

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

ESTUDIO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE
EN LA ELECTROOBTENCIÓN
DEL COBRE

TESIS

Presentada por:

Bach. Alexander Escobar Arocutipa

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA - PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**“ESTUDIO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE EN
LA ELECTROOBTENCIÓN DEL COBRE”**

TESIS

Tesis sustentada el día 19 de diciembre de dos mil diecisiete por el bachiller Alexander Escobar Arocutipa, siendo el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE


.....
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO


.....
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

VOCAL


.....
Dr. Freddy Felipe Cori Nina

ASESOR


.....
Mgr. Raúl Del Pozo Tello

DEDICATORIA

A Dios en primer lugar por haberme dado fuerzas para afrontar cada situación adversa y permitirme seguir subiendo los escalones de la vida, en segundo lugar a mis padres, Adrian y Nora por su apoyo y paciencia incondicional en mi formación profesional y por haberme dado la oportunidad de estudiar y ser un profesional en la vida.

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios por haberme apoyado en todo momento, a la Universidad Nacional de Jorge Basadre Grohmann, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales por formarme como profesional durante los 5 años y también quiero agradecer a todos mis docentes puesto que ellos forjaron en mí el valorar los estudios y a superarme día a día, también agradezco a mis padres porque ellos estuvieron en los momentos más difíciles de carrera como estudiante.

CONTENIDO

DEDICATORIA	Página iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Descripción del problema	2
1.1.1 Antecedentes del problema	2
1.1.2 Problemática de la investigación	4
1.2 Formulación del problema	4
1.3 Justificación e importancia	6
1.4 Alcances y limitaciones	7
1.5 Objetivos	7
1.5.1 Objetivo general	7
1.5.2 Objetivo específico	7

1.6 Hipótesis	8
1.6.1 Hipótesis general	8
1.6.2 Hipótesis específico	8
1.7 Operacionalización de variables	8
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	9
2.1 Antecedentes del estudio	9
2.2 Bases teóricas	10
2.2.1 Lixiviación	10
2.2.2 Extracción por solventes	12
2.2.3 Características del proceso de SX	14
2.2.4 Proceso de SX para recuperación del cobre	16
2.2.5 Electroobtención	23
2.2.6 Celdas de electrolisis	24
2.2.7 Proceso electroquímico	25
2.2.8 Descripción del proceso de electroobtención del cobre	27
2.2.9 Variables del proceso	31
2.2.10 Transformadores y rectificadores de corriente	36
2.3 Definición de términos	38

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	40
3.1 Diseño de investigación	40
3.2 Población y muestra de estudio	40
3.3 Técnicas e instrumentos para recolección de datos	41
3.4 Procedimiento y análisis de datos	41
3.4.1 Materiales	41
3.4.2 Solución electrolítico cargado	44
3.4.3 Desarrollo de pruebas de electroobtención de cobre	44
3.4.4 Mediciones electrolíticas	45
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1 Resultados	49
4.1.1 Medición del voltaje de electroobtención vs densidad de corriente	49
4.1.2 Medición del voltaje de celda vs distancia entre electrodos	50
4.1.3 Medición del voltaje de electroobtención vs densidad de corriente	50
4.2 Discusión	51
CONCLUSIONES	53
RECOMENDACIONES	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXOS	57

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Operacionalización de variables.	8
Tabla 2. Composición del electrolito base.	40
Tabla 3. Composición química del ánodo Pb-Sn.	43
Tabla 4. Composición química del cátodo de acero inoxidable AISI 316L.	43
Tabla 5. Concentración del electrolito ánodo, muestra acuosa cargado (stripping).	44
Tabla 6. Valores del voltaje de celda vs densidad de corriente.	45
Tabla 7. Datos de voltaje de celda vs distancia entre electrodos.	46
Tabla 8. Datos experimentales obtenidos.	46
Tabla 9. Cuadro de pesos electroobtenidos teóricos y reales.	48
Tabla 10. Eficiencia de corriente (EC) vs densidad de corriente (DC).	48

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Recuperación del cobre por extracción por solventes.	16
Figura 2. Etapa de extracción.	19
Figura 3. Etapa de reextracción.	21
Figura 4. Diagrama de flujo del procesamiento hidrometalúrgico de minerales de cobre.	24
Figura 5. Celda de electrodeposición.	25
Figura 6. Proceso de electroobtención de cobre.	27
Figura 7. Vista superior de la celda de electroobtención del cobre, 2 ánodos y 1 cátodo AISI 316L.	47
Figura 8. Cosecha de cobre electroobtenido en cátodo de acero AISI 316L.	47
Figura 9. Gráfico densidad de corriente vs voltaje.	49
Figura 10. Gráfico voltaje de celda vs distancia entre electrodos.	50
Figura 11. Gráfico densidad de corriente vs eficiencia de corriente.	51

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Imágenes del proceso	Página 56
----------	----------------------	--------------

RESUMEN

Este estudio fue desarrollado en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad Ingeniería UNJBG, con el propósito de identificar las variables que tienen mayor incidencia en la producción de cátodos de cobre de alta calidad.

En el presente trabajo se evalúa uno de los parámetros más importante en la electroobtención del cobre como la densidad de corriente, la cual se aplicó $278,3 \text{ A/m}^2$ como rango óptimo. Asimismo, se evalúa el voltaje en función de la distancia entre electrodos, indicando que al incrementar el voltaje de celda no varía la calidad del cobre catódico. Se obtuvo una pureza en el cátodo a partir de 45 g/l Cu de $98,5 \%$ de Cu a nivel de laboratorio.

Palabras clave: Electroobtención del cobre

INTRODUCCIÓN

La minería es uno de los sectores más importantes de la economía peruana y representa normalmente más del 50 % de las exportaciones peruanas con cifras alrededor de los 14 mil millones de dólares al año.

Los principales minerales que exporta nuestro país son: cobre, oro, hierro, plata, zinc y plomo entre otros. Actualmente todos ellos son fuertemente demandados como insumos para procesos industriales de alto nivel tecnológico. El Perú posee el 16 % de las reservas de minerales conocidas, incluyéndole 15 % de las de cobre y el 7 % de las de zinc. Se estima que hasta el día de hoy el Perú únicamente ha extraído el 12 % de sus recursos minerales y que con tecnología adecuada puede triplicar su actual producción, especialmente en metales básicos. Con la sostenible alza de los precios de los metales el Perú se ha posicionado ventajosamente en la minería mundial, manteniendo un liderazgo minero en Latinoamérica y una sólida historia y trayectoria minera.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

1.1.1 Antecedentes del problema

El empleo de los procesos de LIX/SX/EW de cobre en forma integral fue desarrollado en la década de los años 60, en 1964 la compañía general Mills anuncio haber descubierto el LIX 64 para la extracción de cobre. En 1966 en Arizona se abrió la primera planta de SX y EW para recuperar cobre. Una ventaja de la SX es que no está restringida a soluciones de lixiviación en ácido sulfúrico, sino también que se puede usar en medio amoniacal o medio cloruro. En el año 1976 la empresa estatal minero Perú - Cerro Verde implementó la primera planta de LIX/SE/EW para óxidos de cobre con una producción 90 T/día de cobre fino. En la actualidad Cerro Verde lixivia minerales mixtos de cobre. (Habashi F, 2009).

Los modelos existentes predicen el coeficiente de distribución en base a datos de equilibrio, por ejemplo, midiendo el pH de equilibrio después del contacto. Aquí se formula un modelo que permite predecir el equilibrio completo.

Partiendo de las condiciones iniciales tales como razón orgánico-acuoso, concentración inicial de extractante, pH inicial y concentración de cobre inicial. Con este modelo es posible confeccionar el diagrama de McCabe - Thiele para un sistema de extracción por solvente de cobre utilizando agentes quelantes. (Navarro P, 2005).

El proceso de LIX/SX/EW ha permitido explotar yacimientos que hace un tiempo atrás eran económicamente marginales. Los más grandes productores de cobre electroobtenido (EO) en el Perú son las compañías mineras Southern Perú Cooper y la sociedad minera Cerro Verde, a partir de sulfuros secundarios de cobre y minerales mixtos de cobre. Sin embargo, aún hay pocas plantas electroobtención (EO) en el Perú, considerando el gran potencial cuprífero y precios adecuados de los metales.

Por tal motivo, el presente trabajo pretende incentivar la aplicación de estos procesos para recuperar cobre y dar mayor valor agregado a las menas de cobre y desarrollar nuestra industria minero-metalúrgica.

1.1.2 Problemática de la investigación

En la electroobtención convencional, la reacción que ocurre en el ánodo es la disociación de agua, que no afecta la eficiencia en el uso de la corriente debido a que no genera cationes que se puedan reducir en el cátodo (en el rango de densidades de corriente usadas en esta tecnología). Sin embargo, el uso de esta reacción anódica requiere un elevado voltaje de celda, resultando esto en un alto consumo de energía.

1.2 Formulación del problema

¿De qué manera la optimización de la variable densidad de corriente puede influir en el proceso y producto de la electroobtención del cobre?

Las plantas que iniciaron las operaciones de extracción por solventes y electroobtención a escala industrial llevan más de 30 años operando, y a pesar de que el cobre producido por medio de este proceso metalúrgico alcanza a alrededor del 20 % de la producción mundial total, la electroobtención se sigue practicando hoy en día casi de la misma forma como se hacía en sus inicios, sin haber experimentado cambios o mejoras importantes. Las principales limitaciones de la electroobtención de cobre mediante

tecnología convencional han sido abordadas por diversos autores, quienes han propuesto diversas alternativas para lograr avances trascendentes en el desempeño de la electroobtención como proceso.

Sin embargo, existen pocas implementaciones de celdas de diseño no convencional a escala industrial, ya que a pesar de las mejoras que presentan en cuanto al desempeño energético no han logrado superar ciertas limitaciones prácticas. Dada la proporción de cobre producido por medio de electroobtención a nivel mundial, los esperanzadores resultados de investigaciones previas relacionadas con el tema, y la importancia que adquiere la electroobtención frente a otros procesos de cara a las cada vez más estrictas regulaciones ambientales, es importante seguir en la búsqueda de parámetros en las celdas convencionales que permitan optimizar y encontrar valores adecuados.

Según como se ha planteado el problema en cuestión es demostrar a nivel laboratorio, la obtención de cobre electrolítico controlando la variable de densidad de corriente y qué efectos tiene dentro del proceso.

1.3 Justificación e importancia

Durante los últimos años, la producción de cobre a nivel mundial ha aumentado significativamente con relación a períodos anteriores, lo que ha influido en la caída sostenida del precio del mineral. Esta sobre oferta ha inducido a que las grandes compañías cupríferas adopten diversas estrategias de comercialización para enfrentar reducciones de precio o nuevas estrategias de manufactura para mejorar su productividad y eficiencia. Se observa la tendencia en general decreciente que ha venido experimentando el precio del cobre durante los últimos 5 años, por lo que el desafío es ofrecer al mercado, productos (cátodos) High Grade a fin de obtener premios por sobre el valor del mercado. En atención al comportamiento que han venido experimentando estas variables económicas a lo largo de los últimos seis años esta situación induce a las empresas a abordar esta situación adversa, particularmente a través del estudio de sus variables y prácticas operacionales a modo de diseñar futuras estrategias que permitan ofrecer un mejor margen de comercialización para los cátodos de cobre. En este sentido, este estudio hallará la manera de cómo obtener cátodos de cobre de alto grado a partir del uso de las variables del proceso en especial la densidad de corriente.

1.4 Alcances y limitaciones

El presente trabajo de investigación es a nivel laboratorio por lo tanto los resultados obtenidos en las pruebas deben ser corroborados en siguientes etapas del proceso (semibatch). Cabe mencionar que las pruebas de electroobtención (EO) de cobre fueron realizados a nivel semibatch, debido básicamente al limitado volumen de electrolito producido en la extracción por solventes. La densidad de corriente y el voltaje de celda fueron controlados mediante un multímetro digital. El contenido de cobre en el orgánico se realizó por balance.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Estudiar las densidades de corriente que se aplican en la electroobtención del cobre que incide en la calidad de los cátodos de cobre a nivel de laboratorio.

1.5.2 Objetivo específico

- Estudiar el efecto de la densidad de corriente en el desempeño de la celda.
- Estudiar la relación entre la eficiencia de corriente y la densidad de corriente en el proceso.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

- La electroobtención del cobre permitirá mejorar la calidad de cobre modificando la densidad de corriente.

1.6.2 Hipótesis específico

- El efecto de la densidad de corriente permitirá estudiar el desempeño del proceso en la celda.
- La eficiencia de corriente logrará relacionar con mayor criterio la densidad de corriente del proceso.

1.7 Operacionalización de variables

Tabla 1.

Operacionalización de variables

Variables	Indicadores
Dependiente: Calidad de la electroobtención del cobre	<ul style="list-style-type: none">• Concentración del electrolito• Tiempo de electroobtención del cobre.
Independiente: Variable de densidad de corriente y otras	<ul style="list-style-type: none">• Comportamiento de la densidad de corriente.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio

Las plantas que iniciaron las operaciones de SX y EO a escala industrial llevan más de 30 años operando, y a pesar de que el cobre producido por medio de este proceso metalúrgico alcanza un crecimiento de 42 % de la producción mundial, la EO se sigue practicando hoy en día casi de la misma forma como se hacía en sus inicios, sin haber experimentado cambios o mejoras importantes. Las principales limitaciones de la EO de cobre mediante tecnología convencional han sido abordadas por diversos autores, quienes han propuesto diversas alternativas para lograr avances trascendentes en el desempeño de la EO como proceso. Pero en esta investigación se tomará el estudio de la densidad de corriente en proceso de EO. Las plantas que iniciaron las operaciones de SX y EO a escala industrial llevan más de 30 años operando, y a pesar de que el cobre producido por medio de este proceso metalúrgico alcanza un crecimiento de 42 % de la producción mundial, la EO se sigue practicando hoy en día casi de la misma forma como se hacía en sus inicios, sin haber experimentado cambios o mejoras importantes.

Las principales limitaciones de la EO de cobre mediante tecnología convencional han sido abordadas por diversos autores, quienes han propuesto diversas alternativas para lograr avances trascendentes en el desempeño de la EO como proceso. Pero en esta investigación se tomará el estudio de la densidad de corriente en proceso de EO.

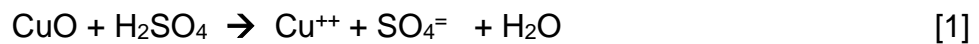
2.2 Bases teóricas

2.2.1 Lixiviación

Hoy el término lixiviación es comúnmente usado para describir un proceso mediante el cual se realiza un lavado de una sustancia o sólido que contiene mineral valioso con el fin de extraer la parte valiosa en estado soluble. Es así, que en minería el término lixiviación se define como un proceso hidrometalúrgico.

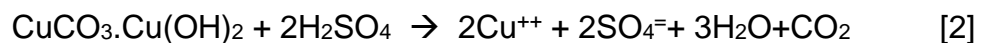
Esto significa que, con el uso del agua como medio de transporte, se usan químicos específicos para separar los minerales valiosos (y solubles en dichos líquidos) de los no valiosos. La lixiviación es un proceso de recuperación económico que puede ser usado en un proyecto según se trabajen mayores volúmenes de material.

Los principales minerales de cobre en la zona de Tacna, son la crisocola ($\text{CuO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la malaquita ($\text{CuCO}_3\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2$). La crisocola, un hidroxil-silicato con una estructura cristalina abierta, se lixivia relativamente rápido en ácido sulfúrico (H_2SO_4) de acuerdo a la siguiente reacción:



Cu^{++} es el símbolo para el ion cúprico, el principal estado del cobre, cuando este se disuelve en solución. Los iones en solución pueden tener cargas positivas, tales como el ion cúprico (Cu^{++}), o cargas negativas, tales como el ion sulfato (SO_4^-).

Al igual que la crisocola, la malaquita se lixivia bastante rápido en ácido sulfúrico. La reacción química para este proceso de lixiviación es:



Esta ecuación muestra el cobre y los iones sulfato en solución y la producción de algo de dióxido de carbono así como también agua. El agua, los iones Cu^{++} y los iones SO_4^- fluyen con la solución de lixiviación a la poza de colección del PLS, el dióxido de carbono pasa a la atmósfera.

Como se sabe una vez ejecutado el proceso de lixiviación se obtiene soluciones de sulfato de cobre (CuSO_4) con concentraciones de hasta 9 gramos por litro (g/l) denominadas PLS que son llevadas a diversos estanques donde se limpian eliminándose las partículas sólidas que pudieran haber sido arrastradas. Estas soluciones de sulfato de cobre limpias son llevadas a planta de extracción por solvente.

2.2.2 Extracción por solventes

El proceso de extracción por solvente, o de SX como también se le llama, es una rama de la hidrometalurgia; que forma parte de la metalurgia extractiva, por lo que para profundizar en el tema se debe partir definiendo a esta última como un arte o ciencia destinada a transformar un mineral, a través de una sucesión de procesos, hasta la obtención del metal de interés que lo constituye.

El proceso de extracción por solvente es una tecnología que puede aplicarse ya sea a la remoción de un componente de valor desde los contaminantes o para remover los contaminantes del componente de valor. La solución que originalmente contiene las especies deseadas y la solución en la cual estas especies o los

contaminantes se van a extraer, deben ser inmiscibles para efectuar la separación en la forma más completa posible. En las operaciones de recuperación de metales, el componente deseado, normalmente es un ion metálico o un ion complejo metálico contenido en una solución acuosa.

Esta solución acuosa se mezcla con una fase orgánica inmisible que contiene el extractante activo al cual se transfiere el metal deseado, pasando entonces de la fase acuosa a la fase orgánica. La emulsión que se genera en el mezclador para producir la transferencia, pasa al sedimentador donde las fases se separan.

La fase orgánica conteniendo ahora el metal extraído, a denominarse "orgánico cargado", se transfiere a la sección de reextracción donde el metal es ahora reextraído desde la fase orgánica (orgánico descargado), retornando el orgánico descargado a etapa de extracción para iniciar un nuevo ciclo. En la mayoría de los casos, la reextracción se efectúa con una solución acuosa de alta acidez desde la cual se da lugar a la recuperación final del metal y a la regeneración del extractante. Se ha comprobado que por las condiciones de equilibrio de la reacción de extracción, para

aprovechar la máxima capacidad de carga del reactivo orgánico y para aumentar el rendimiento del proceso, es necesario realizarlo por etapas; se evita en esta forma el inconveniente de emplear un gran volumen de orgánico. En las etapas se utiliza flujos continuos con las fases operando en contracorriente; así la fase orgánica descargada se pone en contacto con las soluciones de lixiviación semiagotadas, mientras que la fase orgánica cargada se pone en contacto con las soluciones con alta concentración de ion metálico, tratando de extraer una cantidad adicional del ion y de esta forma cargarse completamente.

2.2.3 Características del proceso de SX

Por la gran variedad de aplicaciones que puede tener esta tecnología, se le pueden atribuir numerosas características, como las siguientes:

- Permite el tratamiento de soluciones con bajas concentraciones de cobre.
- Permite la purificación y concentración del cobre independiente del contenido de impurezas y de la concentración de estas.

- Permite obtener un producto de muy alta pureza química y física, como son los cátodos electroobtenidos o sulfatos cristalizados.
- Tiene costos de producción atractivamente bajos.
- Permite manipular grandes caudales de soluciones sin complicaciones en la operación
- Permite recuperar otros metales valiosos desde la fase acuosa utilizando extracción selectiva en otras etapas independientes.
- Es una tecnología limpia que cumple con todas las regulaciones ambientales que son exigidas en la actualidad.
- Permite la recuperación de otras especies de valor, utilizando etapas intermedias o tecnologías diferentes.
- Operacionalmente es de fácil manipulación, su equipamiento es simple y permite procesar volúmenes grandes.
- Es un proceso que por su simpleza y estabilidad requiere dotaciones de personal muy pequeñas. Se le puede dar gran flexibilidad a su diseño, permitiendo así absorber cualquier detención parcial de equipos, sin parar el proceso.

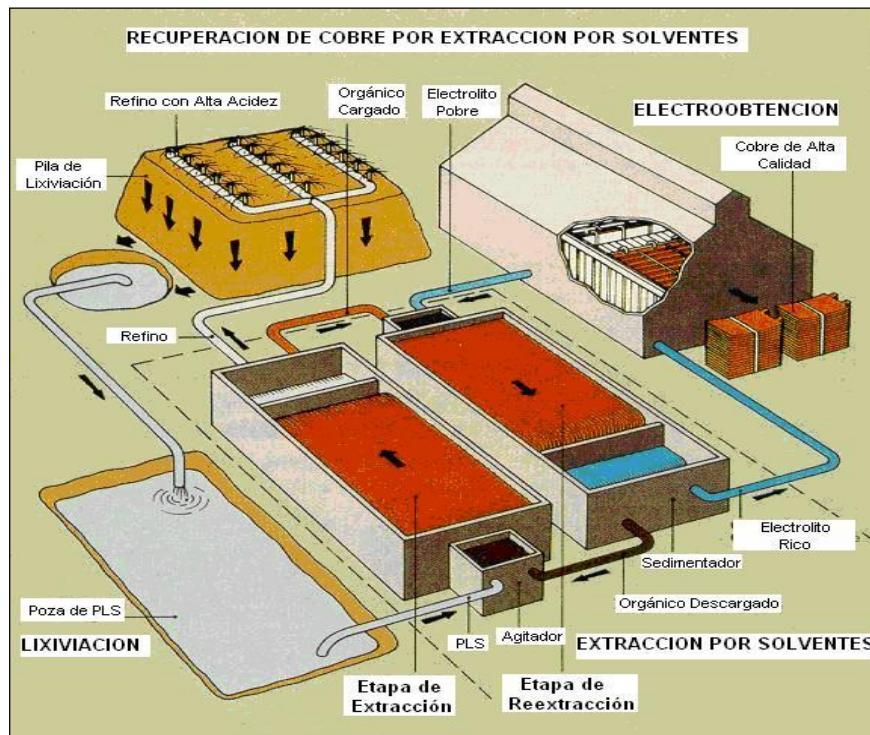


Figura1. Recuperación del cobre por extracción por solventes.

Fuente: Libro de metalurgia extractiva de la universidad de Atacama.

2.2.4 Proceso de SX para recuperación del cobre

El objetivo del proceso SX es extraer selectivamente el cobre contenido en esta solución rica impura, mediante intercambio iónico entre la fase acuosa (solución rica) y el reactivo orgánico.

Este reactivo es capaz de descargar el cobre en una etapa posterior del proceso a una solución de alta pureza y concentración de cobre y ácido, formando un electrolito apto para ser electrodepositado.

De los equipos utilizados para efectuar el proceso de SX para cobre, el más común es el mezclador-decantador, que como su nombre lo indica, consiste de una cámara de mezcla y de un estanque de decantación.

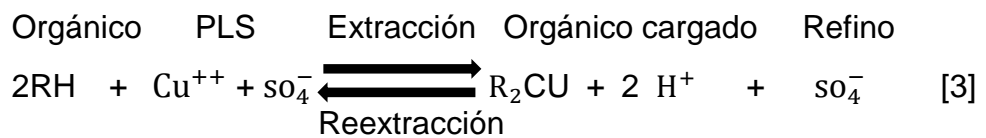
En la cámara de mezcla, se realiza el mezclamiento de las fases, con lo cual se produce una dispersión de pequeñas gotas de cada fase, que así permite que gracias al contacto íntimo de éstas, se produzca la reacción de extracción o reextracción.

En el decantador se permite la coalescencia y la separación de las fases, para luego pasar a la etapa siguiente en contracorriente.

a. Extracción

La solución rica en cobre proveniente de la etapa de lixiviación o PLS (Pregnant Liquid Solution) se alimenta a la planta de SX desde la poza correspondiente por medios de equipos de bombeo o gravitacionalmente, ingresando al mezclador primario de la etapa de extracción. En esta cámara mezcladora la solución acuosa (PLS) se

mezcla con la solución orgánica descargada que fluye desde el decantador de la etapa de reextracción.



El acuoso y el orgánico se mezclan mediante una bomba mezcladora (primaria) antes de pasar a la segunda y terceras cámaras mezcladoras (secundarias) donde tiene lugar la mezcla adicional mediante los mezcladores.

La dispersión que sale del último mezclador fluye dentro del sedimentador donde se va a producir la coalescencia y la separación de las fases orgánica y acuosa.

En las etapas de extracción de SX (que pueden ser desde 1 a 3), el cobre de la solución (PLS) se transfiere a la solución orgánica, dejando una solución pobre en cobre (Refino) que irá a su respectiva poza de almacenamiento para su reutilización como solución lixivante.

La solución orgánica rica en cobre (orgánico cargado) que sale del sedimentador fluye hacia el estanque de orgánico cargado, pasando previamente en algunos casos por una etapa mezcladora decantadora de lavado o por un equipo coalescedor para desimpregnar o dejar decantados los atrapamientos de solución acuosa, portadores de impurezas indeseables.

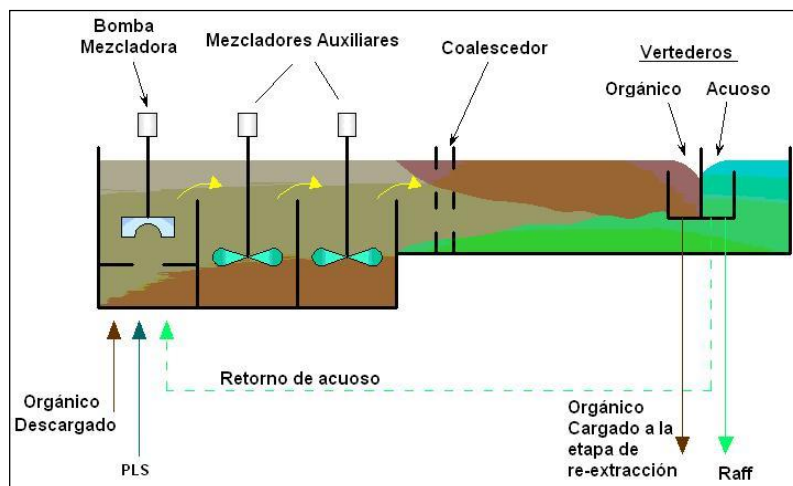


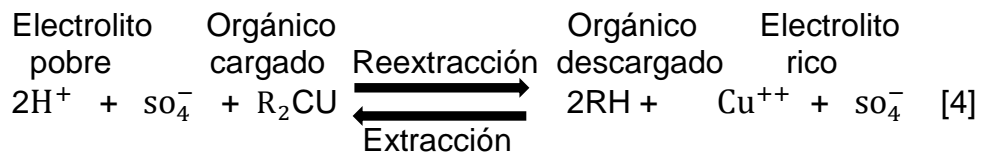
Figura 2. Etapa de extracción.

Fuente: Elaboración propia.

b. Reextracción

El orgánico cargado se envía mediante bombeo desde el tanque de almacenamiento hacia el mezclador primario de la etapa de reextracción. En este mezclador el orgánico cargado se mezcla con electrolito pobre bombeado desde el circuito de

electroobtención: generalmente se usa solo 2 mezcladores en la o las etapas de reextracción, según sea el caso, debido a que la cinética de reextracción es muy rápida y no se justifica darle un mayor tiempo de residencia a esta fase del proceso. La dispersión que sale del mezclador secundario de la etapa de reextracción fluye hacia el decantador de ésta para que procedan a separarse las fases acuosa y orgánica.



En la etapa de re-extracción el cobre contenido en el orgánico cargado se reextrae por acción del alto contenido de ácido del electrolito pobre, resultando así la transferencia de cobre desde la fase orgánica a la fase acuosa, mientras que el acuoso rico en cobre (electrolito rico) se ha despojado del ácido estequiométricamente equivalente al cobre transferido; la fase orgánica desprovista de cobre que fluye desde el decantador de reextracción se denomina orgánico descargado y se recicla hacia las etapas de extracción para reiniciar el proceso en circuito cerrado.

Las etapas de reextracción satisfacen los criterios establecidos para la extracción por solvente, que viene a ser la concentración y purificación de una solución de sulfato de cobre, permitiendo aumentar la concentración de cobre en el electrolito hasta 50 o 60 g/l según sea el caso. Como el orgánico cargado sólo contiene cobre, la solución resultante en la reextracción es muy pura e ideal para someterla a una electrólisis, en donde se electrodeposita el cobre en forma de cátodos metálicos de alta pureza. El electrolito rico, que generalmente contiene atrapamientos de fase orgánica previo a su envío a la nave electrolítica pasa a través de un circuito de limpieza, que puede estar constituido por: post decantador, columna de flotación y/o filtros, para después ser enviado al proceso de electrodeposición.

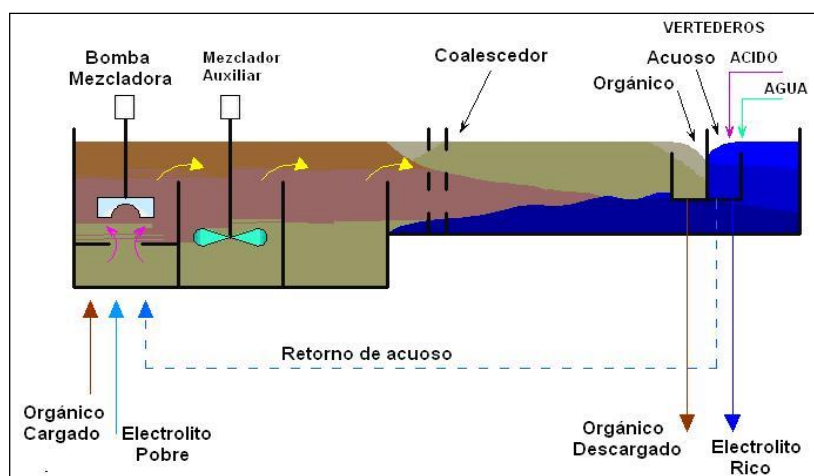


Figura 3. Etapa de reextracción.

Fuente: Elaboración propia.

c. Lavado

El proceso de SX también reduce la transferencia de impurezas al electrolito. Los extractantes usados son altamente específicos para cobre y las impurezas, a excepción del Fe, no son coextraídas. Sin embargo, pueden presentarse problemas de contaminación con impurezas debido a arrastre físico de solución rica al electrolito.

El nivel de impurezas en el electrolito es controlado por descartes periódicos de electrolito. El hierro ha sido generalmente el principal problema y su presencia en el electrolito, sobre ciertos niveles, disminuye la eficiencia de corriente en la electrodeposición.

Sin embargo, ahora que el proceso se ha generalizado, han aparecido otras impurezas, especialmente, manganeso y cloro, que pueden ocasionar problemas si no son controladas. En este caso la etapa de lavado es efectiva para mantener todas estas impurezas bajo control. Cualquier arrastre de acuoso a la salida del lavado tendrá efectos insignificantes en el circuito por los bajos contenidos de impurezas.

2.2.5 Electroobtención

Consiste en la extracción de metales a partir de soluciones, en forma de depósitos metálicos puros, densos y compactos o depósitos metálicos en polvo (pulvi-electrometalurgia) o bien, depósitos de compuestos metálicos (óxidos, hidróxidos o sales).

La electroobtención (EO) de cobre es un proceso electroquímico mediante el cual se recupera cobre en forma sólida a partir de una solución rica en iones de ión cúprico (Cu^{2+}), y que genera como producto cátodos de cobre de alrededor de 99,99 % de pureza. Una de sus principales características es que, comparada con la fundición de concentrados, es un proceso mucho menos contaminante.

La técnica de electroobtención se utiliza principalmente en el tratamiento de minerales oxidados de cobre. Este tipo de mineral puede ser concentrado vía flotación con los reactivos adecuados, pero el proceso completo de lixiviación, extracción por solventes (SX) y EO resulta ser más económico.

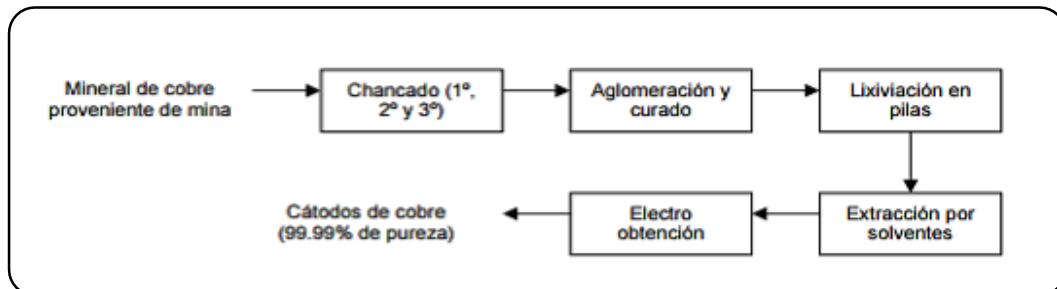


Figura 4. Diagrama de flujo del procesamiento hidrometalúrgico de minerales de cobre.
Fuente: Elaboración propia.

2.2.6 Celdas de electrólisis

Los procesos electrometalúrgicos tienen lugar en unidades llamadas celdas de electrólisis, las cuales se agrupan para constituir la nave o planta electrolítica. Una celda de electrólisis está constituida por:

- La celda misma: es un recipiente que contiene el electrolito y los electrodos. En algunos casos, la celda puede ser constituida por dos mitades, conectadas entre sí por un puente salino.
- El electrolito: un medio acuoso, que contiene los iones del metal a depositar y otros iones que migran permitiendo el paso de la corriente entre los electrodos.
- El ánodo: material sólido conductor en cuya superficie se realiza un proceso de oxidación con liberación de electrones.

- El cátodo: electrodo sólido conductor en cuya superficie se realiza un proceso de reducción con los electrones provenientes del ánodo.

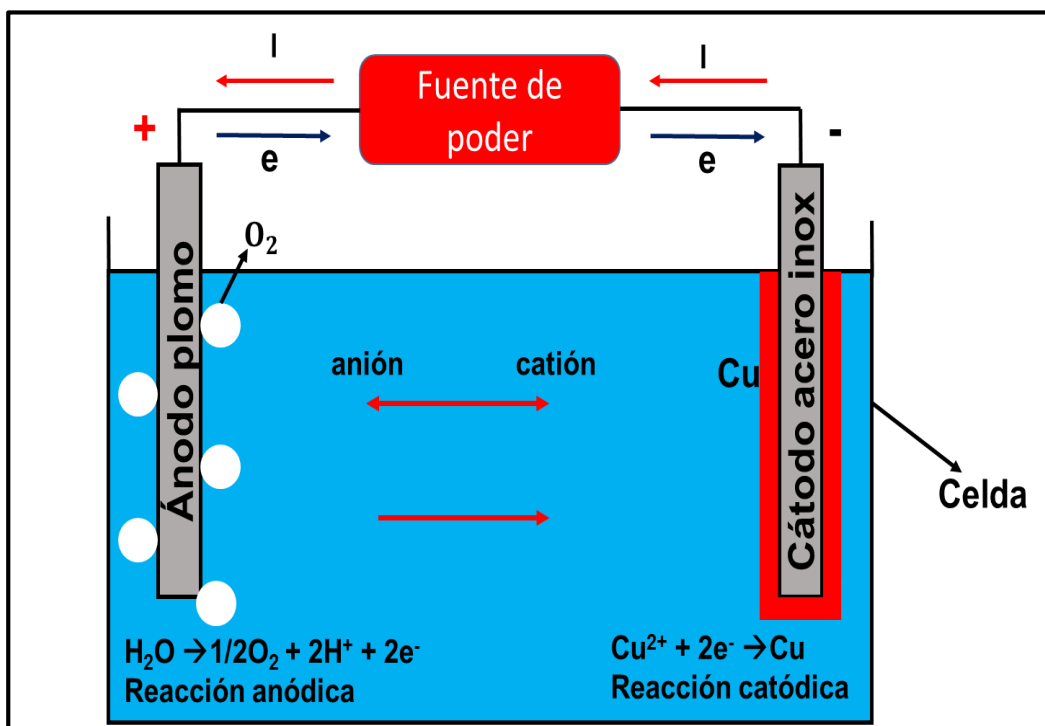


Figura 5. Celda de electrodeposición.

Fuente: Apuntes de hidrometalurgia Universidad de Atacama.

2.2.7 Proceso electroquímico

Un proceso de naturaleza electroquímica se caracteriza por presentar la realización simultánea de dos reacciones denominadas anódicas y catódicas. En la primera sucede una transformación química de oxidación y se liberan electrones. La reacción catódica

involucra un proceso químico de reducción con participación de los electrones liberados en el ánodo y que viajan por conductores electrónicos (cables) que unen el cátodo con el ánodo. En la solución, no hay desplazamiento de electrones, sino que los iones se desplazan en la solución. Los aniones (-) van hacia el electrodo de carga positiva y los cationes (+) hacia el electrodo de carga negativa. El electrolito es un conductor iónico.

Los procesos electroquímicos pueden ser clasificados en dos tipos según sean o no espontáneos. Los primeros suceden en forma natural y la celda se denomina galvánica o pila. Los no espontáneos se realizan por medio de la aplicación de corriente externa y se realizan en una celda llamada electrolítica. Los procesos de electroobtención de metales no son espontáneos y necesitan un aporte de energía eléctrica para ser forzados a ocurrir, por lo cual se estudian las celdas electrolíticas en estos apuntes. La fuente de energía eléctrica debe proporcionar corriente continua o directa (dc) a la celda, permitiendo el flujo forzado de electrones entre el ánodo y el cátodo donde son consumidos. En forma simple, la fuente de energía actúa como bomba impulsora de electrones que fluyen por los conductores y los electrodos.

2.2.8 Descripción del proceso de la electroobtención del cobre

El proceso de electroobtención de cobre consiste básicamente en la transformación electroquímica del cobre disuelto en un electrolito en cobre metálico depositado en un cátodo, mediante la utilización de energía eléctrica proveniente de una fuente externa. El cobre iónico (Cu^{2+}) del electrolito es depositado selectivamente sobre la superficie del cátodo y a la vez se descompone agua en oxígeno y ácido sulfúrico en la superficie de ánodos insolubles de plomo. Dado que el cobre es más bien un metal noble ($E^\circ = 0,34 \text{ V}$), el proceso de electroobtención es relativamente simple y puede ser realizado sin peligro de desprendimiento de hidrógeno ($E^\circ = 0 \text{ V}$).

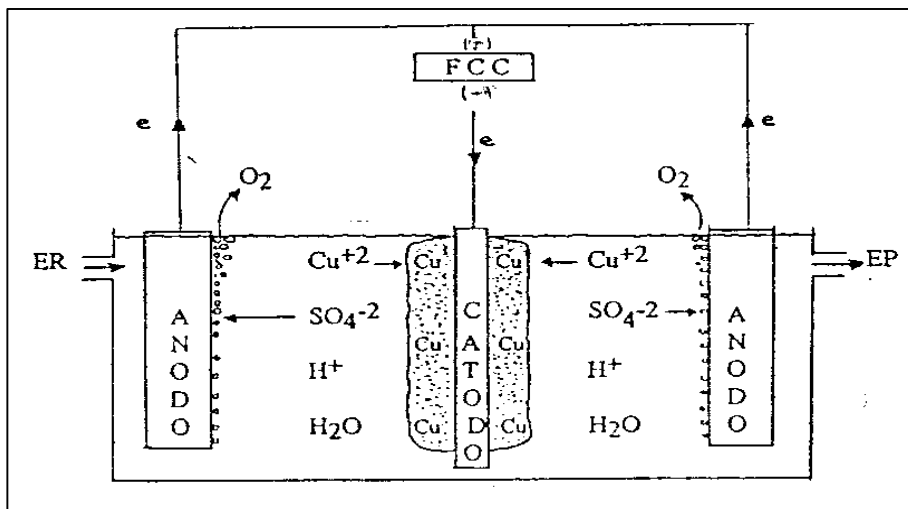
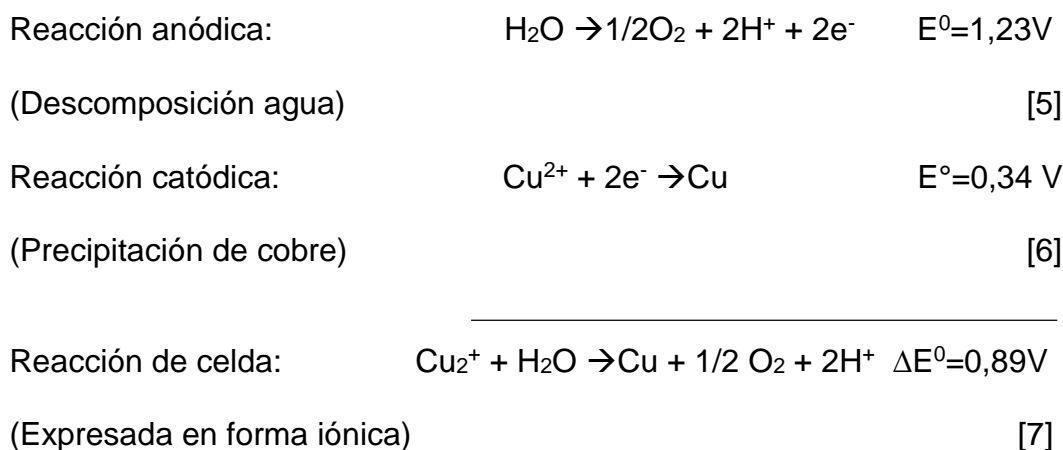


Figura 6. Proceso de electroobtención del cobre.

Fuente: Libro de metalurgia extractiva de universidad de Atacama.

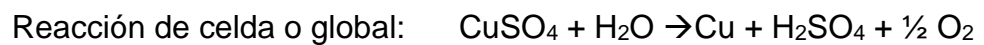


El efecto de la electroobtención sobre el electrolito consiste en disminuir su concentración de cobre, al depositarse éste sobre el cátodo, y aumentar su concentración de ácido, debido a la liberación de protones.

El proceso de EO, se lleva a cabo en una celda electrolítica, donde circula continuamente el electrolito acuoso que contiene disuelto CuSO_4 y H_2SO_4 y que proviene de la planta SX para el caso del interés del presente estudio.

En la celda ocurren reacciones electroquímicas de oxidación – reducción provocada por la energía eléctrica. En el cátodo el ion cúprico es reducido a cobre por los electrones suplidos por la

corriente y que vuelven dicho electrodo de polaridad negativa. En el electrodo positivo hay un déficit de electrones, y se descompone agua generándose oxígeno gaseoso que burbujea en la superficie del ánodo y además ácido sulfúrico, de acuerdo a la reacción neta global:



(Expresada en forma molecular) [8]

a. **Solución electrolítica**

La solución electrolítica es una mezcla de agua, ácido sulfúrico y sulfato de cobre, caracterizada por permitir el paso de la corriente eléctrica continua produciendo la descomposición del sulfato de cobre.

Existen dos tipos de soluciones electrolíticas:

- **Electrolito rico:** Solución ácida con altas cantidades de cobre y ácido (+/- 52 g/l de Cu), que sale de la etapa de re-extracción.
- **Electrolito pobre:** Solución ácida con bajas cantidades de cobre (+/-38 g/l de Cu) que sale de las celdas de electrodeposición.

b. Ánodo y cátodo

- **Ánodo**

Producen un producto de corrosión de granulación fina, el cual desciende fácilmente al fondo de la celda, en vez de escamas más grandes, las cuales pueden hacer contacto con los depósitos de cobre en crecimiento. Una buena estabilidad dimensional ante condiciones de electrodeposición con densidad alta de corriente.

Una junta de la barra de suspensión de cobre con la lámina soldada mediante un proceso especial que da una baja caída de voltaje, lo que da como resultado un bajo consumo de energía. La corrosión del ánodo de plomo se presenta con el tiempo, dando como resultado la caída del óxido de plomo al fondo de las celdas como lodo. Si se deja acumular, el lodo puede subir hasta un nivel en que sería arrastrado hasta el área de los electrodos por el flujo de electrolito desde el distribuidor del fondo de la celda, provocando la contaminación del cobre catódico.

Para evitar esto, se elimina periódicamente (cada tres a seis meses) el lodo de plomo del fondo de cada una de las celdas. La superficie del ánodo se oxida durante una operación normal. El

desprendimiento (descascaramiento) de la capa de óxido de plomo puede llevar a la contaminación del cobre catódico depositado.

- **Cátodo**

El cátodo es el electrodo negativo, donde se deposita los iones de Cu metálico precipitado producido por la reducción del ión Cu^{+2} , se tiene como cátodos en las láminas de arranque, láminas de acero inoxidable.

Es de acero inoxidable 316 L. El acero 316 L es acero austenítico que contiene 16 a 18 % de cromo, 10 a 14 % de níquel, y 2 a 3 % de molibdeno para aumentar la resistencia a la picadura. El espesor de la plancha es de 3,28 mm.

2.2.9 Variables del proceso

a. Densidad de corriente

Es una medida de la intensidad de aplicación de energía eléctrica por unidad de área y está expresada en A/m^2 (A/ft^2). Se calcula dividiendo los amperios que fluyen a través de una celda, entre el área de la superficie de deposición catódica en la celda. Un incremento en la densidad de corriente operativa en

electrodeposición produce cátodos inaceptables por su rugosidad, porosidad y contaminación, Para DC bajas el depósito catódico es adherente y de grano fino. El valor de la densidad de corriente a partir de la cual estas condiciones ocurren ha sido denominado "densidad de corriente límite". Además de la tensión de descomposición deben vencerse la resistencia del electrolito, resistencia de los conductores eléctricos y contactos, y aplicar una sobretensión anódica y catódica para hacer posible el proceso.

b. Acidez

La acidez de una sustancia es el grado en el que es ácida. La escala más común para cuantificar la acidez o la basicidad es el pH, que sólo es aplicable para disolución acuosa. Sin embargo, fuera de disoluciones acuosas también es posible determinar y cuantificar la acidez de diferentes sustancias.

La acidez de una sustancia se puede determinar por métodos volumétricos, es decir, midiendo los volúmenes. Esta medición se realiza mediante una titulación, la cual implica siempre tres agentes o medios: el titulante, el titulado y el colorante.

Cuando un ácido y una base reaccionan, se produce una reacción; reacción que se puede observar con un colorante. Un ejemplo de colorante, y el más común, es la fenolftaleína ($C_{20} H_{14} O_4$), que vira (cambia) de color a rosa cuando se encuentra presente una reacción ácido-base.

c. Voltaje de celda

El proceso de electroobtención comprende el cambio de las especies iónicas a las especies atómicas de tal manera que se requieren una energía definida y un voltaje de descomposición. El requerimiento de voltaje teórico puede ser calculado del potencial estándar de la reacción neta y las actividades de los iones en solución (Ecuación de Nernst), esto nos da aproximadamente un voltaje estándar de $-0,92 \text{ V}$ a 318 K (Signo negativo significa consumo de voltaje). Además de este potencial de descomposición teórico, la producción de oxígeno gaseoso en el ánodo requiere un sobre voltaje significativo en el orden de $0,5 \text{ V}$.

(El sobre voltaje anódico depende de la densidad de corriente, de la temperatura y de la naturaleza del ánodo). Este sobre voltaje se aplica para proveer la energía de activación que provoca la

combinación de los átomos de oxígeno absorbidos y la formación del gas oxígeno (O₂). El voltaje total de celda para electrodeposición está en el rango de 2 a 2,5 V, comparado a solamente 0,2 – 0,25 V para la refinación del cobre.

La energía eléctrica por tonelada de cobre producido es directamente proporcional al voltaje de celda, es decir que el agente titulante es una base, y el agente titulado es el ácido o la sustancia que contiene el ácido.

$$\text{Kw/t de cátodo} = \frac{V * 8,4 * 10^5 \text{ (Amp-hora / tonelada)}}{1000 * \text{CE}/100} \quad [9]$$

Donde:

V = Voltaje de celda

CE= Eficiencia de corriente

La composición del voltaje de celda está dado por:

$$\Delta E_{\text{Eth}} = E_{\text{Eth anódico}} - E_{\text{Eth catódico}} \quad [10]$$

$$V_{\text{celda}} = \Delta E_{\text{Eth}} + \eta_{\text{A}} + |\eta_{\text{c}}| + R + \text{pérdidas} \quad [11]$$

$$V_{\text{celda}} = +/- (0,89 + 0,6 + 0,1 + 0,4 + 0,1) \text{ V}$$

$$V_{\text{celda}} = +/- 2,1 \text{ V}$$

Donde:

Eth anódico: Potencial termodinámico ánodo (Nernst)

Eth catódico: Potencial termodinámico cátodo

R: Resistencia electrolito (Ωm^2)

I: Densidad de corriente (A/m^2)

Pérdidas: pérdidas en los conductores externos (contacto).

d. Amperaje

El amperio es la unidad de medida de la corriente eléctrica, es la cantidad de carga que circula por un conductor por unidad de tiempo.

$$I = Q / t \quad [12]$$

Es la corriente (I) que produce una fuerza de 2×10^{-7} newton por metro entre dos conductores paralelos separados por 1 metro.

1 A = 1 Coulombio / segundo

1 A = 1000 mA (miliamperio)

e. Eficiencia de corriente

Es la relación entre la deposición real y la deposición teórica. Debido a las fugas o pérdidas de corriente, redisolución del cobre

depositado y reacciones electroquímicas secundarias, el cobre realmente depositado es siempre menor que el cobre teórico calculado por la ley de Faraday.

$$\text{Eficiencia de corriente} = \frac{\text{cobre real depositado}}{\text{cobre calculado teóricamente}} * 100 \% \quad [13]$$

2.2.10 Transformadores y rectificadores de corriente

En estos procesos de hidrometalurgia del cobre se requiere de muy altas corrientes continuas electrónicamente controladas. Para ello se emplea tiristores de potencia.

Los rectificadores en cuestión operan en plantas alimentadas por corrientes de 20, 30, 50 o más kA CC (corriente continua).

Para el diseño de estos equipos se debe tener en cuenta una serie de condiciones de contorno: se puede mencionar la definición de la topología, el número de pulsos, número de tiristores en paralelo en cada fase, los criterios de protección y control, reserva de control, factor de potencia, efectos en la calidad de la red, definición del reactor de interface, contaminación armónica, sistema de refrigeración, supervisión y comunicación de datos de operación.

Tres son los tipos de rectificadores controlados que se emplean en hidrometalurgia del cobre:

- Transformadores - rectificadores de potencia para la producción industrial (30, 40, 50 kA o más y rango de tensión del orden de 150 a 300 V).
- Transformadores - rectificadores controlados de emergencia, que operan cuando el rectificador de potencia sale de operación y debe mantenerse en el electrolito una corriente continua mínima. Estos rectificadores entregan corrientes en el rango de 100 a 1000 A y rango de tensión de 100 a 300 V CC.

A continuación se describirá el método de operación de los rectificadores:

Generalmente, en las plantas de electroobtención se tienen varios transformadores – rectificadores, los cuales están dispuestos de acuerdo a un número determinado de celdas, las cuales forman bloques, es así que en el caso de las celdas de láminas de arranque se conectan eléctricamente en serie y pueden estar alimentadas por

un transformador – rectificador que puede ser de 20 000 A y con una densidad de corriente máxima de 217 A/m².

Mientras que en el circuito de celdas comerciales, por lo general se cuenta con una alimentación de más de un transformador – rectificador, en el caso de la mayoría de plantas, se divide la zona de celdas en dos bloques o más, cada uno de estos bloques puede contener un número determinado de celdas, y cada bloque es alimentado por un transformador rectificador, este puede ser de 20 000 a 40 000 amperios, y la densidad de corriente en estos casos puede estar en el promedio de 344 – 372 A/m².

2.3 Definición de términos

a. Ciclo de deposición

El ciclo de deposición se da en dos etapas:

- Ciclo de deposición de láminas iniciales: Dura 24 horas, como resultado se tiene láminas de cobre de aproximadamente 5 a 6 kilogramos.
- Ciclo de deposición de cátodos industriales: Dura en total 6 días, el peso del cátodo es de aproximadamente 120 kilogramos.

b. Celdas electrolíticas

Las celdas electrolíticas pueden ser de diferentes materiales, en el caso por ejemplo de Cerro Verde son de concreto armado, revestidas por una membrana impermeable para evitar filtraciones y la corrosión de esta, sin embargo en la actualidad se están reemplazando por celdas de material de concreto polimérico, resistentes a la corrosión.

c. Protección de ánodos

El sulfato de cobalto, o más específicamente, el sulfato de cobalto heptahidratado $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, es un reactivo que se adiciona al electrolito por gravedad desde el tanque de sulfato de cobalto hacia el tanque de recirculación de electrolito.

d. Purga de electrolito

El purgado en el electrolito o más comúnmente conocido como bleed, se realiza con el objetivo de controlar la cantidad de manganeso y hierro principalmente, en el electrolito.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Diseño de investigación

Los métodos empleados durante el proceso de estudio fueron: el método científico, documental y biográfico a su vez se tomaron los siguientes pasos:

- Recolección de datos
- Análisis de datos.

3.2 Población y muestra de estudio

En este caso se tomarán como población y muestra el electrolito rico en Cu, fueron obtenidas del proceso de extracción por solventes a nivel de laboratorio, su composición química se aprecia en el cuadro adjunto.

Tabla 2.

Composición del electrolito base

Componente	Concentración
Cu⁺²	45 g/l
H₂SO₄	160 g/l
Fe⁺²	1,9 g/l

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Técnicas e instrumentos para recolección de datos

Se obtuvieron datos de la investigación de composición química del electrolito rico para la electroobtención del cobre.

3.4 Procesamiento y análisis de datos

3.4.1 Materiales

a. Rectificador de corriente

Un rectificador de corriente CA/ CC fue usado para obtener la configuración de una celda de tres electrodos para los ensayos electroquímicos.

b. Fuente de corriente

La fuente de CC es un rectificador de voltaje variable. Con una tensión de entrada de 220 V, 60 Hz, monofásico.

- Tensión de salida: 5 VDC a 20 VDC
- Corriente de salida: 15 amperios
- Potencia Máxima: 50 Watts
- Eficiencia: 90 %
- Con amperímetro y voltímetro analógico

c. Celda electrolítica

La celda electrolítica utilizada en las pruebas es una cuba de plástico acrílico, con una capacidad de 2 litros. Se han dispuesto dos barras “bus” de cobre para la colocación de los electrodos (2 ánodos y 1 cátodo) con sus respectivos terminales de conexión.

La alimentación del electrolito es alimentado a la celda por un agujero a un lado de la cuba por encima del nivel del electrolito. El “electrolito pobre” es desalojado por rebose en un compartimiento contiguo a la cuba electrolítica.

d. Multímetro digital

El monitoreo y lectura de la corriente impresa y del voltaje de celda es medido por un multímetro digital automático / manual “UYUS”, puede medir voltajes CC y CA hasta de 600 voltios, corriente CC y CA de 20 amperios.

e. Electrodo de electroobtención

- Ánodo: aleación de Pb-Sn

Tabla 3

Composición química del ánodo Pb-Sn

Elemento	%	Elemento	%
Pb	92,5 – 93,5	Fe	0,02
Sn	6,5 – 7,5	S	0,001
Ag	0,005	Al	0,001
Bi	0,01	Cd	0,002
As	0,01	Zn	0,001
Sb	0,05	P	0,001
Cu	0,05		

Fuente: TRAEL S.A. comercial S.A.C., 2017

- Cátodo: acero inoxidable austenítico AISI 316L (DIN: X2CrNiMo17-12-2).

Tabla 4

Composición química del cátodo de acero inoxidable AISI 316L

Elemento	%
C	≤ 0,03
Si	≤ 1,00
Mn	≤ 2,00
P	≤ 0,045
S	≤ 0,015
Cr	16,5 – 18,5
Mo	2,00 – 2,50
Ni	10,00 – 13,00

Fuente: TRAEL S.A. Comercial S.A.C., 2017

3.4.2 Solución electrolito cargado

Para las pruebas de electrodeposición de cobre, se empleó como electrolito los acuosos cargados de la etapa de extracción por solventes a nivel de laboratorio (esme-unjbg).

Con una concentración final de 43,2 g/l Cu y 160 g/l H₂SO₄. El contenido de impurezas de acuerdo a absorción atómica de Fe, es de 327 mg/l.

Tabla 5

Concentración del electrolito usado, muestra acuoso cargado (stripping).

Muestra	Elementos		
	Cu (g/l)	Fe (g/l)	H ₂ SO ₄ (g/l)
Stripping final	43,2	1,9	160

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Desarrollo de pruebas de electroobtención de cobre

Las pruebas de electroobtención consistió en identificar las variables óptimas de la electrodeposición tales como voltaje de celda, densidad de corriente, eficiencia de corriente, temperatura, concentración de electrolito, concentración de ácido sulfúrico, temperatura.

3.4.4 Mediciones electroquímicas

a. Medición de voltaje vs densidad de corriente

El propósito es determinar el voltaje de celda y densidad de corriente adecuada en la electroobtención de cobre, se procedió a aplicar diferentes valores de voltaje y corriente en la celda electrolítica. Según la ley de Ohm, el voltaje es directamente proporcional a la corriente, por lo tanto, la corriente se incrementará con el voltaje. Los datos experimentales del voltaje y amperaje obtenidos en la prueba se pueden ver en la tabla 6.

Tabla 6

Valores del voltaje de celda vs densidad de corriente.

Voltaje de Celda (V)	1,910	1,903	1,940	1,980	2,000	2,030	2,130	2,160	2,210	2,440
Densidad de corriente (A/m ²)	92,8	103,4	115,3	126,1	144,6	171,9	218,8	236,9	278,3	381,9

Fuente: Elaboración propia.

b. Medición de voltaje de celda vs distancia de electrodos

Durante estas pruebas se midieron y modificaron las distancias de los electrodos ánodo y cátodo de tal modo que se mantuvo una densidad de corriente constante de 278,3 A/m².

Tabla 7

Datos del voltaje de celda vs distancia entre electrodos, a una densidad de corriente constante igual a 218,8 A/m².

Distancia entre electrodos (mm)	Voltaje de celda (V)
30	2,03
40	2,13
50	2,16
60	2,21

Fuente: Elaboración propia.

c. Medición de eficiencia de corriente vs densidad de corriente

Para evaluar la eficiencia de corriente (% EC) óptima respecto a las densidades de corriente, se efectuaron diferentes pruebas de electroobtención de cobre a diferentes densidades de corriente.

- Condiciones de la prueba electroobtención de cobre:

Tabla 8

Datos experimentales obtenidos

Variables	Datos obtenidos
Contenido de Cu ²⁺	45 g/l
Contenido de H ₂ SO ₄	160 g/l
Contenido de Fe ²⁺	1,9 g/l
Temperatura	40°C
Peso de cátodo inicial	495 g
Área catódica	0,007 m ²
Intensidad de corriente	0,95 A
Voltaje de fuente	2,21 V
Tiempo	4 horas
Peso depositado	4,25 g
Pureza de cátodo	98,5 %

Fuente: Elaboración propia.

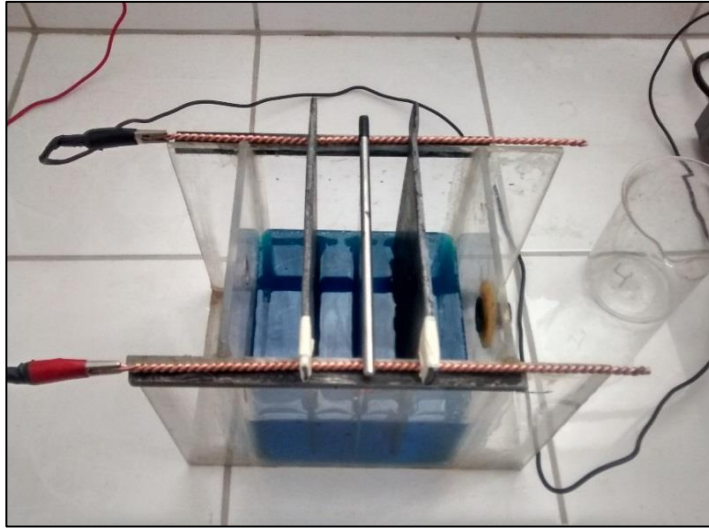


Figura 7. Vista superior de la celda de electroobtención de cobre, 2 ánodos y 1 cátodo de acero AISI 316L.

Fuente: Elaboración propia.

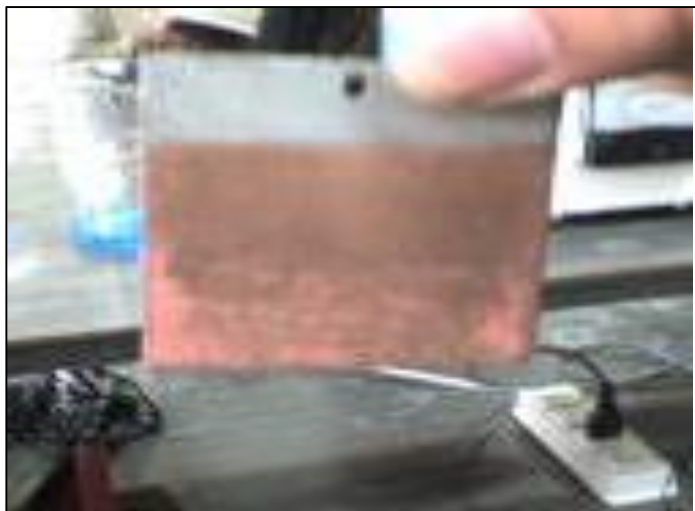


Figura 8. Cosecha de cobre electroobtenido en cátodo de acero AISI 316L.

Fuente: Elaboración propia.

$$\% EC = \frac{m_R}{m_F} * 100 \quad [15]$$

$$m_F = (\text{Intensidad}) * (\text{EqElect}) * (\text{tiempo}) * (\text{eficiencia}) \quad [16]$$

Tabla 9.

Cuadro de pesos electroobtenido teóricos y reales.

Peso EO Teórico (g)	Peso EO Real (g)	Eficiencia de Corriente (%)
2,33	2,13	91,41
2,77	2,57	92,77
3,52	3,33	94,61
3,81	3,61	94,76
4,48	4,25	94,87

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.

Eficiencia de corriente (EC) vs densidad de corriente (DC).

Densidad de corriente (DC) (A/m²)	Eficiencia de corriente (EC) (%)
144,60	91,41
171,90	92,77
218,80	94,61
236,90	94,76
278,30	94,87

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.1.1 Medición del voltaje de electroobtención vs densidad de corriente

En la figura 9 se ve que la densidad de corriente con respecto al voltaje son directamente proporcionales si se modifica el voltaje también se modificará la densidad de corriente.

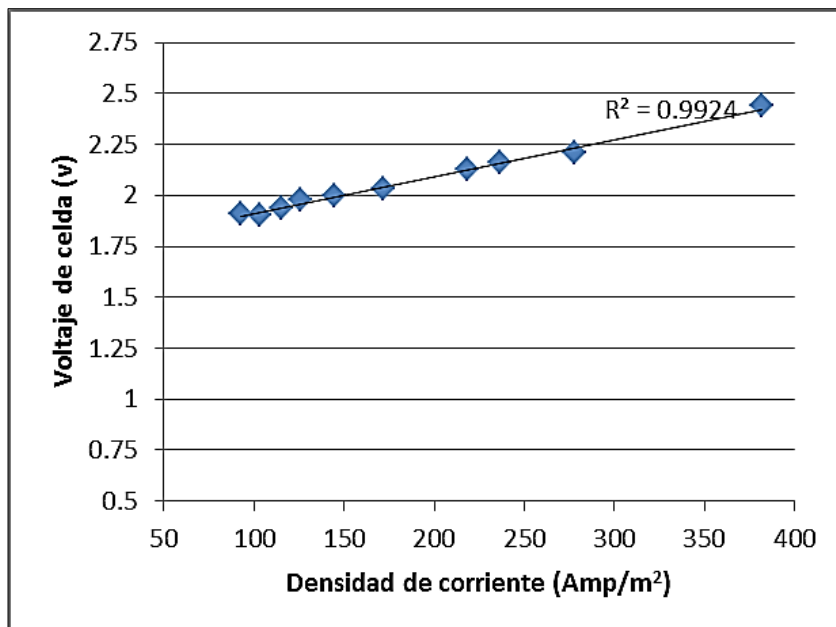


Figura 9. Gráfico densidad de corriente vs voltaje, durante las pruebas a diferentes densidades de corriente.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Medición del voltaje de celda vs distancia entre electrodos

En la figura 10, a cada distancia se observó un incremento del voltaje de celda. Sin embargo en todas las pruebas la calidad del cobre catódico fue buena, por lo tanto, permitió reducir la distancia entre los electrodos en la celda a un voltaje igual 2,21 voltios.

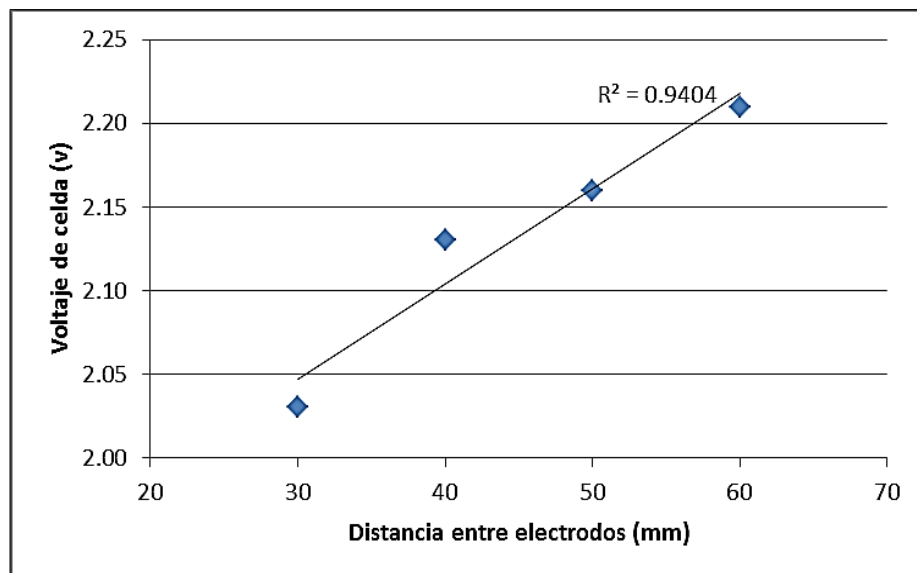


Figura 10. Gráfico del voltaje de celda vs distancia entre electrodos. A una densidad de corriente constante igual a 278,3 A/m².

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Medición de la eficiencia de corriente vs densidad de corriente

En la Figura 11, se puede observar que la eficiencia de corriente llega a un máximo de 94,87 % a una densidad de corriente igual 278,3 A/m². A mayor densidad de corriente la eficiencia decrece. Las eficiencias de corrientes mayores al 100 % puede

explicarse a sobre potenciales que están actuando favorablemente en la electroobtención del cobre.

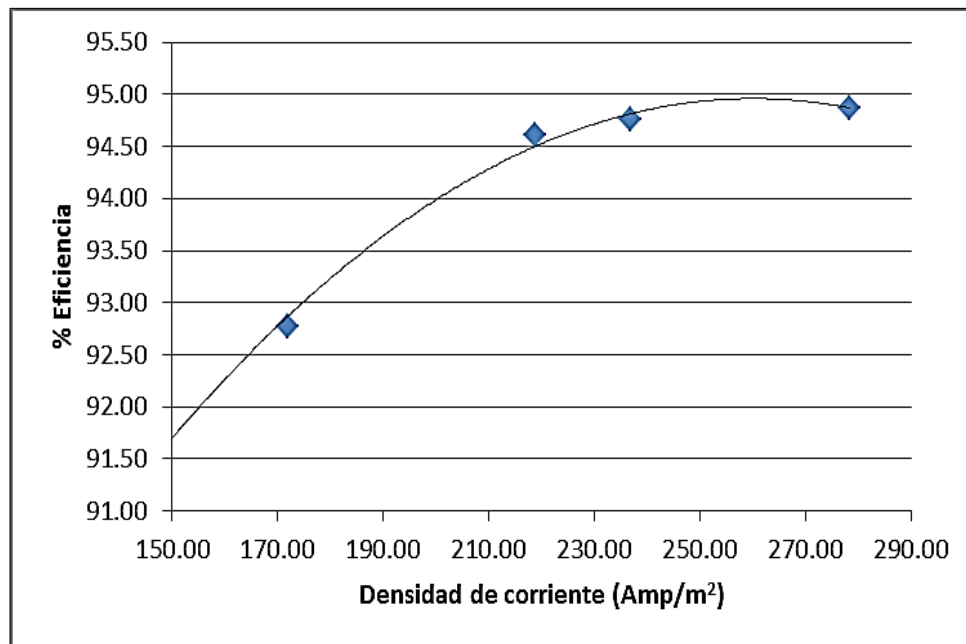


Figura 11. Gráfico densidad de corriente vs eficiencia de corriente a un voltaje de celda promedio 2,21 V.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Discusión

A partir de los resultados obtenidos, vemos que la hipótesis general tiene gran respaldo en el desarrollo de la presente investigación, que estable que modificando la variable densidad de corriente se obtendrá los resultados esperados, a su vez se tendrá que ser cuidadoso con el manejo de la variable puesto que a mayor densidad de corriente la eficiencia decrece.

Las eficiencias de corrientes mayores al 100 % pueden explicarse a sobre potenciales que están actuando favorablemente en la electroobtención del cobre. Los resultados obtenidos muestran el desarrollo de la variable densidad de corriente dentro del proceso de electroobtención, viendo los resultados que se obtienen a diferentes escalas de densidad de corriente.

CONCLUSIONES

La eficiencia de corriente llega a un máximo de 94,87 % a una densidad de corriente igual 278,3 A/m². Se puede confirmar a mayor densidad de corriente en algún instante la eficiencia decrecerá.

Para cada distancia de electrodos se incrementa el voltaje de celda, pero no varía la calidad del cobre catódico, por lo tanto, se permitió reducir la distancia entre los electrodos en la celda a un voltaje igual 2,15 voltios

Los resultados obtenidos de la muestra de cobre electroobtenido a nivel laboratorio, su calidad no llega a alcanzar al del cobre según la norma ASTM B115-91. Se obtuvo una pureza en el cátodo a partir de 45 g/l Cu de 98,5 % de Cu, se puede mejorar con electrolitos de mayor concentración.

RECOMENDACIONES

La electroobtención es particularmente interesante en el proceso de producción de cobre, ya que prácticamente todo el cobre de uso industrial requiere de grado de pureza establecido por los estándares del cobre electrolítico. El cátodo "grado A" contiene más de 99,99 % Cu, se recomienda considerar electrolitos de mayor pureza, con baja presencia de elementos contaminantes como el hierro.

Mayor control de la variable densidad de corriente y a su vez un estudio más profundo sobre las impurezas que se puedan entrar en el proceso que vaya a influir directamente a la calidad del cátodo de cobre.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Casas J. M., Crisóstomo G., Cifuentes I. (2005). "*Speciation of the fe(ii)-fe(iii)-h₂so₄-h₂o system at 25 and 50 °c.*" Hydrometallurgy.

Cifuentes I., Glasner R., Casas J.M. (2003). "*Aspects of the development of a copper electrowinning cell based on reactive electro dialysis.*" Chemical engineering science .

Germán Cáceres, (1994). "*Electroobtención.*" curso de capacitación, Universidad de Atacama.

Habashi F, (2009). "*Recent trends in extractive metallurgy.*" Vol. 45 1B.

Jaime Izquierdo I., (1997). "Electroobtención de cobre (ew)." mining edición español, 27-29.

Navarro et al, (2005). "*Uso de un modelo químico de SX en la obtención matemática de diagramas de Mc Cabe Thiele.*"

Sabacky B.J., Evans J.W. (1979). "*Electrodeposition of metals in fluidized bed electrodes.*" Electrochemical science and technology.

Salas J., Siu s., Evans J.W. (1995). "*Particulate electrodes for the electrowinning of copper.*" En: copper 95 international conference, volume iii, electrorefining and hydrometallurgy of copper. 26 a 29 de noviembre, Santiago, Chile.

Scott K. (1988). "*A consideration of circulating bed electrodes for the recovery of metal from dilute solutions.*" Journal of applied electrochemistry.

Universidad de Atacama, (2012), "*Hidrometalurgia.*"

ANEXOS

Anexo 1. Imágenes del proceso

Anexo 1.1. Filtración de solución electrolítica previo al proceso de electroobtención.



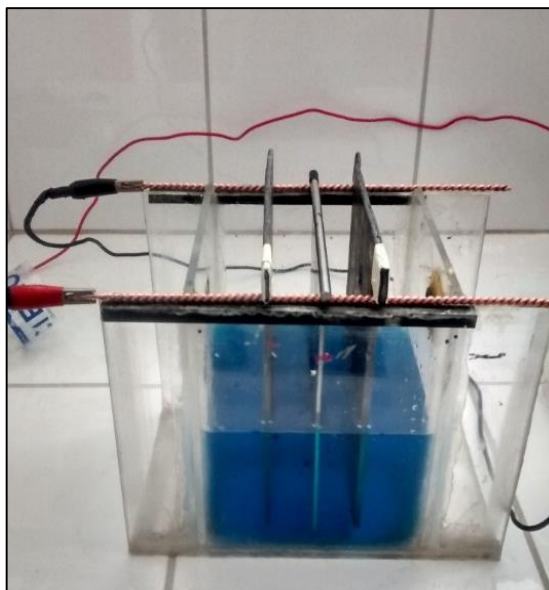
Anexo 1.2. Instalación del equipo rectificador de corriente, a su vez conectando los puestos de cargas.



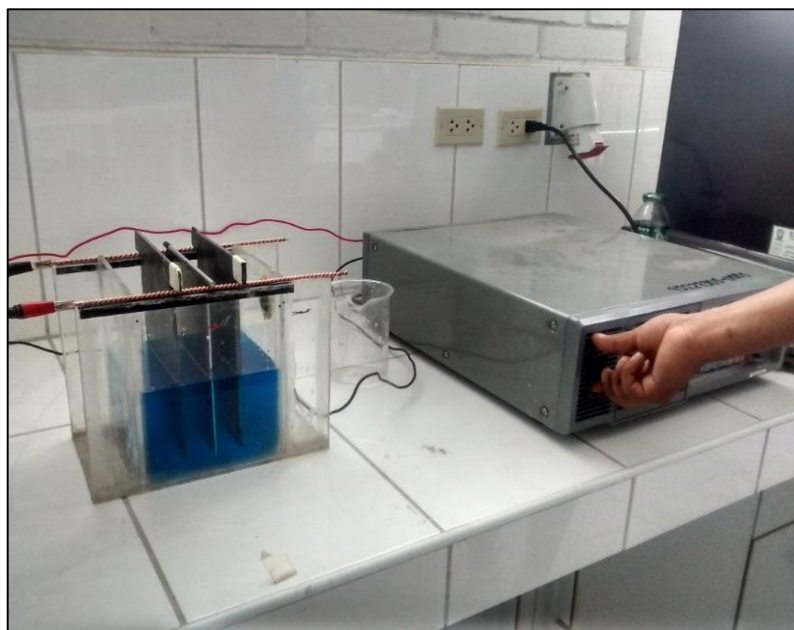
Anexo 1.3. Instalación de los puestos de cargas negativas y positivas en los cátodos y ánodos respectivos.



Anexo 1.4. Una vez filtrado la solución de cobre electrolítico, se vierte dicha solución en la celda, con sus respectivos elementos.



Anexo 1.5. Encendido del rectificador de corriente iniciando con 0,5 Amp y 1,7 V.



Anexo 1.6. Ajuste de corriente para la electroobtención del cobre electrolítico.



Anexo 1.7. Visualización del proceso de electro obtención de cobre.

