguas alumbradas o de contacto (aguas del minero)	Salen a la superficie por el esfuerzo del hombre y pertenecen al que las ha alumbrado.
Embalses	Construcción de embalses para almacenar el agua que fluye en un rio en periodo de caudales altos, para liberar en periodos de mayor escasez, de tal manera de obtener fluido uniforme.
Agua de mar	Esta puede ser utilizada directamente en el proceso, una vez adaptado para aceptar la concentración salina, o agua previamente desalinizada.

1.3. AGUA DE MAR

El agua de mar o agua salada corresponde al agua que compone los océanos y mares el que corresponde al 70% de la superficie de la tierra. El agua de mar es una mezcla compleja compuesta de 96,5% de agua, 2,5% de sales y cantidades pequeñas de otras sustancias, incluyendo materiales inorgánicos y orgánicos disueltos, partículas y algunos gases atmosféricos. Está compuesta de sales minerales, principalmente cloruro de sodio.

Toda solución en estado líquido tiene un pH en específico para cada sustancia. El pH se puede definir como una medida de acidez o alcalinidad de una sustancia, que va de un rango 0 al 14, donde el 0 representa la acidez máxima, el 14 representa el nivel básico máximo y 7 representa el nivel medio de la escala, siendo este neutro. Si los valores son menores que 7 indican que la muestra es ácida y si son mayores que 7 indican que la muestra es básica. El agua de mar tiene un pH de 7.5 a 8.4, el cual puede variar dependiendo de la temperatura. Debido a sus valores de pH corresponde a una sustancia alcalina.

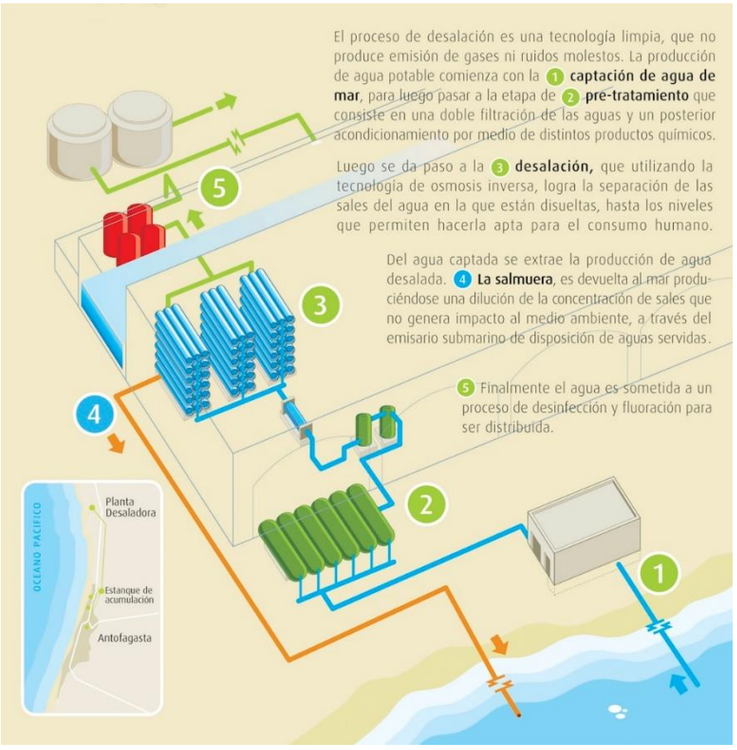
El agua de mar es una rica fuente de elementos químicos comercialmente importante. Gran parte del magnesio del mundo se toma del agua de mar, al igual que grandes cantidades de bromo. El agua de mar, cuando se desala puede proporcionar suministro ilimitado de agua potable, que se puede utilizar en los procesos mineros y alimentar una planta minera.

1.3.1. Desalación del agua

La desalación de agua de mar es una propuesta para asegurar el suministro hídrico de manera sustentable. El proceso es una tecnología limpia que no produce emisión de gases ni ruidos logrando la separación de las sales del agua en la que están disueltas, hasta los niveles que permitan hacerla apta para el consumo humano.

Para realizar este proceso, se debe contar con una planta desaladora, la que captura agua salada proveniente del mar, para procesarla hasta habilitarla para el consumo humano y los usos industriales y agrícolas.

En la Figura 1-2, se muestra un esquema de una planta desaladora, la cual es utilizada en la empresa Aguas Antofagasta, por ejemplo.



Fuente: Aguas Antofagasta.

Figura 1-4. Proceso de una planta desaladora

Como se ve en la Figura 1-2, consiste en una construcción amplia que se ubica generalmente cerca del mar, porque cuanto más cercana se encuentre a la costa, menor será el requerimiento energético que deberá realizar para el bombeo de agua.

A continuación, se presenta el proceso de una planta desaladora de agua. Consiste en 5 etapas, las que son enumeradas a continuación:

1. Captación de agua de mar.
2. Pre-tratamiento, que consiste en una doble filtración de las aguas y acondicionamiento por medio de productos químicos.
3. Desalación, mediante el método de osmosis inversa, logra la separación de las sales del agua en la que están disueltas, hasta que sea apta para el consumo humano.
4. La salmuera, es devuelta al mar produciéndose una dilución de la concentración de sales que no genera impacto al medio ambiente, a través del emisario submarino de disposición de aguas servidas.
5. Proceso de desinfección y fluoración para ser distribuida.

La desalinización del agua puede realizarse por medio de diversos procedimientos, entre los que podemos mencionar los siguientes [1]:

- Ósmosis inversa.
- Destilación.
- Congelación.
- Evaporación relámpago.
- Formación de hidratos.

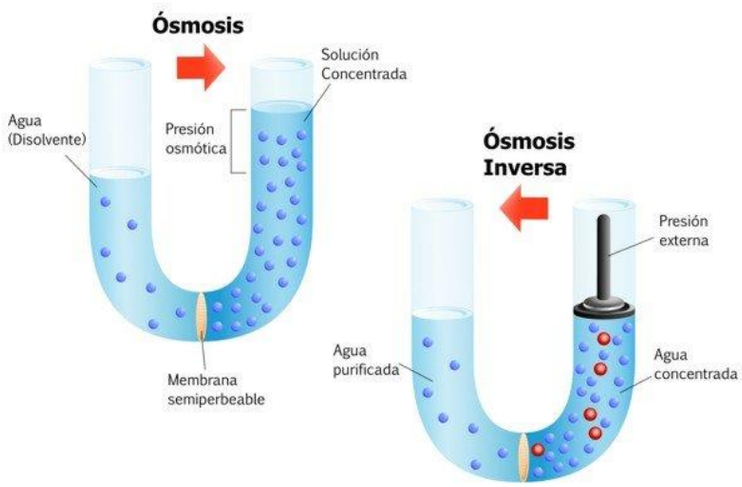
El método más utilizado y extendido para la desalación de agua es el de ósmosis inversa.

1.3.1.1. Ósmosis inversa

La Osmosis es un proceso natural que ocurre en los tejidos de plantas y animales. De forma esquemática se puede decir que cuando dos soluciones con diferentes concentraciones (formadas por un solvente y un soluto disuelto en el solvente), se unen a través de una membrana que permite el paso del solvente, pero no del soluto, existe una circulación natural del solvente a través de la membrana, desde la solución menos concentrada hacia la de mayor concentración. La diferencia de altura obtenida se traduce en una diferencia de presión, llamada presión osmótica.

Sin embargo, aplicando una presión externa que sea mayor a la presión osmótica de una disolución respecto de otra, el proceso se puede invertir, haciendo circular el solvente desde la solución más concentrada y a la solución con menor concentración, obteniendo finalmente un agua de pureza admisible.

La siguiente imagen representa la descripción del proceso de ósmosis inversa.



Fuente: Osmoaqua.

Figura 1-13. Osmosis inversa.

1.3.1.2. Destilación

Técnica de separación de sustancias que permite separar los distintos componentes de una mezcla. Se basa en calentar un líquido hasta ebullición, los vapores pasan a un condensador que los enfría y pasa a estado líquido, obteniéndose agua dulce.

1.3.1.3. Congelación

Se pulveriza agua de mar en una cámara refrigerada y a baja presión, con lo que se forman unos cristales de hielo sobre la salmuera, estos cristales se separan y se lavan, para obtener agua dulce.

1.3.1.4. Evaporación relámpago

El agua es introducida en forma de gotas finas en una cámara a presión baja, por debajo de la presión de saturación. Parte de estas gotas de agua se convierten en vapor para ser condensadas, obteniendo agua desalinizada. Estas plantas pueden contar más de 24 etapas de desalinización relámpago. A este proceso se le conoce como MSF (evaporación multietapa).

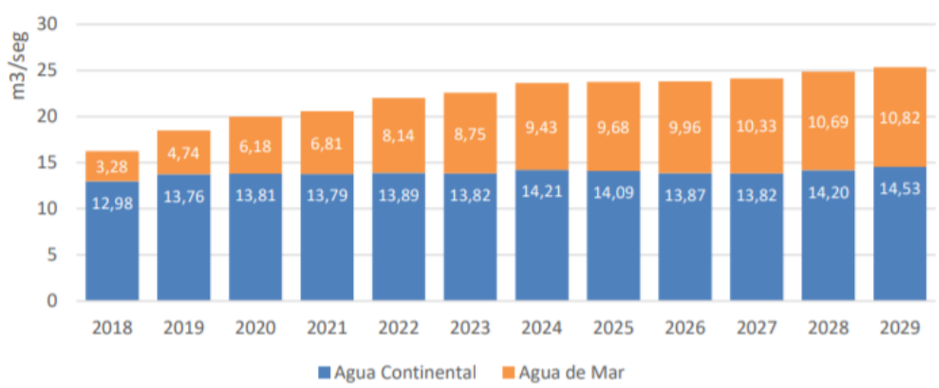
1.3.1.5. Formación de hidratos

Se basa en el principio de la cristalización, que consiste en obtener, mediante la adición de hidrocarburos a la solución salina, unos hidratos complejos en forma cristalina, con una relación molécula de hidrocarburo/molécula de agua del orden de 1/18.

1.3.2. Agua de mar en la Minería

El agua de mar es un recurso muy utilizado en la minería, ya que es esencial para todos los procesos, tanto en hidrometalurgia como en los procesos de flotación. La proyección del consumo de agua en la minería se basa en aplicar a la proyección de producción de cobre de Cochilco, los respectivos coeficientes unitarios de consumo de agua para obtener la demanda futura de un determinado periodo.

En la siguiente figura se busca calcular la proyección de demanda de agua continental y de mar por parte de la industria minera del cobre, y realizar un análisis detallado, considerando una visión por región, proceso, estado de avance, condición, estado de los permisos ambientales.



Fuente: Cochilco, Proyección de Demanda de agua 2018

Figura 1-24. Proyección de demanda de agua en la minería del cobre 2018-2029.

De acuerdo a la imagen anterior, se observa que al año 2029 alcanzará 14,5 m³/s de agua continental lo que representa un bajo aumento con respecto al 2018. En cambio, la demanda de agua de mar durante esos mismos años aumenta de manera considerable siendo el 2018 de 3,18 m³/s y al año 2029 es de 10,82 m³/s, esto corresponde un aumento del 230%.

Esto se debe a que el agua de mar en la minería se vuelve un consumo necesario mejorando los costos que conllevan tener una planta desaladora o agua de mar directa, siendo factible técnica como económicamente.

1.4. FLOTACIÓN CON AGUA DE MAR

El agua de mar tiene diferentes gases disueltos como lo son el nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono, esta última reacción con agua de mar forma bicarbonato de sodio. También hay otros gases disueltos en pequeñas cantidades, entre ellos argón, criptón, xenón, neón y helio.

La presencia de estos elementos en el agua de mar genera cambios que pueden afectar a los procesos de flotación, debido a que la salinidad tiene un efecto sobre las propiedades fisicoquímicas del agua. Otro factor que influye es la salinidad en los procesos de minerales, es la tensión de presión y la superficie de vapor ya que están asociados a la evaporación del agua y la interacción con las partículas sólidas.

Para el uso de agua de mar en la minería es necesario tener en cuenta cambios en las propiedades fisicoquímicas que pueden afectar a las tensiones de superficie, densidad, viscosidad y presión de vapor, entre otras propiedades. El efecto del agua de mar sobre la solubilidad de algunos gases puede cambiar el potencial de las soluciones y el pH de las soluciones que afectan a la estabilidad de algunas especies.

La presencia de agua de mar tiene un efecto variado en la flotabilidad de diferentes sulfuros de metales básicos, como son los siguientes:

- El agua de mar podría tener un efecto beneficioso sobre la flotación de minerales ya que el efecto de los revestimientos de limo se reduce.
- La flotación de calcopirita no es suficientemente sensible a los efectos del agua de mar.
- El agua de mar disminuye la recuperación de calcocita y bornita, esto se puede mejorar mediante el uso de colectores.
- La disminución en la recuperación de molibdenita en condiciones alcalinas altas. Esto es debido a la deposición de Ca y Mg complejo en las superficies de molibdenita y posterior precipitación. En este sentido, se han propuesto nuevas alternativas como el uso de agua de mar con precipitación parcial de calcio y magnesio en lugar de la desalinización completa por ósmosis inversa.

El uso de agua de mar como una alternativa al agua dulce en las operaciones de flotación se está convirtiendo cada vez más importante. Sin embargo, el tema es complejo, y en muchos casos requieren investigaciones más detalladas, como se menciona a continuación:

- La oxidación de sulfuro de cobre y la interacción galvánica entre las superficies de pirita y minerales de cobre ha sido bien abordado en agua dulce. Sin embargo, hay una falta de conocimiento acerca de la oxidación en agua de mar.
- En un ambiente salino alto, cambia la interacción de partículas con superficies de impacto sobre las propiedades reológicas de las pastas. Sin embargo, no hay estudios que evalúan las propiedades reológicas de las pulpas minerales de sulfuro en agua de mar y su relación con el rendimiento de la flotación.
- La falta de conocimiento sobre el comportamiento de los reactivos como lo son los espumantes y colector de cobre. Por ejemplo, muchos depresores de pirita orgánicos sólo se han probado en agua dulce. Lo mismo sucede con los colectores de molibdenita, que podrían ser útiles para hacer frente a los efectos perjudiciales de la dureza del agua de mar.

CAPITULO 2: RECUPERACIÓN DE COBRE EN ESCORIAS MEDIANTE ANÁLISIS QUÍMICO DE FLOTACIÓN.

2. RECUPERACIÓN DE COBRE EN ESCORIAS MEDIANTE ANÁLISIS QUÍMICO DE FLOTACIÓN.

2.1. ENSAYOS DE FLOTACIÓN EN LABORATORIO

Para este trabajo, se realizaron 4 pruebas de laboratorio utilizando agua desalinizada y agua de mar en distintas proporciones, también se utilizó escoria proveniente de la Fundición Ventanas de CODELCO, almacenada en el laboratorio metalúrgico de la Universidad Federico Santa María, sede Viña del Mar.

Para poder llevarlo a cabo, se debieron investigar diferentes pruebas de flotación realizadas con escoria, para así tener referencia respecto a los parámetros a utilizar.

2.1.1. Resumen del experimento:

A diferencia de los procesos realizados en la industria minera con agua de mar, que en su mayoría son realizados con aguas tratadas con osmosis inversa, en este caso se utilizó agua de mar pura sin tratar. Para poder generar las curvas de recuperación también fue utilizada agua desmineralizada, variando los porcentajes de eficiencia técnica correspondientes.

Proceso de Chancado:

Para dar inicio al proceso de conminación de minerales, se comenzó por utilizar el chancador de mandíbula marca TM Engennerin Rhino a escala de laboratorio, debido a que el material a utilizar era escoria en forma de roca, utilizando de manera inicial 6 kg de material, y utilizando para cada prueba de chancado 1 kg de esta.

El chancador de mandíbula, cumple la función de triturar rocas duras y minerales, pero también se puede utilizar para triturar materiales menos exigentes.

Este equipo realiza esta labor mediante la compresión, utilizando una mandíbula fija y una móvil en forma de V. Durante el proceso, la parte móvil comprime el material contra la parte fija, ejerciendo presión hasta que el material se encuentre en el tamaño deseado.

Al finalizar este proceso, el material ya triturado sale por la abertura de descarga, que está ubicada en la parte inferior del equipo. El tamaño del material triturado se puede

configurar previo a la molienda, ya que se utiliza generalmente en la primera parte del proceso de reducción de tamaño.

Fuente: Propia.

Figura 2-1. Chancador de mandíbula a escala de laboratorio.

Proceso de molienda:

Una vez chancado el mineral, fue llevado al molino de bolas marca Leeson a escala de laboratorio. Para comenzar se introdujo el material a procesar, en este caso fueron pruebas de 1 kg de material cada una, con el objetivo de lograr la mayor reducción de tamaño posible, luego se introdujeron las bolas, se cerró cuidadosamente el molino y lo encendimos. Se programó para que diera 100 vueltas.

El molino de bolas es un equipo rotatorio que, mediante el movimiento de rotación, promueve la colisión sucesiva de las esferas, las que son responsables de la ruptura progresiva del material, reduciéndolo en partículas más pequeñas. La acción del choque provoca que el material se reduzca a un tamaño de partícula más fino, siendo indicado para material de alta dureza y de difícil fragmentación. El uso de bolas de material con alta densidad, es capaz de proporcionar un triturado más eficiente y asegura la obtención de partículas más finas.

Fuente: Propia.

Figura 2-2. Molino de bolas a escala de laboratorio.

Proceso de Tamizaje:

La principal función de un tamiz de laboratorio, es separar las distintas fracciones de una muestra en función al tamaño de las partículas. Existen tamices automatizados, que mediante la vibración realizan la acción de tamizar.

Los equipos de tamizaje Rot-up funcionan disponiendo un tamiz sobre otro, que deben ir desde el más grande en la parte superior, hasta el más pequeño en la parte inferior, elegidos previamente dependiendo del tamaño de corte del material. Estos van sobre una plataforma vibratoria, lo que hace que la muestra vaya pasando por los distintos tamices como una cascada. El funcionamiento consiste en movimientos circulares o rotatorios, en conjunto con movimientos de golpeteo vertical, lo que asegura un tamizado preciso y rápido para las muestras.

Fuente: Propia.

Figura 2-3. Rot-up a escala de laboratorio.

Para iniciar las pruebas de flotación con escoria a escala de laboratorio, primero el material debió ser sometidos a procesos de chancado, molienda y obtener una granulometría bajo malla #100 (150 µm) y obtener 917 gr de escoria para cada ensayo. La cantidad de agua utilizada será la siguiente:

Ensayo 1: 75% de agua de mar y 25% de agua desionizada.
Ensayo 2: 50% de agua de mar y 50% de agua desionizada.
Ensayo 3: 25% de agua de mar y 75% de agua desionizada.
Ensayo 4: 100% de agua desionizada.

Se debe homogeneizar por 3 min, los tiempos de comparación serán de 1, 3, 4 y 5 min para cada ensayo y las variables a comparar son el tiempo y la proporción de agua utilizada.

Se requerirá de una celda de flotación de 2L y los reactivos MIBC y AP3977. Para esto debemos calcular la cantidad de reactivos que se deben agregar en cada ensayo. La densidad de la escoria es de 2,8 gr/mm³ y la densidad de agua de mar es 1,02 gr/mm³.

Metil Isobutil Carbinol (MIBC) es un alcohol muy poco soluble en agua, pero miscible con la mayoría de los disolventes orgánicos. Es por mucho el alcohol más utilizado como espumante en variados circuitos de flotación de minerales de sulfuros metálicos de cobre, molibdeno, metales preciosos, minerales conteniendo oro, minerales polimetálicos de plomo cinc plata y flotación de minerales no metálicos, tal como carbón, entre otros.

MIBC es de un espumante de acción rápida que genera una espuma fina, seca y de buena sustentación en las celdas de flotación, pero que fluye y se disgrega con rapidez en los canales colectores de concentrados. El producto es particularmente selectivo en la recuperación de partículas finas del mineral valioso y no solo contribuye a incrementar el rendimiento de la flotación, sino también a mejorar la calidad del concentrado de mineral.

MIBC es compatible con los colectores usuales en los circuitos de flotación y puede ser usado en un amplio rango de pH, desde ácido a alcalino.

AP3977 es un colector en base a potasio que su función es favorecer la condición hidrofóbica (repele el agua) y aerofílica (afinidad con el aire) de las partículas de sulfuros de los metales que se quiere recuperar, para que se separen del agua y se adhieran a las burbujas de aire.

Para esto se debe calcular la densidad de la pulpa:

$$\rho_{pulpa} = \frac{100}{\frac{35}{2,8} + \frac{65}{1,02}} = \frac{100}{76,23} = 1,31\ gr/mm^3$$

La cantidad de reactivos a agregar se calcula se la siguiente manera:

$$\rho_{MIBC} = 0,802\ \frac{gr}{cm^3}$$

$$\rho_{AP3977} = 1,147\ \frac{gr}{cm^3}$$

Cálculo para cantidad de reactivo:

$$v = \frac{m}{\rho}$$

$$V_{MIBC} = \frac{m\ de\ pulpa}{\rho MIBC} = \frac{0,131\ gr}{0,802\ \frac{gr}{cm^3}} = 0,163\ cm^3$$

$$V_{AP3977} = \frac{m\ de\ pulpa}{\rho AP3977} = \frac{0,131\ gr}{1,147\ \frac{gr}{cm^3}} = 0,114\ cm^3$$

Para los ensayos, se requiere de las siguientes proporciones de agua:

1° Flotación: 1348 ml de agua de mar (75%) y 485 ml de agua desionizada (25%).

2° Flotación: 852 ml de agua de mar (50%) y 852 ml de agua desionizada (50%).

3° Flotación: 485 ml de agua de mar (25%) y 1348 ml de agua desionizada (75%).

4° Flotación: 1833 ml de agua desionizada (100%).

Tabla 2-1. Tabla de la cantidad de agua utilizada para cada ensayo de flotación

	1° Flotación	2° Flotación	3° Flotación	4° Flotación
Agua de Mar	1348 ml	852 ml	485 ml	0 ml
Agua desionizada	485 ml	852 ml	1348 ml	1833 ml
Reactivo MIBC	163 µl			
Reactivo AP3977	114 µl			
Escoria	917 gr			

Una vez realizadas los ensayos de flotación, se deben dejar secando las muestras a 105°C por 24 horas y obtienen los siguientes pesos:

Tabla 2-2. Tabla de Flotación en Muestras Secas

Tiempo (minutos)	1° Flotación (gr)	2° Flotación (gr)	3° Flotación (gr)	4° Flotación (gr)
1	1,9	4,5	5,2	10,7
3	6,7	6,3	10,5	22,3
4	8,1	5,2	9,7	27,2
5	4,9	3,9	8,9	23,4

En la tabla a continuación, se muestran los valores obtenidos de una eficiencia técnica en forma másica:

Tabla 2-3. Tabla de Eficiencia Másica

Tiempo (minutos)	1° Flotación (gr)	2° Flotación (gr)	3° Flotación (gr)	4° Flotación (gr)
1	0,0021	0,0049	0,0057	0,0117
4	0,0094	0,0118	0,0172	0,036
8	0,0182	0,0175	0,0278	0,0657
13	0,0235	0,0217	0,0375	0,0912

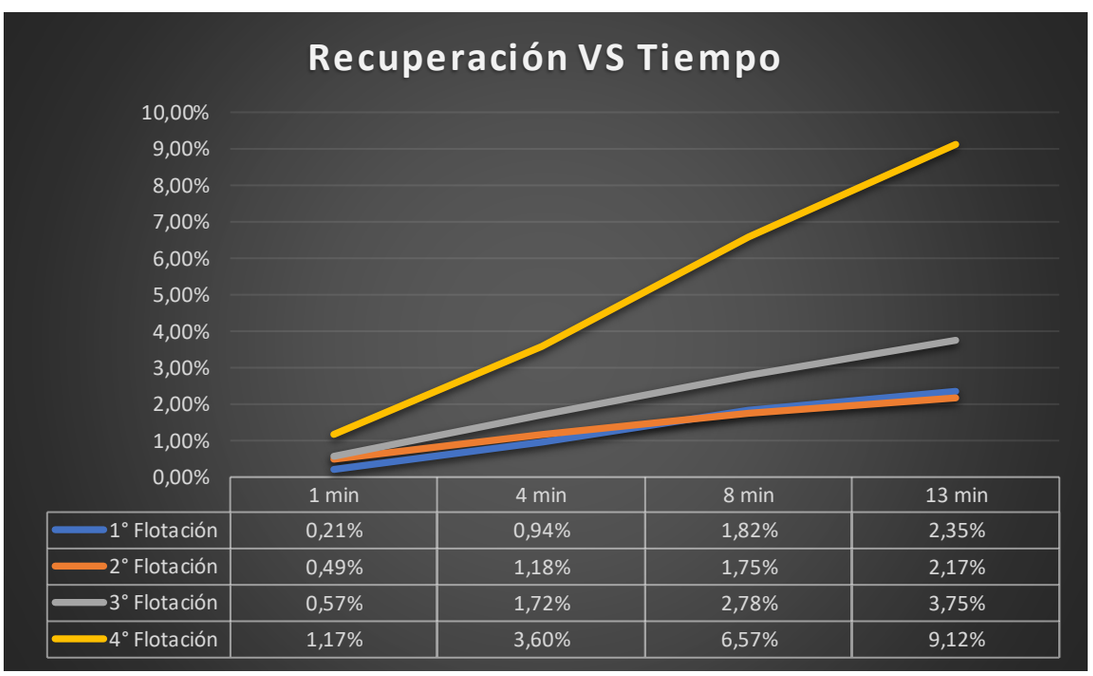


GRÁFICO 1: EFICIENCIA MÁSICA DE FLOTACIÓN

En el Gráfico N°1 se evidencia el comportamiento de las 4 muestras de escoria, las cuales fueron sometidas a un proceso de flotación alrededor de 13 min, Donde se recupera mineral en los períodos de 1, 4, 8 y 13 min, cabe destacar que cada muestra fue realizada con distintas proporciones de agua de mar y agua des-ionizada

Flotación N° 1: 75% agua de mar y 25% agua des-ionizada
Flotación N° 2: 50% agua de mar y 50% agua des-ionizada
Flotación N° 3: 25% agua de mar y 75% agua des-ionizada
Flotación N° 4: 100% agua des-ionizada

Como se puede apreciar en el gráfico N°1, pasado 1 minuto de flotación la primera muestra tiene menor recuperación de cobre debido a las impurezas del agua de mar, ya que, esta al no estar tratada y afecta en el proceso de recuperación. En cambio, al utilizar sólo agua des-ionizada se demuestra lo explicado anteriormente que facilita el proceso de flotación, el mejor ejemplo de esto es los obtenido en la flotación N°4, la cual tiene poco más de 9% de recuperación.

En resumen, se puede concluir que a mayor porcentaje de agua des-ionizada versus agua de mar, mayor es la recuperación de mineral en el proceso de flotación.

2.2. FLOTACIÓN CON AGUA DE MAR

2.2.1. PLANTA LAS LUCES

En Chile, existe la planta "Las Luces" ubicada en la ciudad de Taltal en la región de Antofagasta, esta pertenece a la propiedad del Grupo Minero Las Cenizas. Mediante sus procesos de concentración de minerales utiliza agua de mar sin tratar, es decir, no utiliza ningún proceso para desalar el agua.

En la planta de Las Luces, el agua de mar se mezcla con el agua de la presa de relaves en el estanque de almacenamiento industrial. El agua mezclada se utiliza en los circuitos de molienda y flotación. La planta de beneficio de Las Luces ha estado utilizando con éxito el agua de mar durante más de 15 años a través de un inteligente esquema de recirculación de agua.

Esta planta comprende operaciones de unidades de chancado, molienda y flotación. Consta de 3 etapas de chancado, el chancado primario con un chancador de mandíbula, el chancado secundario y terciario con un chancador de cono. En la molienda

utilizan molinos de bolas, luego pasa por un hidrociclón que clasifica las partículas donde el mineral grueso (que sale por el underflow, por abajo del hidrociclón) se devuelven al molino y el mineral fino (que sale por el overflow, por arriba del hidrociclón) se va a flotación. Los minerales de óxido y sulfuro se almacenan y tratan por separado.

El objetivo de grado de cobre es de 30% Cu y para el concentrado de molibdeno es 45% Mo (con menos de 3% Cu). La alimentación de flotación con minerales de cobre principalmente son calcopirita y calcocita, con molibdeno sobre todo molibdenita.

Las recuperaciones y calidades del concentrado de cobre obtenido varían de acuerdo con el origen del mineral. Cuando se procesan minerales altos de calcocita, a veces hay problemas con el cobre soluble y las recuperaciones de cobre son más bajas, por lo general entre el 72 y el 78% en comparación con las recuperaciones más normales del 82 al 90%. En promedio, la recuperación de Cu es de alrededor del 84%.

Los concentrados de Cu-Mo se tratan en la planta de molibdeno para separar el Cu y el Mo, utilizando un tratamiento convencional con sulfuro de hidrógeno y sodio (NaSH) y múltiples etapas de limpieza. La recuperación de Mo en la planta de Mo es de alrededor del 52%.

En la planta de Las Luces, las etapas de molienda y flotación se alimentan desde el estanque de almacenamiento industrial que contiene 46,4 g/L de sal disuelta total. Esto indica que el contenido total de sal disuelta en el agua de mar ha aumentado en aproximadamente 10,4 g/L como resultado del reciclaje continuo de agua de mar durante los últimos 15 años. Esta cantidad, en promedio, representa un aumento de aproximadamente 0.73 g/L por año, asumiendo que las condiciones de operación de la planta se mantuvieron sin cambios durante este tiempo.

2.2.2. MINERA CENTINELA

Minera Centinela es una operación del Grupo chileno Antofagasta Minerals, ubicada en la Segunda Región de Antofagasta, específicamente a 21 kilómetros de la localidad de Sierra Gorda y está ubicada a 2300 m.s.n.m. Esta utiliza agua de mar sin pretratamiento alguno y el principal desafío de esta planta es el bombeo del agua de mar hacia la planta de flotación.

A pesar de que la planta Las Luces y minera Centinela realizan el mismo proceso de concentración de minerales con agua de mar, la mayor diferencia que existe entre ellas es la ubicación. Debido a que la planta Las Luces se encuentra cercana a la costa, en cambio, minera Centinela tiene que utilizar un mejor sistema de bombeo para que el agua llegue desde el mar hacia donde se encuentra ubicada por su altura sobre el nivel del mar.

2.3. RECUPERACIÓN DE COBRE Y MOLIBDENO CON AGUA DE MAR

Las recuperaciones de cobre y molibdeno son más bajas cuando los minerales de sulfurados de Cu-Mo se flotan en el agua de mar. La alta salinidad del agua de mar parece ser el principal factor responsable, la presencia de electrolitos inorgánicos también afecta la capacidad de formación de espuma de las pulpas de flotación, lo que plantea de que, si el agua de mar requiere diferentes condiciones de flotación, o si se necesitan nuevos criterios para la selección de agentes espumantes.

Se consideran las recuperaciones de cobre y molibdeno y la formación de espuma de la pulpa en flotación más áspera tanto en agua dulce como en agua de mar.

La flotación mineral requiere la formación de una capa de espuma que sea hasta cierto punto estable. Los agentes espumantes previenen la coalescencia de burbujas y reducen el tamaño de las burbujas. Se sabe que las espumas están estabilizadas no solo por los compuestos de superficie activa (por ejemplo, espumantes) sino también por los compuestos de superficie inactiva (por ejemplo, iones inorgánicos). La formación de espuma de los agentes espumantes en agua destilada no predice necesariamente la estabilidad de la espuma en condiciones de flotación.

Lekki y Laskowski (1975) han demostrado que los espumosos no tienen que ser agentes activos de superficie. Por ejemplo, informaron que el alcohol di-acetona, un espumador de flotación comercial que se usaba en la industria del cobre en Polonia, no era un agente tensoactivo, pero estaba funcionando muy bien como agente espumante.

Si bien no hubo espuma cuando se realizaron pruebas de capacidad de formación de espuma en presencia de este agente en agua destilada, la espuma de tres fases fue lo suficientemente estable. El mismo fenómeno se ha reportado para el aceite de pino. Si bien no hubo espuma cuando se probó la capacidad de formación de espuma con aceite de pino, tanto en agua dulce como en agua de mar, se observó que la presencia de partículas hidrófobas estabilizaba fuertemente la espuma de aceite de pino (Castro et al., 2012a).

El criterio inverso también es válido, es decir, los agentes espumantes fuertes no producen necesariamente las espumas más estables. Melo y Laskowski (2007) informaron para DF-1012 que si bien las espumas generadas con el uso de este vaporizador eran las más estables y las que más agua transportaban, la espuma estudiada en presencia de partículas de carbón bituminosas hidrófobas era notablemente menos voluminosa cuando este vaporizador era utilizado El mismo fenómeno fue observado por Kuan y Finch (2010) que estudiaron el efecto de las partículas de talco hidrófobas sobre las propiedades de las espumas en presencia de un espumador de poliglicol.

Se emplean agentes espumantes para facilitar la dispersión del aire en burbujas finas y para estabilizar la espuma. La estabilidad de la espuma depende del tipo y la concentración del vaporizador, pero también es función de otras variables, como el tamaño de las partículas, la hidrofobicidad, el porcentaje de sólidos, el pH y la tasa de flujo de aire. Por ejemplo, según lo informado por Tao et al. (2000), las partículas de carbón pueden estabilizar o desestabilizar la espuma. Esto depende tanto del tamaño de estas partículas como de su concentración. La fracción de tamaño bajo malla #100 (-150 µm) desestabilizó la espuma en concentraciones más bajas, pero la estabilizó en concentraciones más altas, mientras que las partículas de carbón micronizado mostraron un poder para romper la espuma.

2.3.1. Parámetros de recuperación de cobre y molibdeno

Se realizaron pruebas de flotación con dos minerales de cobre a escala de flotación de laboratorio en condiciones industriales estándar, y se calcularon las recuperaciones de Cu y Mo en función del pH con agua de mar y agua corriente. Posteriormente, se realizaron experimentos con espuma con los mismos minerales de cobre y condiciones de flotación y modificando la celda de flotación. El espesor de la capa de espuma y la masa de agua transferida al volumen de espuma se midieron en función del pH y el contenido de sólidos, con agua de mar y agua dulce.

Se analizaron dos muestras de mineral de calcopirita de cobre y molibdeno, que se obtuvieron de dos mineras chilenas.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE FLOTACIÓN CON AGUA DE MAR Y SU RENTABILIDAD EN EL PROCESO METALÚRGICO.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE FLOTACIÓN CON AGUA DE MAR Y SU RENTABILIDAD EN EL PROCESO METALÚRGICO.

3.1. CONSUMO DE AGUA DE MAR EN LA MINERÍA

En el proceso de flotación, las pérdidas de agua son causados por fugas, evaporaciones, infiltraciones en los estanques y en el transporte de concentrados y relaves.

Para evitar las pérdidas de agua, las empresas adoptan diferentes tecnologías tales como el desagüe de las colas, la preclasificación de mineral, el uso de supresores para la supresión de polvo de la carretera, y estanques que cubren y tanques para reducir la evaporación. Mediante distintos estudios realizados, se llevó a cabo un estudio preliminar de las diferentes alternativas para reducir las pérdidas de agua en minería. Encontraron que el uso de supresores de polvo de caminos es la medida más eficaz debido a su bajo costo y ahorro de agua, el ahorro de agua se pude lograr en las colas de sedimentación mediante los procesos de filtración, pero estos son mucho más caros.

Como se analizará más adelante, la calidad del agua más adecuado en la minería no es necesariamente totalmente desalada, porque la presencia de algunos iones puede favorecer o ser inocuo en algunos procesos. Desde esta perspectiva, los pocos esfuerzos para utilizar agua de mar con la desalación parcial o selectiva de algunos iones son dignos de mención. Las operaciones mineras en Chile que utilizan el agua de mar, tanto desaladas como no desaladas, se muestran en la Tabla 3-1. Centinela (Antofagasta Minerals) y operaciones de Sierra Gorda (Minera Quadra Chile) destacan por el volumen de agua de mar utilizada sin desalinización.

Tabla 3-1. Mineras en Chile que utilizan agua de mar

Company	Name	Desalination plant capacity (L/s)	Direct seawater capacity (L/s)
BHP Billiton	Coloso Plant	525	
Antofagasta Minerals	Michilla Desalination Plant	75	23
Antofagasta Minerals	Centinela District	50–150	780–1500
SLM Las Cenizas	Las Cenizas Taltal	9	55
Compañía Minera Tocopilla	Mantos de la Luna	20	5
Lundin Mining	Candelaria	300–500	
AngloAmerican	Manto Verde	120	
Minera Quadra Chile	Sierra Gorda	63	1315
Antofagasta Minerals	Antucoya Desalination Plant	50	280
Camarones	Pampa Camarones	5	25

Fuente: Cochilco 2016

La Tabla 3-2 muestra los principales proyectos de utilización de agua de mar en Chile. Es sorprendente la cantidad de proyectos que desalinizarán el agua de mar, no solo por la cantidad de proyectos sino también por el volumen de agua que se desalinizará.

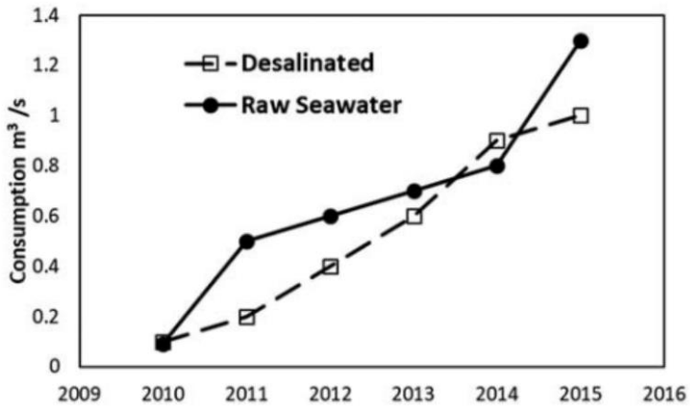
Tabla 3-2. Proyectos con utilización de agua de mar en Chile

		Capacity in liters per second		
Company	Name	Desalination	Direct seawater	Implement-ation year
BHP Billiton	Escondida Water Supply	3200		2017
Antofagasta Minerals	Los Pelambres	400		2018
Capstone	Agua de Mar Santo Domingo	260–290	355	2019
Codelco Norte	RT Desalination Plant	1630–1950		2019
Teck	Quebrada Blanca Hipógeno	1300		2020
Minera Can	Diego de Almagro	30	315	2019
BHP Billiton	Spence Growth Project	800–1600		2019
Pucobre	El Espino	5		2019
Antofagasta Mineral	Centinela District	178		2019–2024

Fuente: Cochilco 2016

Teniendo en cuenta el suministro de agua Escondida, Radomiro Tomic planta de desalinización y Spence Growth Option, la cantidad de agua desalada alcanzarán entre 5.630 y 6.750 litros por segundo. Si consideramos que en una planta de desalinización generalmente por cada litro de agua desalinizada, aproximadamente un litro de agua con una salinidad que duplica la salinidad del agua de mar se devuelve al mar, los esfuerzos para usar agua de mar no desalinizada deberían ser mayores. Por lo tanto, a las 10 operaciones mineras que actualmente usan agua de mar, se pueden agregar otras nueve en el futuro cercano. Desde esa perspectiva, se deben hacer esfuerzos para integrar la generación de agua y sistemas de distribución. La operación minera utiliza agua de mar desalinizada debido a la calidad del agua y la fiabilidad de la planta de desalinización.

En la industria del cobre, la operación que consume la mayor parte del agua es las concentradoras, con 71% del total, como se muestra en la siguiente figura.



Fuente: Cochilco, 2016.

Figura 3-1. Consumo de agua desalinizada y no desalinizada

La calidad del agua más adecuada en la minería no es necesariamente desalada al 100%, porque la presencia de algunos iones puede favorecer o ser inocuo en algunos procesos. Desde esta perspectiva, los pocos esfuerzos para utilizar el agua de mar con desalinización parcial o selectiva de algunos iones son notables.

Su uso es generar una pulpa con las partículas del mineral que a continuación, se pone en contacto con burbujas para separar las especies valiosas de la ganga. Teniendo en cuenta que las partículas tienen un tamaño pequeño, en el intervalo de 20 a 80 µm, la separación de sólidos del líquido es más difícil, lo que limita la cantidad de agua reciclada y en consecuencia aumenta el consumo de agua fresca. Actualmente, no es posible aumentar el tamaño de las partículas, aunque esto significaría un ahorro de energía y de agua debido a la recuperación de especies valiosas que se ven afectadas.

En Chile, el agua de mar no desalinizada o desalinizada por ósmosis inversa se utiliza en la minería. Una tercera opción, aún no utilizada, es el uso de agua de mar parcialmente desalinizada. Cada una de estas alternativas tiene sus ventajas y desventajas dependiendo del mineral a tratar, la tecnología a utilizar y las características del proyecto.

Los componentes del agua de mar pueden favorecer, afectar o ser inocuos en la recuperación y calidad del producto extraído. Es prácticamente imposible el uso de agua de mar en operaciones que actualmente no usan agua de mar porque sus instalaciones no son adecuadas para las características corrosivas del agua de mar. Sin embargo, el uso de agua de mar cruda, desalinizada o parcialmente desalinizada puede considerarse como alternativas para nuevos proyectos.

Dentro de los procesos a los que es sometido el mineral está la flotación, la etapa donde se ocupa la mayor cantidad de agua, es ahí la parte de mayor importancia donde se buscan las alternativas de utilización de aguas provenientes del océano.

Tabla 3-3. Plantas desalinizadoras y de impulsión de agua de mar en la minería.

PLANTAS DESALINIZADORAS Y DE IMPULSIÓN DE AGUA DE MAR EN LA MINERÍA			
PLANTA	**PROPIETARIO**	**CAPACIDAD PLANTA DESALADORA (l/s)**	**CAPACIDAD AGUA DE MAR DIRECTA (l/s)**
MINERIA-INDUSTRIAL			
Escondida EWS	Minera Escondida (BHP)	2.500	
Distrito Centinela (El Tesoro-Esperanza)	Minera Centinela (Antofagasta Minerals)	50	1.500
Sierra Gorda	KGHM Int.	63	1.315
Planta desaladora Cerro Negro Norte	CAP	600	
Planta Coloso	Minera Escondida (BHP)	525	
Planta Desalinizadora Minera Candelaria	Lunding Mining	500	
Antucoya	Minera Antucoya (Antofagasta Minerals)	48,1	280
Mina Algorta	Algorta Norte		150
Abastecimiento de agua Desalada Manroverde	Mantos Copper	120	
Planta Desaladora Michilla	Haldeman Mining Company	75	23
Mantos de la Luna	Compañía Minera Mantos de la Luna	8,7	78
Las Cenizas Taltal	Minera Las Cenizas	9,3	12
Planta J.A. Moreno (Taltal)	ENAMI		15
TOTAL		**4.586,9**	**3.373**

Fuente: "Consumo de agua en la minería del cobre al 2017", Cochilco.

La planta desaladora Cerro Negro es una planta desalinizadora de agua para uso de la minería de hierro, siendo la primera que se construye en el país que no es de uno exclusivo para la minería del cobre.

La gran limitante para realizar estos procesos con agua de mar desalinizada es el alto costo de las tecnologías utilizadas. Para realizar la desalinización, principalmente para

la impulsión del agua hacia las faenas, se requiere de un alto costo de electricidad. De hecho, para faenas a 3.000 msnm se habla de costos cercanos a US$5 por m3, que incide hasta un 8% de los costos de producción minera.

Esto genera que la desalinización no sea económicamente viable para todos los yacimientos, sobre todo para los que estén más alejados de la costa y a mayor altura sobre el nivel del mar.

La inversión que se requiere al usar agua de mar en vez de agua dulce es mucho mayor, debido al uso de tuberías, revestimientos, instrumento y equipos que sean capaces de resistir la gran corrosión que provoca el agua de mar en el trayecto desde la captación, hasta la impulsión en la planta. También se debe considerar la mantención de los equipos, que debe ser más acelerada y la utilización de revestimientos en los sistemas de transporte de agua.

Es importante señalar que si comparamos los costos asociados del uso de agua de mar, como ambas opciones son muy corrosivas, no se genera gran diferencia económica.

Los factores más importantes del costo unitario de desalación son: el nivel de salinidad del agua de mar, el costo de la energía eléctrica necesaria para las operaciones y el tamaño de la planta en términos de capacidad de producción.

El tipo de planta desalinizadora dependerá del requerimiento de agua por parte de cada empresa, lo que genera un efecto de economía de escala. esto quiere decir que, a mayor cantidad de agua, menor será el costo unitario de tratamiento.

3.2. CORROSIÓN DEL AGUA DE MAR

En Las Luces, donde se menciona con anterioridad en el capítulo 2, todas las instalaciones están expuestas permanentemente a la acción corrosiva del agua salada. El daño en las superficies metálicas se minimiza tomando las siguientes precauciones:

a) Los efectos de la corrosión en la superficie de las placas de acero se minimizan pintando, aplicando revestimiento de caucho vulcanizado y recubrimiento por pulverización con poliuretano.
b) Las tuberías y los componentes utilizados en la planta concentradora son de acero recubierto de caucho o hechos de polietileno de alta densidad. Todas las válvulas y bombas están hechas de acero inoxidable.
c) Las estaciones de entrada y de bombeo de agua de mar se limpian cada 90 días para evitar el crecimiento de hongos y percebes, lo que puede ocasionar el bloqueo de la tubería.

d) Las bombas son inspeccionadas cada 4000 h. Los impulsores de las bombas se cambian cada seis meses y las bombas cada año.

El dinero gastado para el mantenimiento de superficies metálicas y el reemplazo de bombas es una parte importante de los costos operativos en la planta de Las Luces en relación con el uso de agua de mar.

Por supuesto, hay una serie de ventajas y desventajas en el uso de agua de mar exclusivamente en la mina. Por ejemplo, no hay costo de adquisición para el agua de mar y es un recurso natural "inagotable". En ausencia de agua dulce en las inmediaciones, el agua de mar es la única agua disponible para la planta de Las Luces.

Además, el uso de agua de mar protegería las reservas de agua dulce existentes almacenadas en los acuíferos y glaciares del subsuelo. Si bien no existe un costo de adquisición para el agua de mar, los costos de inversión operativa y de capital del uso del agua de mar podrían ser mayores que los del agua dulce. Esto se debe en gran parte a los gastos necesarios para combatir el efecto corrosivo del agua de mar, y la construcción y mantenimiento de la tubería para transportar el agua de mar al sitio de la planta.

3.3. CONSUMO DE AGUA EN LA MINERÍA CHILENA AL AÑO 2019

Aguas Continentales

$$12{,}45\, m^3/seg$$

$$392.623.200\ m^3/Año$$

Aguas Recirculadas

$$53{,}32\, m^3/seg$$

$$1.681.499.520\ m^3/Año$$

Agua de Mar Total

$$4{,}06\ m^3/seg$$

$$128.036.160\ m^3/Año$$

- Agua de mar directa, con mayor cantidad de sal:

$$1{,}84\ m^3/seg$$

$$58.026.240\ m^3/Año$$

- Agua de mar desalinizada:

$$2{,}22\ m^3/seg$$

$$70.09.920\ m^3/Año$$

$$70.09.921$$

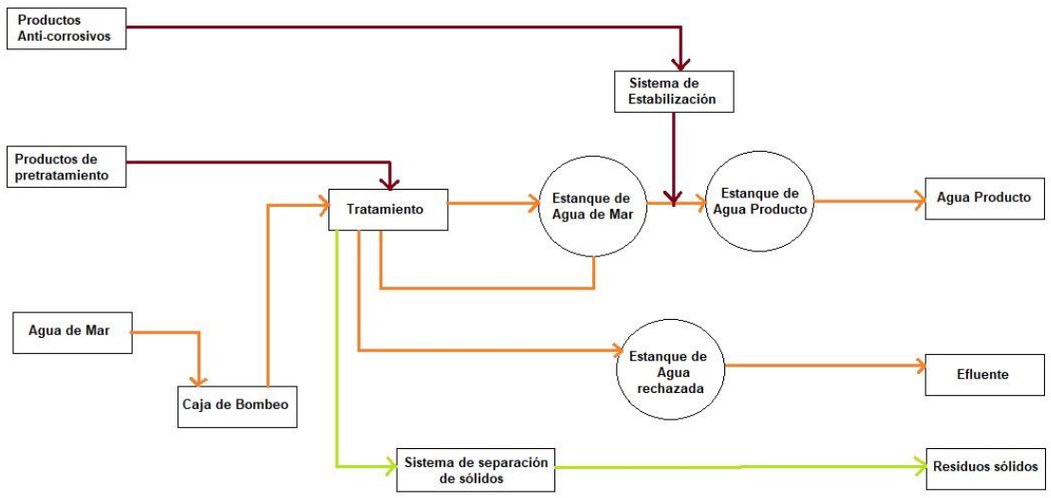
3.3.1. Tratamiento del Agua de Mar:

Los datos recopilados en la investigación de costos, valores y cálculos son referenciales, ya que la información encontrada se determinó como confidencial, por esta razón se determinan valores aproximados a los reales. Gran parte de la información a presentar se encuentra actualizada al año 2013 y las fuentes provienen de operación y proyectos mineros que han o se encuentra utilizando agua de mar en sus operaciones.

El agua de mar debe ser tratada previamente a ser transportada a la planta de procesamiento, sin importar si es desalinizada o no. El sistema de toma de agua es la misma en ambos tipos de aguas de mar, como también lo es la adición de componentes químicos anti-corrosivos.

Los principales componentes del suministro de agua salada son:

- El sistema de colección de agua de mar y descarga en la costa de agua de mar residual, la cual es una caja de bombeo sumergida.
- Planta de tratamiento de agua de mar, que se encarga de la remoción de residuos sólidos y materia orgánica, que evita el efecto de fenómenos ocurridos en el océano como la marea roja o el florecimiento de algas, que afectan al sistema de impulsión de agua.
- Filtración en profundidad.
- Sistema de separación de sólidos.
- Sistema de tratamiento anticorrosivo que considera la adicción de una sustancia química que elimina el oxígeno disuelto en el agua, llamado metabisulfito de sodio, hipoclorito de sodio y la adición de agente anti-corrosivo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-2. Diagrama de flujo tratamiento de agua salada.

3.3.2. CÁLCULO DE COSTOS ASOCIADOS AL USO DE AGUA DE MAR

Para transportar el agua de mar desde la planta de tratamiento en la costa hasta la planta concentradora, se necesita un sistema de tuberías y estaciones de bombeo a lo largo de él. El cálculo de las inversiones depende principalmente del consumo de acero, el cual a su vez depende del largo de la tubería y del diámetro del conducto acuífero. El cálculo de los costos operacionales se centra en el consumo energético, que depende del tipo de agua a transportar y el diámetro de la tubería. Los costos que involucran el movimiento de tierras y la inversión en equipos de bombeo, se asimilan en ambos casos del suministro de agua de mar.

Por lo tanto, un aspecto importante de la evaluación económica es justamente el diámetro escogido para el transporte de ambos tipos de agua. Para aquello se lleva a cabo una metodología de simulación para elegir el diámetro óptimo, considerando un modelo de desgaste de la tubería por corrosión y variando los precios de los insumos principales que afectan a la evaluación económica del sistema de impulsión. Esta última se realiza para un período de tiempo igual a 20 años, para compatibilizar los costos de éste ítem con aquellos asociados al tratamiento de agua de mar.

Tabla 3-4. Parámetros utilizados para el cálculo del sistema de impulsión de agua

Parámetros	Valor	Unidad
Procesamiento de Planta	100	$[kton/d]$
Consumo unitario de agua	0,5	$[m^3/ton]$

Altura de impulsión	3.100	[m]
Distancia Impulsada	153	[km]
Tolerancia velocidad fluido	1,1 – 1,9	$[m/s]$
Aceleración de gravedad	9,81	$[m/s^2]$
Temperatura de operación	15	[°C]
Densidad agua salada	1,0255	$[g/ml]$
Viscosidad cinemática (A.S.)	1,223	$[m^2/s^* 10^{-6}]$
Densidad agua permeada	0,9983	$[g/ml]$
Viscosidad cinemática (A.P.)	1,141	$[m^2/s^* 10^{-6}]$

Para realizar la simulación que permite la elección del diámetro óptimo para cada tipo de agua, se considera un modelo que aumenta linealmente la rugosidad por corrosión de la tubería, en cada año de operación del ducto. Este modelo planteado por Genijew considera una rugosidad inicial propia de cada material y un coeficiente de aumento de rugosidad dependiendo del tipo de agua a transportar [Mostkow, 1996].

Tabla 3-5. Coeficientes de Genijew para cada tipo de agua:

Fuente: Mecánica de Fluidos

Tipo de Agua	Rango	Valor Medio
Agua con poco contenido minerales que no origina corrosión. Agua con un bajo contenido de materia orgánica y de solución de hierro.	0,005 – 0,055	0,025
Agua con poco contenido mineral que origina corrosión. Agua que contiene menos de 3 [mg/l] de materia orgánica y hierro en solución.	0,055 – 0,18	0,007
Agua que origina fuerte corrosión y con escaso contenido de cloruros y sulfatos (menos de 100 – 150 [mg/l]). Agua con un contenido de hierro de más de 3 [mg/l].	0,18 – 0,4	0,2
Agua que origina corrosión, con un gran contenido de cloruros (más de 500-700 [mg/l]). Agua impura con gran cantidad de materia orgánica.	0,4 – 0,6	0,51
Agua con cantidades importantes de carbonatos, pero de dureza pequeña permanente, con residuo denso de 2.000 [mg/l].	0,6 – 1,2	-

Los coeficientes escogidos según las características del agua utilizada en las pruebas de flotación son los siguientes: k = 0,6 para el caso del agua salada y k = 0,07 para el caso del agua permeada/desalinizada; la rugosidad inicial del acero nuevo es k_0 = 0,05. Ahora el modelo también considera un aumento en la sección por corrosión; varios valores para el agua de mar han sido alcanzados en otros estudios: Schumacher reporta un ritmo de 0,7 [mm/año] sin considerar compuestos anti-corrosivos [Schumacher, 1979], Malik postula un ritmo de 0,4 [mm/año] considerando protección catódica y compuestos anti-corrosivos [Malik, 2005], y Landrum postula que para una velocidad de fluido igual a 1,6 [m/s] se tiene un desgaste de 0,5 [mm/año] sin considerar anti-corrosivos [Landrum, 2007].

Entonces para el caso de agua salada se establece un ritmo de corrosión igual a 0,5 [mm/año] considerando protección catódica con corriente forzada y adición de productos químicos anti-corrosivos en el tratamiento del agua. Este valor es moderado para el diseño del sistema de impulsión de agua y se considera que el desgaste es uniforme a través del ducto, condición inexistente en la realidad. Para el caso de agua desalinizada se sabe de un valor igual a 0,13 [mm/año] para agua con 250- 350 [ppm] de Cl y con productos químicos anti-corrosivos [Malik, 2005]. Para este estudio se adopta un valor conservador de diseño igual a 0,2 [mm/año], a pesar de que el agua considerada tiene menos de 100 [ppm] de iones cloro.

3.3.3. COSTOS ASOCIADOS

El precio de la energía eléctrica tiene como valor medio 95 [US$/MWh] según los antecedentes. El precio del acero y la protección catódica definen la inversión en el sistema de transporte de agua. El precio de la protección catódica se fija en 30 [US$/m] y el montaje en 55 [US$/m]. El precio del acero se establece en 2,0 [US$/kg] y el montaje de las tuberías se puede despreciar ya que se considera que el valor es el mismo para diferentes diámetros. Cabe mencionar que sólo se considera protección catódica para el caso de agua de mar salada.

Esta información confidencial se obtiene a partir de la investigación de benchmarking respecto a proyectos ingenieriles y es actualizada al año 2012 aproximadamente. Como los precios anteriores son referenciales y afectos a las fluctuaciones del mercado, se realiza una sensibilización de la evaluación de costos para tres precios distintos de cada insumo resultando en nueve escenarios para cada tipo de agua, donde el valor de la energía eléctrica varía entre 90 – 100 [US$/MWh] y el acero

entre 1.800 – 2.200 [US$/ton]. Por último, el valor de la tasa de descuento utilizada en la evaluación económica es igual a 12%.

Tabla 3-6. Resumen de los valores a considerar en el sistema de impulsión

Ítem	Valor
Acero [US$/Kg]	2
Electricidad [US$/MWh]	95
Protección catódica [US$/m]	85
Tasa de Descuento [%]	12

Desglose de las inversiones principales para las plantas de tratamiento:

Tabla 3-7. Gatos en capital del tratamiento de agua de mar.

Ítem	Unidad	Salada	Permeada
Toma y descarga de agua			
Caja profunda de toma	MUS$	0,3	0,6
Sistema de Toma	MUS$	5,2	8,2
Sentina de transferencia	MUS$	5,5	8,7
Bomba	MUS$	4,1	6,2
Sala eléctrica	MUS$	0,9	1,4
Estanque de salmuera	MUS$	0,2	0,3
Sistema de descarga salmuera	MUS$	3,8	6,7
Clorinación	MUS$	0,1	0,1
Total toma y descarga de agua	MUS$	20,1	32,2
Pretratamiento			
Coagulación – Floculación	MUS$	0,5	0,8
Filtrado multibed	MUS$	3,4	4,5
Bombas	MUS$	3,2	5,1
Tuberías	MUS$	5,0	7,2
Total pretratamiento	MUS$	12,1	17,6
Sistema eléctrico pretratamiento			
Total sistema eléctrico pretratamiento	MUS$	1,7	N/A
Equipos y materiales			
Total equipos y materiales	MUS$	8	24,1
Osmosis inversa			
Bombas	MUS$	N/A	9,4
Tuberías	MUS$	N/A	8,0
Naves presurizadas	MUS$	N/A	1,6
Membranas	MUS$	N/A	6,4

Estanques	MUS$	N/A	1,8
Instrumentación	MUS$	N/A	0,8
Edificación	MUS$	N/A	4,6
Electricidad	MUS$	N/A	7,5
Total osmosis inversa	MUS$	N/A	40,1
Post tratamiento			
Equipo de adición $Ca(OH)_2$	MUS$	N/A	0,4
Equipo de adición CO_2	MUS$	N/A	0,1
Estanques	MUS$	2,5	2,0
Equipo de adición de agente secuestrantes de O_2	MUS$	1,4	0,8
Equipos de adición de inhibidor de corrosión	MUS$	1,4	0,8
Total post tratamiento	MUS$	5,3	4,1
Trabajos civiles			
Total trabajos civiles	MUS$	8,5	14,2
Ingeniería de la planta de tratamiento			
Total ingeniería de la planta de tratamiento	MUS$	2,6	7,5
Instalaciones y servicios			
Total instalaciones y servicios	MUS$	3,9	8,6
Trabajos tempranos			
Total trabajos tempranos	MUS$	1,8	3,2
Total Costos Directos	**MUS$**	**64**	**151,6**

Costos de empleados para cada planta de tratamiento

Tabla 3-8. Gastos operativos del tratamiento de agua de mar.

Agua Salada			
Ítem	US$/mes/persona	N°	kUS$/año
Superintendente	8.333	1	100
Analistas/Técnicos/Ingenieros	4.167	2	100
Operadores/Asistentes	3.333	8	320
Guardias	2.083	4	100
Asistentes de Limpieza	2.083	2	50
Total		**16**	**670**
Agua Desalinizada			
Ítem	US$/mes/persona	N°	kUS$/año
Superintendente	8.333	1	100
Analistas/Técnicos/Ingenieros	4.167	4	200
Operadores/Asistentes	3.333	15	600
Guardias	2.083	4	100
Asistentes de Limpieza	2.083	4	100
Total		**28**	**1.100**

La escoria producida en las fundiciones, constituyen uno de los principales desechos sólidos en la industria del cobre. En Chile por cada tonelada de cobre producido

se generan alrededor de 2,2 toneladas de escoria, a nivel nacional se producen aproximadamente 4,5 millones de toneladas de escoria anualmente.

De acuerdo a datos recopilados por dos fundiciones chilenas, Codelco Caletones y Codelco Chuquicamata, pudimos observar que los rangos de producción diaria de escoria en ambas fundiciones oscilan entre 1.600 a 1.900 toneladas diarias, con una ley de entre 6 a 10% Cu.

Sumado a estos datos, en la fundición Caletones de CODELCO división El Teniente, ubicada en la ciudad de Rancagua, se pudo investigar el valor comercial de la escoria, detalladas de la siguiente manera:

Valor de la escoria por tonelada métrica: US$49
Valor transporte de escoria por tonelada métrica: US$8,6

De acuerdo a los datos entregados, podemos hacer el cálculo de los valores anuales a los que corresponderían cada uno:

Diariamente: $1.600\,TM \times US\$49$ = US$78.400 TM
Diariamente con transporte $1.600\,TM \times US\$57{,}6 = US\$92.160$

Anual: $1.600\,TM \times US\$49 \times 365\,Días$ = US$28.616.000 TM/año
Anual con trasporte: $1.600\,TM \times US\$57{,}6 \times 365\,Días =$ US$33.638.400 TM/año

CONCLUSIÓN

El uso agua de mar cruda como agua de proceso, a largo plazo generaría mayores gastos en temas de mantenimiento de los equipos utilizados, debido a la corrosión que provocan los altos niveles de iones y sales disueltas en ella, sumado al excesivo consumo de cal, que funciona como regulador de pH, para lograr el valor óptimo al realizar la flotación, que aumentan aún más los gastos asociados a la operación, deseando obtener un porcentaje de recuperación de cobre que se acerque a los estándares normales, 30% de pureza.

Los resultados obtenidos en las cuatro pruebas de flotación realizadas en el laboratorio metalúrgico de la Universidad Federico Santa María, Sede Viña del Mar, donde se utilizó escoria de la Fundición Ventanas perteneciente a CODELCO, se logró la recuperación de cobre con agua de mar y desionizada, mediante los análisis de laboratorio se determinó que la utilización de 100% de agua desionizada es el más factible, pero esto conlleva costos mayores en los procesos debido que se debe tratar el agua y hoy en día es un recurso natural que está siendo afectado por el cambio climático y uso en las industrias. Lo recomendable es utilizar 25% de agua de mar y 75% de agua desionizada, hay una buena recuperación y disminuye los costos de tratamiento del agua y mantenimiento de los equipos. Lográndose cumplir los objetivos propuestos y demostrando que existe recuperación de cobre en la escoria utilizando mezclas de agua y siendo este factible en la Minería. En Chile, aún no se utiliza el agua parcialmente desalinizada y sigue siendo factible para los procesos de recuperación de cobre.

Hay que considerar que son pocas las plantas que se encuentran cercanas al mar para disminuir los costos de tratamientos y varías faenas se encuentran sobre los 2500 m.s.n.m. y tienen que incluir estos costos en el proceso.

Además, poder darle una segunda utilidad a la escoria, para recuperar cobre y la reutilización este residuo, disminuyendo el impacto ambiental que puede llegar a tener a largo plazo. Y hoy vemos el cierre de la Fundición de Ventanas que afecta al medio ambiente por sus gases contaminantes y la salud de las personas que habitan en ese sector.

BIBLIOGRAFÍA

1. Desalinización del Agua [en línea] <https://www.acciona.com/es/tratamiento-de-agua/desalacion/?_adin=02021864894> [Consulta: Abril 2022].
2. CODELCO. Codelco Educa [en línea] <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca> [Consulta: Junio 2022]
3. Frank J. Millero 2007 "The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale" El Servier. [Consulta: Mayo 2022].
4. Luis A. Cisternas and Edelmira D. Gálvez "The use of seawater in mining" Taylor & Francis. Mineral processing and extractive metallurgy review 2018. [Consulta Julio 2022].
5. MAGNE, Ortega Luis. Conminución de minerales. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, República de Chile, 1995.
6. PDF, Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). Informe Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2014-2025 [en línea]. Dirección de estudios y políticas públicas <http://www.cochilco.cl/estudios/info-aguas.asp> [Consulta: Abril 2022].
7. SONAMI. Sociedad Nacional de Minería [en línea] <http://www.sonami.cl/> [Consulta: Abril 2022].