

2017

CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE ELCTRO-OBTENCIÓN DE COBRE A NIVEL DE LABORATORIO

VILLALOBOS URRUTIA, JORGE MOISÉS

<https://hdl.handle.net/11673/47374>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSE MIGUEL CARRERA

**CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE ELECTRO-OBTENCIÓN DE COBRE A
NIVEL DE LABORATORIO**

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

Nombre:

Jorge Moisés Villalobos Urrutia

Profesor Guía:

Luis Gutiérrez Meneses

2017

RESUMEN

KEYWORDS: IMPLEMENTACIÓN – LABORATORIO – CELDA DE EO

El presente trabajo tiene por objetivo construir una celda de Electro Obtención (EO) a nivel de laboratorio con el fin de que sea implementada dicha celda en el Laboratorio de Metalurgia de la UTFSM con un correcto funcionamiento. El diseño de la celda debe ser lo más parecido a una celda de Electro Obtención industrial cumpliendo con el objetivo principal que es la depositación de cobre con un alto grado de pureza.

Para poder construir la celda de EO, teniendo en cuenta que la EO es el último proceso en el cual el cobre se obtiene con una pureza del 99,99%, es de suma importancia conocer con que minerales de cobre se trabajará, ya que existen los óxidos y los sulfuros de cobre, con el fin de poder determinar que procesos son los que deben ser aplicados y obtener el cobre con un alto grado de pureza. En esta ocasión como se trata de la EO, los minerales son procesados por la vía de la Hidrometalurgia que corresponden a la Lixiviación, Extracción por Solventes y EO, por lo cual se realizó una investigación bibliográfica previa de todos estos procesos los que se encuentran detallados en el primer capítulo de esta investigación.

En lo que respecta al segundo capítulo, se presenta de una forma más detallada el proceso de EO con todas las condiciones necesarias para llevar a cabo la construcción de la celda de EO y además que esta funcione de una manera eficiente.

Algunas de las condiciones importantes que se deben tener en cuenta para llevar a cabo un correcto proceso de EO, son principalmente la celda y las placas que serán utilizadas como cátodo y ánodos, como en este proceso de EO se utiliza corriente para llevarlo a cabo, deben tener las dimensiones de ambas placas con el fin saber que cantidad de corriente debe ser utilizada, además de estos factores, hay otros que pueden afectar directamente la eficiencia del proceso, como lo son el control de impurezas, la temperatura, la dosificación de los reactivos y el tiempo de cosecha de cátodos.

Teniendo en cuenta las condiciones anteriormente señaladas se procede a diseñar, armar y construir la celda de EO utilizando una fuente de plástico como celda, con 2 placas de plomo utilizadas como ánodos y una placa de acero inoxidable como cátodo (se utiliza solo un cátodo para que el cobre se deposite por ambos lados.) Una vez armada la celda, se prepara la solución a utilizar que es una solución de $\text{Cu}^{2+}=45\text{g/L}$ + 180g/L H^+ , luego se vierte esta a la celda, se realiza la conexión de cables desde una fuente de poder a las placas, se aplica voltaje y corriente acorde a las dimensiones de las placas y se realizan 2 pruebas de obtención o depositación de cobre, las cuales fueron concluidas satisfactoriamente con cierta cantidad de cobre depositado.

ÍNDICE

PÁG.

RESUMEN

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

INTRODUCCIÓN

1

OBJETIVO GENERAL

2

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Procesamiento de minerales de cobre por Lixiviación, extracción por solvente y Electro Obtención 4

1.2. Proceso de Lixiviación del cobre 5

1.3. Proceso de Extracción por solvente 7

1.3.1. Objetivos del proceso de Extracción por solvente 8

1.3.2. Proceso de extracción 9

1.3.3. Proceso de Re-extracción 10

1.3.4. Variables que afectan el proceso de Extracción por solvente 11

1.4. Proceso de Electro Obtención 13

1.4.1. Descripción del proceso de Electro Obtención 14

1.4.2. Variables que afectan el proceso de Electro Obtención 15

CAPÍTULO 2: CONDICIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CELDA DE EO

16

2.1 Principios del proceso de Electro Obtención 17

2.2. Ánodos 19

2.3. Cátodos 19

2.4. Celdas 20

2.5. Proceso de Electrólisis 21

2.6. Electrolito 21

2.7. Condiciones óptimas para llevar a cabo el proceso de Electro Obtención 22

2.8. Diseño de la celda de EO 25

CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

27

3.1 Construcción de la celda de EO 28

3.2. Funcionamiento de la celda de EO 29

3.3. Armado de la celda de EO 32

3.4. Evaluación de la celda de EO 33

3.4.1. Resultados obtenidos en la evaluación de la celda 35

3.5. Procedimiento para el uso de la celda 37

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

38

BIBLIOGRAFÍA

39

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Antecedentes generales	
Fig. 1-1. Diagrama de flujo del procesamiento hidrometalúrgico de minerales de cobre	4
Fig. 1-2. Pilas de lixiviación de faena Radomiro Tomic	5
Fig. 1-3. Riego de una pila de lixiviación	6
Fig. 1-4. Transporte de soluciones, faena Radomiro Tomic	7
Fig. 1-5. Vista aérea de la planta de extracción por solvente, Faena Radomiro Tomic.	8
Fig. 1-6. Mezcla de fase acuosa con fase orgánica	9
Fig. 1-7. Obtención de una fase orgánica cargada con cobre y una fase llamada refino	10
Fig. 1-8. Comienzo de la etapa de re-extracción	10
Fig. 1-9. Término de la etapa de re-extracción	11
Fig. 1-10. Formación de la banda de dispersión	12
Fig. 1-11. Cosecha de cátodos de EO	13
Fig. 1-12. Reacciones involucradas en el proceso de EO	14
 Condiciones para la construcción y evaluación de la celda de EO	
Fig. 2-1. Reacciones provocadas por la energía eléctrica en el proceso de EO	17
Fig. 2-2. Lote de cátodos que serán comercializados	18
Fig. 2-3. Transporte de láminas de cobre	18
Fig. 2-4. Medidas de un ánodo de plomo	19
Fig. 2-5. Medidas de un cátodo de acero inoxidable	20
Fig. 2-6. Disposición de cátodos y ánodos dentro de la celda de EO	21
Fig. 2-7. Corrosión de cátodo producto del cloro	22
Fig. 2-8. presencia de orgánico en el electrolito	23
Fig. 2-9. Cátodo mal depositado producto de la presencia de orgánico	23
Fig. 2-10. Apariencia de una lámina de cobre mal depositada	24
Fig. 2-11. Recipiente de plástico simulador de la nave de EO	25
Fig.2-12. Nave de EO con los electrodos que afirmaran las placas	26
 Procedimiento Experimental	
Fig. 3-1. Placa de acero inoxidable utilizada como cátodo	28
Fig. 3-2. Placas de plomo utilizadas como ánodos	28
Fig. 3-3. Disposición de las placas en la celda vista de forma horizontal	29
Fig. 3-4. Disposición de las placas en la celda, vista aérea	29
Fig. 3-5. Solución de agua y sulfato de cobre	30
Fig. 3-6. Solución que es llevada al proceso de EO	31
Fig. 3-7. Celda de EO lista para la conexión de cables	32
Fig. 3-8. Conexión de cables desde la fuente de poder a las placas dentro de la celda de EO	33

Fig. 3-9. Evaluación de la celda con los valores óptimos	34
Fig. 3-10. Primera medición de la temperatura	34
Fig. 3-11. Segunda medición de la temperatura	35
Fig. 3-12. Tercera medición de la temperatura	35
Fig. 3-13. Cosecha de cátodo prueba 1, 30 minutos	36
Fig. 3-14. Cosecha de cátodo prueba 2, 1 hora	36

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Indicadores económicos del cobre, años 2006-2015	1
Tabla 2. Producción (tmf) procedente de la minería del cobre, grandes empresas según tipo de propiedad de la empresa, año 2015	1

SIGLA Y/O SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

COCHILCO: Comisión Chilena del Cobre

SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería

PLS: Pregnant leaching solution o solución de lixiviación cargada.

pH: Potencial de Hidrógeno

ISA: Industry Standard Architecture

B. SIMBOLOGÍA

A/m²: Ampere por metro cuadrado

cm: Centímetros

Cu²⁺: ion cúprico

CuSo₄: sulfato de cobre

H₂O: agua

g: Gramos

gpL: gramos por Litro

Kg: Kilogramo

L: Litro

m: Metro

m²: Metro cuadrado

m³: Metro cúbico

mm: Milímetro

ml: Mililitro

T: Tonelada

T°: Temperatura

Tmf: toneladas métricas finas

°C: grados celcius

" : pulgadas

%: Porcentaje

INTRODUCCIÓN

La minería es una de las principales actividades de la economía de Chile y forma parte de nuestra entidad como nación, ya que desde muchos años la minería ha sido clave para el desarrollo de nuestro país y ha ido creciendo cada vez más.

En la actualidad la industria minera es indispensable en cuanto al ámbito económico, ya que en Chile el 53,7% de los ingresos extranjeros del país corresponde a exportaciones realizadas por la minería de acuerdo con un estudio realizado por el Banco Central de Chile.

Chile es uno de los mayores productores de cobre del mundo y cada año aumenta su producción; según los indicadores económicos del cobre tal como lo muestra el cuadro 1, entre los años 2006 y 2015, datos emitidos por SERNAGEOMIN y Cochilco, demuestran un crecimiento en la producción de cobre y no solo eso, sino que a nivel mundial Chile es uno de los mayores productores de cobre.

Cuadro 1: Indicadores Económicos del Cobre, años 2006-2015

AÑOS	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Producción Cobre (Miles de Toneladas) ⁽¹⁾	5.382	5.602	5.364	5.412	5.457	5.257	5.485	5.851	5.793	5.833
Exportación Minera Cobre Millones US\$ ⁽²⁾	33.340	38.299	34.250	26.937	40.342	42.664	42.322	39.739	37.969	30.374
Exportación Total País Millones US\$ ⁽²⁾	58.995	68.464	67.765	53.024	71.028	80.586	78.813	77.368	76.649	63.362
Participación Cobre Sobre Total País (%)	57	56	51	51	57	53	54	51	50	48

Fuente: ⁽¹⁾ SERNAGEOMIN - ⁽²⁾ COCHILCO

Según los valores de cobre producido contenidos en el cuadro 1, hay una gran cantidad de cobre el cual proviene del proceso de Electro Obtención, aproximadamente un 37%, este dato obtenido del cuadro numero 2 publicado por SERNAGEOMIN.

Cuadro 2 :Producción (tmf) procedente de la minería del cobre, grandes empresas según tipo de propiedad de la empresa, año 2015.

TIPO DE PROPIEDAD	PRODUCTOS	PRODUCCIÓN (tmf)
TOTAL GRANDES EMPRESAS		5.567.871
CODELCO	TOTAL (tmf)	1.731.698
	Cátodos (EW y SX)	957.205
	Refinado a fuego	-
	Blister	50.885
	Concentrados	723.608
EMPRESAS PRIVADAS	TOTAL (tmf)	3.836.173
	Cátodos(EW y SX)	1.195.238
	Concentrados	2.628.972
	Minerales de concentración	11.963

Fuente: SERNAGEOMIN

Dado estos resultados de la producción de cobre y exportación del cobre producido, hay una gran cantidad que se comercializa en forma de cátodos de cobre el cual proviene del proceso de Electro Obtención y Electro Refinación. Es por ello que nace la necesidad de conocer e implementar en nuestro laboratorio de metalurgia uno de los dos procesos anteriormente mencionados, optando por el proceso de Electro-Obtención de cobre, con la finalidad de construir una celda de Electro Obtención para conocer así de manera práctica como es llevado a cabo el proceso, ya que en nuestra Universidad no existe en su laboratorio una celda de Electro-Obtención y solo se conoce el proceso de manera teórica. Por lo que al construir esta celda se ampliará el conocimiento de los alumnos de nuestra Universidad.

Este trabajo concluirá con la entrega de un procedimiento para el uso de la celda ya que es de suma importancia conocer este proceso con el fin de que los datos emitidos y presentados a nivel industrial puedan ser demostrados a nivel de laboratorio.

OBJETIVO GENERAL

Construir una celda de electro-obtención en el laboratorio de la UTFSM sede Viña del Mar.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los procesos Hidrometalúrgicos del cobre (Lixiviación, SX, EO) mediante variables operacionales.
- Establecer las condiciones para la construcción de la celda de Electro-Obtención mediante variables operacionales.
- Evaluar un procedimiento para el uso de la celda de Electro Obtención con los resultados obtenidos en la evaluación de la celda.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1 PROCESAMIENTO DE MINERALES DE COBRE POR LIXIVIACIÓN, SX Y EO

La extracción de metales por hidrometalurgia se lleva a cabo mediante operaciones por vía húmeda que se realizan a través de reacciones en fase acuosa y a bajas temperaturas (en el rango de 25 a 250 °C). Este proceso se realiza para minerales que son solubles, en general minerales oxidados.

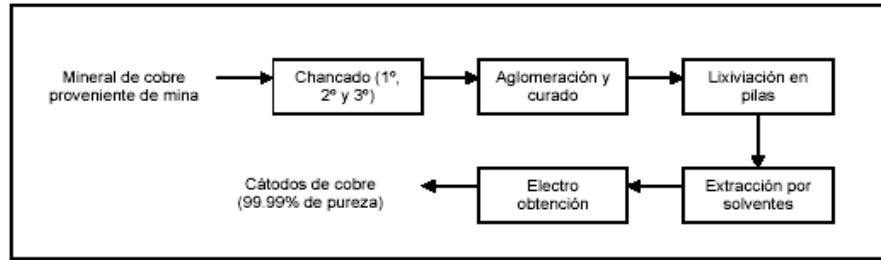
Los minerales que se extraen de la naturaleza no son puros, sino que están mezclados con materias estériles, que constituyen la ganga del mineral. Estas materias se encuentran en la naturaleza rodeando al mineral o conocido como mena y no se pueden separar al momento de arrancar el mineral en condiciones económicas y ventajosas.

Para ello existe una serie de procesos el cual tienen la finalidad de poder tratar los minerales hasta lograr obtener en metal útil o de interés con el mayor porcentaje de pureza. La secuencia del procesamiento de los materiales metálicos por hidrometalurgia incluye las siguientes etapas:

- Lixiviación
- Extracción por solvente (SX)
- Electro Obtención (EO)

Esta última etapa tiene por objetivo recuperar el cobre en forma sólida a partir de una solución rica en iones de ion cúprico (Cu^{2+}), y que genera como producto cátodos de cobre de alta pureza, alrededor de 99.99%. Una de sus características principales en comparación con la fundición de concentrados, es que es un proceso mucho menos contaminante. En Chile, alrededor del 37% de la producción total de cobre de mina proviene de la utilización de esta técnica (SERNAGEOMIN 2015).

Previo a este proceso existen distintas etapas las que conllevan a poder recuperar el metal útil que se encuentra en el mineral tal como lo muestra la figura 1-1.



Fuente: Imagen extraída de tesis "Diseño, construcción y optimización de una celda de EO de cobre con cátodo particulado móvil basada en electro diálisis reactiva.

Figura 1-1. Diagrama de flujo del procesamiento hidrometalúrgico de minerales de cobre.

La primera etapa o proceso que se realiza una vez obtenido el mineral de la mina es el chancado con el objetivo de obtener una granulometría de $\frac{1}{2}$ " como tamaño máximo. El obtener dicho tamaño permite exponer los minerales oxidados al ataque de la solución ácida.

Dependiendo de la dureza del mineral existen 3 etapas de chancado conocidas como chancado primario, chancado secundario y chancado terciario.

Una vez el mineral ya chancado es sometido a una primera irrigación con solución de agua y ácido sulfúrico, conocida como proceso de aglomerado y curado, de manera de iniciar el camino para el proceso de lixiviación.

El éxito final en la obtención de los cátodos de cobre con un 99,99% de pureza va a depender de cada uno de los éxitos alcanzados por cada proceso perteneciente a la Hidrometalurgia.

1.2. PROCESO DE LIXIVIACIÓN DEL COBRE.

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico basado en el hecho de que los minerales oxidados liberan sus especies metálicas ante un ataque ácido que permite separar el cobre del resto de las especies minerales.

Para poder realizar este proceso, se requiere de un lugar amplio o una superficie de apoyo de la pila en donde se pondrá la impermeabilización. Cuando el patio o lugar en donde es depositado el mineral es recuperado para reutilizarlo con nuevo material, se trata de lixiviación en depósitos y si el patio o lugar donde es apilado el material no es recuperado y el mineral agotado queda en la pila como vertedero, se trata de lixiviación en pilas.

En la figura 1-2 se muestran unas pilas de lixiviación de la faena Radomiro Tomic, de dimensiones 1300 m de largo por 380 m de ancho, con un apilamiento de 10 m de altura y un ángulo de reposo de material de 37°.



Fuente: https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_lixivacion_lixivacion.asp

Figura 1-2. Pilas de lixiviación de faena Radomiro Tomic.

Una vez que el mineral está preparado y dispuesto para ser apilado se coloca en montones de sección trapezoidal con una altura calculada (pilas) para proceder a su riego con una solución preparada de agua y ácido sulfúrico.

Sobre el mineral ya apilado se instala un sistema de riego por goteo y aspersores que van cubriendo toda el área expuesta tal como lo muestra la figura 1-3, y es a través de este sistema de riego que se vierte la solución de agua y ácido sulfúrico en la superficie de la pila. Esta solución se infiltra hasta la base de la pila, disolviendo el cobre que se encuentra en los minerales oxidados, con lo cual se forma una solución de sulfato de cobre llamada pregnant leaching solution (PLS). Bajo las pilas se instala previamente una carpeta impermeable, sobre la cual se dispone un sistema de tuberías que permite canalizar y acopiar las soluciones.



Fuente: https://www.aulados.net/Temas_ambientales/Aguas_contaminacion_Chile/Contaminacion_aguas_Chile.htm

Figura 1-3. Riego de una pila de lixiviación.

El riego de las pilas se mantiene por un período de entre 45 y 100 días, dependiendo del tiempo requerido para agotar el cobre lixiviable casi de manera total. El material restante o ripio es transportado a botaderos, donde existe la posibilidad de iniciar un segundo proceso de lixiviación para recuperar aún más cobre soluble.

Para que este proceso de lixiviación tenga éxito y sea realizado correctamente, se tienen que considerar una serie de factores, siendo el primero asegurar la permeabilidad de la masa a lixiviar, de manera que el líquido lixivante pase a través de todo el material y que el contacto entre el agente lixivante y el mineral sea el óptimo. El óptimo contacto entre estos dos depende de los siguientes factores, los que deben ser considerados en todas las etapas del proceso:

- La localización de los minerales a disolver
- Volumen del material y distribución de tamaños
- Área expuesta
- Superficie específica
- Tamaño de partículas
- Porosidad
- Presión capilar
- Rugosidad o aspereza de las superficies

Teniendo en cuenta todos estos factores, realizado el apilamiento del material, instalado el sistema de goteo y realizado el riego de la pila se procede a realizar la recolección de soluciones.

Al costado de cada pila se encuentran unas canaletas de recolección de las soluciones como lo muestra la figura 1-4. Estas canaletas están divididas en dos secciones para poder conducir por gravedad, separada e independientemente las soluciones ricas, pobres y en mineral lixiviado.



Fuente: https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_lixivacion_lixivacion.asp

Figura 1-4. Transporte de soluciones faena Radomiro Tomic.

Las soluciones recogidas son llevadas primero a piscinas desarenadoras para ser calificadas y desde allí fluyen a diferentes piscinas según la calidad de la solución.

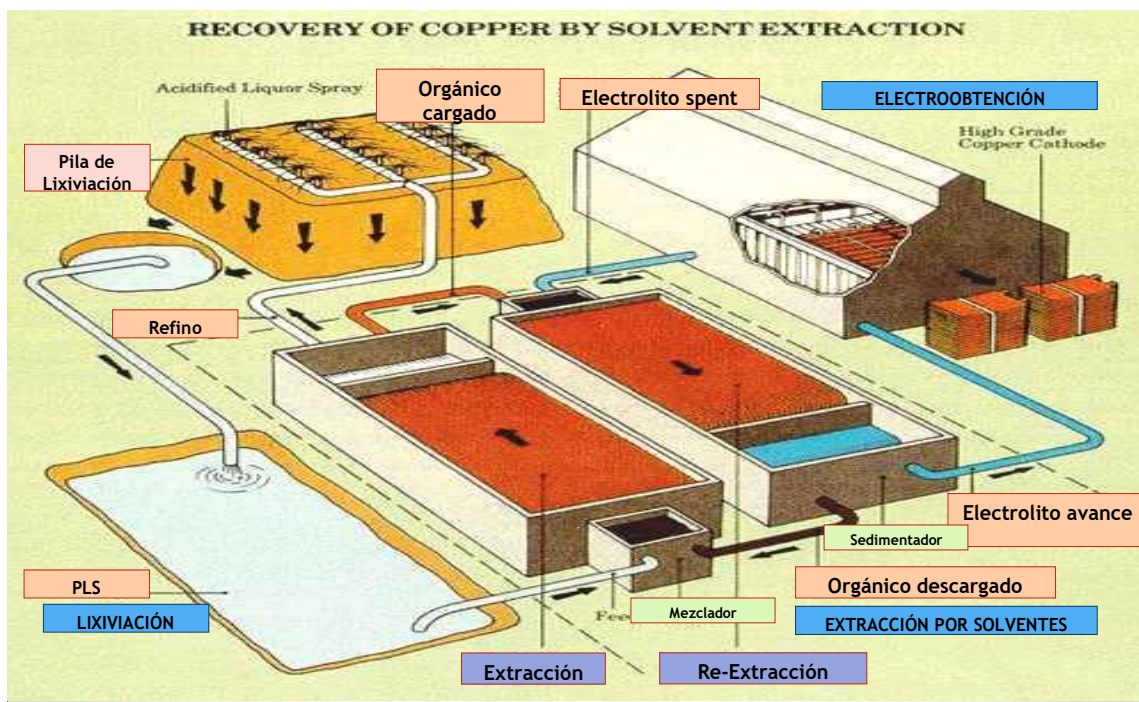
Por lo general del proceso de lixiviación del cobre la solución contiene hasta 9 g/L de concentración el cual es llevado al siguiente proceso que es de extracción por solvente (SX).

1.3. PROCESO DE EXTRACCIÓN POR SOLVENTE (SX):

El proceso de SX es uno de los procesos más efectivos y económicos para purificar, concentrar y separar los metales valiosos que se encuentran en las soluciones provenientes del proceso de lixiviación.

La principal aplicación de este proceso se encuentra en la producción de cobre, específicamente en la separación selectiva de metales que son recuperados mediante el proceso de EO a través de soluciones de sulfato de cobre realizando las etapas que se muestran en la figura 1-5.

También es utilizado para recuperar uranio, vanadio, molibdeno, zirconio, tungsteno, renio, elementos de tierras raras, metales preciosos, cadmio, germanio, berilio y boro, entre otros.



Fuente: https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_lixivacion_extraccion.asp

Figura 1-5. Vista aérea de la planta de extracción por solventes Faena Radomiro Tomic.

1.3.1. Objetivos del proceso de SX

El proceso de SX, se incorpora como parte de un sistema integral de recuperación de hidrometalurgia y al ser integrado como tal, dentro de un círculo metalúrgico busca cumplir los siguientes objetivos:

- Separar y purificar uno o más metales de interés contenidos en una solución que suele tener impurezas. Dicha separación consiste en extraer el o los metales deseados desde soluciones o extraer las impurezas de la solución dejando los metales deseados o de interés en ella.
- Concentrar los metales disueltos para poder disminuir los volúmenes a procesar y reducir los costos del proceso siguientes que es la EO.
- Transferir los metales disueltos desde una solución acuosa compleja a otra solución diferente por medio de las etapas de extracción y reextracción con la finalidad de ir simplificando el proceso.

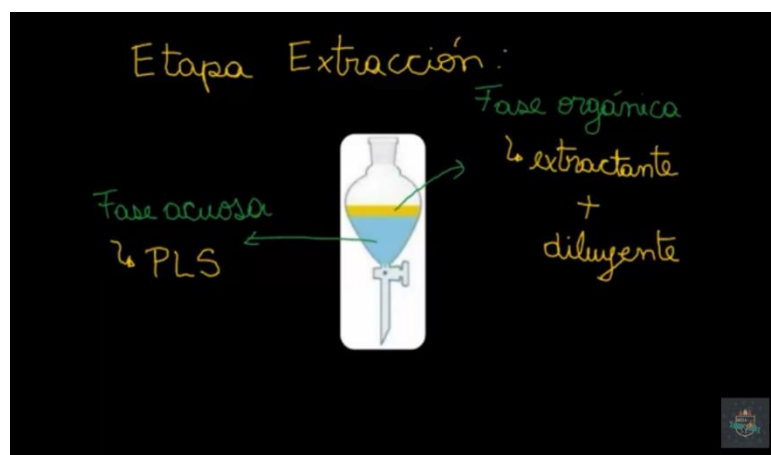
Estos objetivos se disponen dado que en el proceso de lixiviación ocurre una disolución de otros componentes minerales que se encuentran en la pila y es por ello que es indispensable realizar la purificación de las soluciones como una etapa previa a la EO del metal.

En general, en el proceso de extracción por solventes se reconocen dos etapas fundamentales: la etapa de "extracción" propiamente tal y la de "re-extracción o stripping", también llamada "descarga".

1.3.2. Proceso de extracción

La solución que debe entrar al proceso siguiente de EO, debe tener una alta concentración de cobre y una mínima cantidad de impurezas.

En la extracción se utiliza un reactivo orgánico que tiene por objetivo capturar el metal desde la fase acuosa, para ello el PLS proveniente del proceso de lixiviación se mezcla y agita rigurosamente con una fase orgánica que es una mezcla de un extractante de entre 10% y 15% con un diluyente entre un 85% y 90% como se muestra en la figura 1-6.

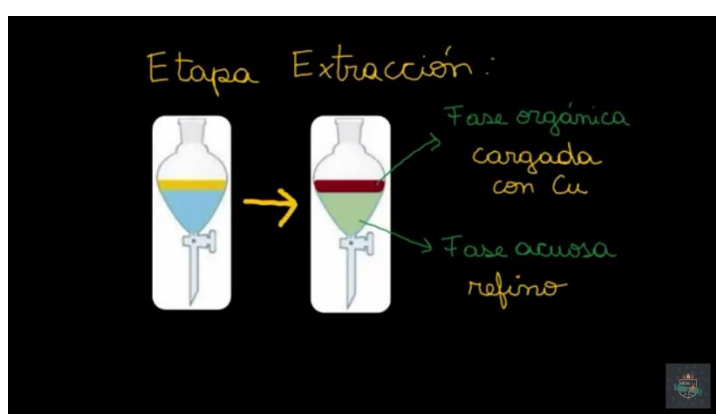


Fuente: Proceso de SX, imagen capturada de video

Figura 1-6. Mezcla de fase acuosa con fase orgánica.

El extractante es un reactivo químico viscoso y menos denso que el agua el cual tiene una alta afinidad por el cobre y es capaz de retenerlo en su estructura; el diluyente se utiliza para disminuir la viscosidad de la fase orgánica, permitiendo que esta fluya fácilmente. Hay ocasiones en las que se debe usar otro reactivo denominado modificador el cual facilita la separación de las fases.

Luego de mezclar y agitar la fase acuosa con la fase orgánica, se obtiene una solución orgánica cargada con cobre y una fase acuosa llamada refino que es pobre en cobre, tal como lo muestra la figura 1-7.



Fuente: Proceso de SX, imagen capturada de video

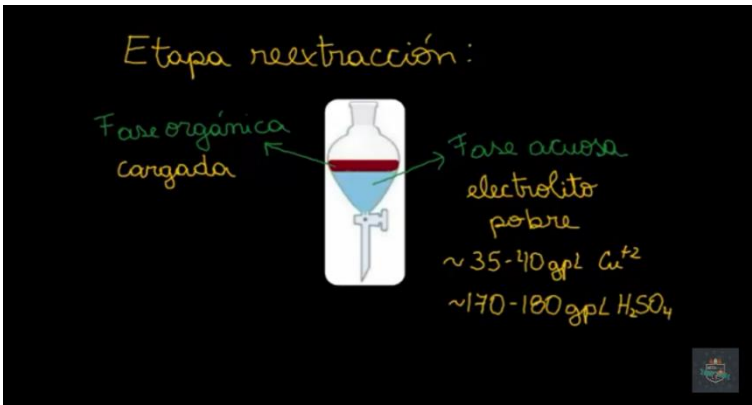
Figura 1-7. Obtención de una fase orgánica cargada con cobre y una fase llamada refino.

El refino es utilizado para regar las pilas de lixiviación y se caracteriza por tener una alta concentración de ácido y una baja concentración de cobre.

La etapa de extracción se caracteriza por tener una baja acidez, es decir, un pH en torno a 1,4 y 2.

1.3.3. Proceso de Re-extracción

Luego de la etapa de extracción viene la etapa de re-extracción en la cual hay una fase orgánica cargada con cobre y una fase acuosa que es un electrolito pobre proveniente de EO como lo muestra la figura 1-8.

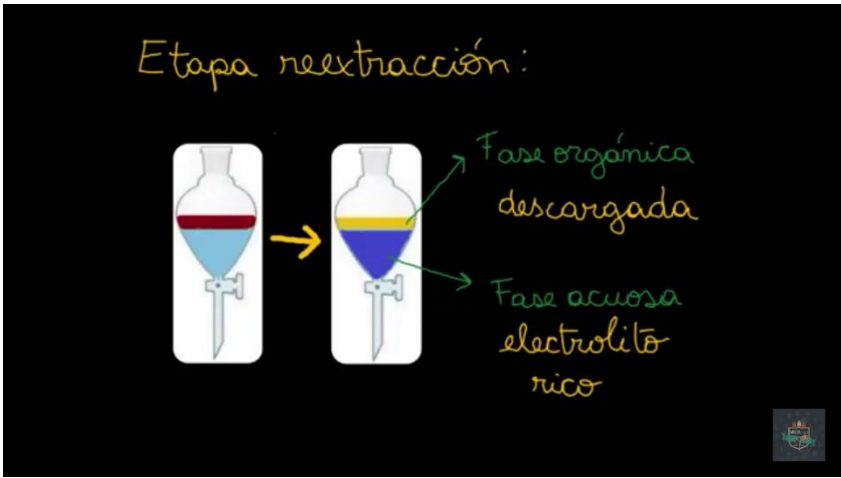


Fuente: Proceso de SX, imagen capturada de video.

Figura 1-8. Comienzo de la etapa de reextracción.

Esta fase acuosa se caracteriza por tener alrededor de 35 y 40 gpL de cobre y entre 170 y 180 gpL de ácido sulfúrico. Esta alta acidez permite que la fase orgánica libere el cobre que tiene retenido y se cargue con protones.

En la etapa de re-extracción una vez aplicado el sistema, tendremos una fase orgánica descargada de cobre y una fase acuosa que va a llamarse electrolito rico como lo muestra la figura 1-9, el cual es llevado a la etapa de EO.



Fuente: Proceso de SX, imagen capturada de video

Figura 1-9. Término de la etapa de re-extracción.

1.3.4. Variables que afectan el proceso de SX

El proceso de SX no es un proceso independiente ya que se debe considerar una compatibilidad con la Lixiviación y EO respecto a la continuidad del proceso ya que hay soluciones que avanzan al proceso siguiente como hay soluciones que son recirculadas al proceso anterior.

Es importante además para poder llevar a cabo un eficiente proceso de SX considerar las variables que se describen a continuación el cual que afectan directamente el proceso:

- Tiempo de retención: es el tiempo promedio en que un volumen unitario de solución permanece en el mezclador.

Este tiempo se determina de acuerdo a la cinética del sistema según la eficiencia del equilibrio que se desea alcanzar por cada etapa.

- Velocidad de agitación: Se refiere a la velocidad tangencial del agitador, en el mezclador.

Un punto clave en el diseño de un agitador es el sistema de agitación para obtener una buena transferencia del elemento metálico a la fase respectiva, y obtener, además, un apropiado tamaño de gota en la emulsión. A nivel industrial se produce una agitación o mezcla en contra corriente y a nivel de laboratorio se realiza un movimiento similar al realizado por el barman que trabajan en las barras sirviendo tragos.

Existen dos posibles casos de una mala o deficiente agitación:

- Agitación baja: se presentan problemas en la dispersión, y, por lo tanto, en la eficiencia de transferencia de cobre en las etapas.
- Agitación alta: se hace más difícil la separación de las fases lo que aumenta la contaminación entre ellas, y también aumentan los consumos de energía.

- Reactivo y concentración: para la elección del reactivo orgánico es necesario tener en cuenta los siguientes factores:

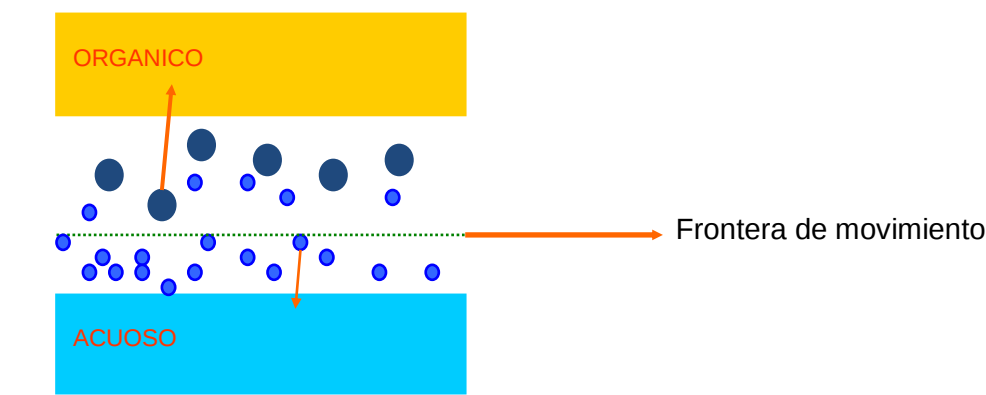
- Disponibilidad y costo del reactivo.
- Alta facilidad de formación de un complejo con el metal que interesa extraer.

Los reactivos tienen unas pautas el cual indican que trabajan a ciertas temperaturas, a ciertos pH y con ciertos minerales.

- Solubilidad del compuesto órgano-metálico en la fase orgánica y recuperación del extractante.

- Temperatura: Tiene un efecto significativo en las características de separación de fases en el circuito (formación de bandas de dispersión).

- Banda de dispersión: corresponde al espesor en que se produce visualmente la separación de las 2 fases en un decantador. Esta banda interesa porque hace un efecto de filtro tanto para el orgánico como para el acuoso como lo muestra la figura 1-10.



Fuente: Proceso de SX, PPT entregado por docente.

Figura 1-10. Formación de la banda de dispersión.

La formación de la banda de dispersión está relacionada con el tiempo de decantación y sobre el espesor de esta influye la temperatura, el tamaño de las gotas, la viscosidad y la diferencia de densidad entre las dos fases.

Al existir una banda muy pequeña esta se considera poco filtrante y en caso de continuidad acuosa, la solución orgánica puede arrastrar a la solución acuosa, en el caso de ser el espesor de la banda más elevado las fases se contaminarían entre sí producto de un arrastre mecánico de las emulsiones, es por ello que a nivel industrial un tamaño óptimo de espesor de una banda varía entre los 8 y 14 cm.

1.4. PROCESO DE ELECTRO OBTENCIÓN (EO):

El proceso de EO es uno de los procesos más sencillos para recuperar de forma pura y selectiva metales contenido en una solución. Se lleva a cabo en estanques rectangulares de concreto polimérico llamados celdas, en cuyo interior se disponen placas metálicas sumergidas en una solución ácida. Estas placas corresponden, alternadamente, a cátodo y ánodo. En la actualidad, la gran mayoría de las operaciones utiliza cátodos permanentes de acero inoxidable, en detrimento de las láminas iniciales de cobre usadas hasta hace unos años.

Todas las placas están conectadas de manera de conformar un circuito por el que se hace circular una corriente eléctrica continua, desde ánodo a cátodo. El cobre en solución, en la forma de ion Cu^{2+} , es atraído por el polo negativo representado por los cátodos, migra hacia éstos y se deposita en su superficie como Cu^0 .

Una vez transcurridos seis a siete días desde que los cátodos permanentes sin depósito de cobre se ingresaran a la celda, se efectúa la cosecha de cátodos como se muestra en la figura 1-11. Éstos son lavados con agua caliente para remover posibles impurezas de su superficie y luego son llevados a la máquina despegadora, donde en

forma automática se separan las hojas de depósito de ambas caras. Con esto, el cátodo está listo para ser utilizado en un nuevo ciclo de depósito de cobre.



Fuente: Imagen extraída de tesis "Diseño, construcción y optimización de una celda de EO de cobre con cátodo particulado móvil basada en electro diálisis reactiva.

Figura 1-11. Cosecha de cátodos de EO.

Finalmente, las hojas de cobre recién despegadas de los cátodos son apiladas y embaladas para su posterior transporte y comercialización.

1.4.1. Descripción del proceso de EO de cobre.

Este proceso consiste básicamente en recuperar el metal desde una solución proveniente del proceso de lixiviación debidamente acondicionada (solución electrolito), para luego depositarlo en un cátodo, utilizando un proceso llamado electrólisis.

En la EO convencional de cobre, existe una corriente continua impuesta el cual circula de ánodo a cátodo a través de una solución ácida de sulfato de cobre proveniente, comúnmente, del procesamiento de minerales oxidados de cobre. El cobre es depositado sobre el cátodo y el agua se descompone sobre el ánodo (reacciones catódica y anódica, respectivamente), dando lugar al desprendimiento de oxígeno como se muestra en la figura 1-12.

- ♦ **Rxn. Anódica:** $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$: **Descomposición agua**
- ♦ **Rxn. Catódica:** $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^0$: **Precipitación cobre**
- ♦ **Rxn. Celda (Iónica):** $\text{H}_2\text{O} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + \text{Cu}^0$

Fuente: Proceso de EO, PPT entregado por docente.

Figura 1-12. Reacciones involucradas en el proceso de EO.

El ánodo, corresponde a una aleación de plomo, calcio y estaño, esta aleación es insoluble cuando posee su respectiva capa de pasivación (capa de óxidos de Plomo generada por el sobre potencial anódico al que ocurre la reacción de descomposición del agua). El cátodo es una lámina inicial de cobre o de acero inoxidable (en la actualidad, el cátodo de acero inoxidable es el estándar según tecnología ISA utiliza una placa de acero inoxidable 315L.), y sobre él se deposita el cobre presente en la solución electrolítica hasta el momento de la “cosecha”, término usado para definir el momento en que el cátodo es retirado de la celda electrolítica y reemplazado por una nueva lámina inicial.

Este proceso requiere de energía para conducir las reacciones, para vencer la resistencia de la solución y para compensar las varias pérdidas que se producen en el proceso (pérdidas químicas, térmicas y eléctricas).

La EO se lleva a cabo en celdas de 6 a 8 m de largo, 1 a 1.5 m de ancho y de 1 a 1.5 m de profundidad, siendo el volumen típico de una de estas celdas igual a 10 m³. Se utilizan ánodos y cátodos laminares de aproximadamente 1 m² de superficie por lado y se colocan de manera alternada al interior de la celda. La distancia entre ánodo y cátodo, que normalmente fluctúa alrededor de los 45 mm, se define de tal modo de disminuir al máximo la caída de tensión que se produce por la resistencia del electrolito, pero manteniendo una distancia suficiente para evitar cortocircuitos.

Los electrólitos industriales poseen una amplia variedad de especies, debido a que pueden incorporar arrastres de orgánico desde la etapa de SX y a que su composición depende de la mineralogía propia de cada faena y del proceso hidrometalúrgico usado.

1.4.2. Variables que afectan el proceso de EO

Al igual que en la SX existen algunas variables que se deben considerar para poder realizar una correcta depositación del cobre en los cátodos, para ellos las variables a considerar son las siguientes:

- Control de impurezas
- Dosificación de reactivo
- Densidad de corriente
- Temperatura

Todas estas variables serán consideradas junto a otras condiciones para llevar a cabo un buen proceso de EO (definidas en el capítulo 2 título 2 donde se especifican las condiciones para la construcción de l EO) y obtener como resultado final cátodos de cobre con un 99,99% de p nas con una buena apariencia física las que serán comercializadas.

CAPÍTULO 2: CONDICIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN
DE LA CELDA DE EQ

2. CONDICIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CELDA DE EO

2.1. PRINCIPIOS DEL PROCESO DE EO.

Como bien se ha mencionado, la EO es uno de los procesos actuales más simples y sencillos para recuperar metales en forma pura y selectiva, respecto a las impurezas presentes en solución.

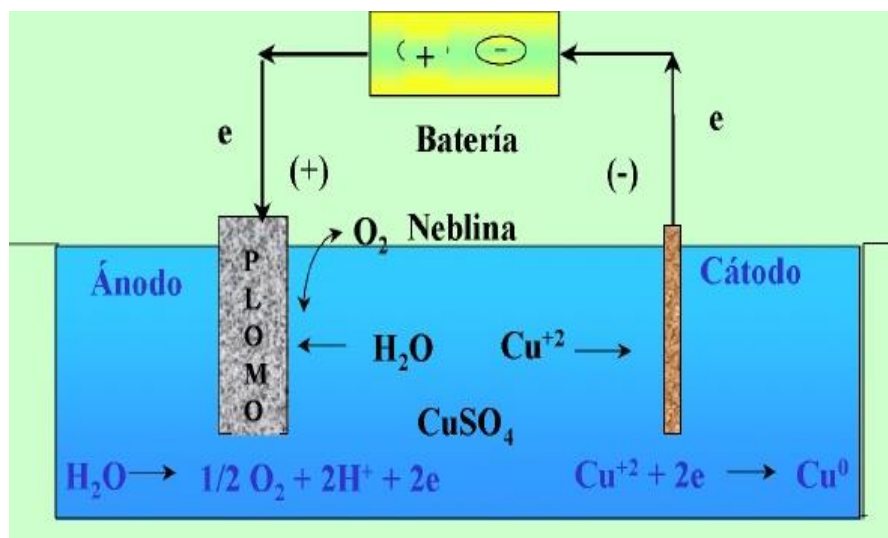
Los objetivos principales de la EO son:

- Recuperar el cobre desde un electrolito en la forma de cátodos.
- Obtener cátodos de alta pureza con buena apariencia física.
- Producir cátodos con el menor consumo de energía y costo asociado.

Para lograr estos objetivos se debe realizar una serie de etapas y el proceso en sí consiste en la transformación electroquímica del cobre disuelto en un electrolito, en cobre metálico depositado en un cátodo, mediante la energía eléctrica.

El cobre iónico del electrolito se deposita selectivamente sobre la superficie del cátodo y a la vez se descompone en oxígeno y ácido sulfúrico en la superficie de los ánodos.

En lo que son las celdas de EO ocurren reacciones electroquímicas de oxidación y reducción provocadas por la energía eléctrica tal como lo muestra la figura 2-1.



Fuente: Proceso de EO, PPT entregado por docente.

Figura 2-1. Reacciones provocadas por la energía eléctrica en el proceso de EO.

Las naves de EO contienen 264 celdas y cada una de ellas están compuesta por 60 cátodos de acero inoxidable y 61 ánodos compuestos de una mezcla de plomo, calcio y estaño el cual se alternan en un ánodo y un cátodo respectivamente, y se conectan conformando un circuito donde se hace transitar energía eléctrica, la cual entra por el ánodo y sale por el cátodo.

El Cu^{2+} es atraído por el polo negativo pegándose partícula por partícula en la superficie del cátodo en forma metálica.

El proceso dura de 6 a 7 días; el cobre se deposita en ambas caras del cátodo con un espesor de 3-4 cm y con un peso total de 40 kg por cátodo. Finalmente, una grúa retira de a 20 cátodos por maniobra.

La lingada es lavada con agua caliente para remover las impurezas de su superficie y se transporta a la máquina despegadora de cátodos.

Las láminas de cobre son embaladas en lotes de 60 como se muestra en la figura 2-2, enzunchadas y luego pesadas.



Fuente: <http://www.export-metal.com/catodo-de-cobre.html>

Figura 2-2. Lote de cátodos que serán comercializados.

En cada paquete, el primer cátodo identifica el número de lote, el total de Kg del paquete y la fecha. En el segundo cátodo, se realiza el muestreo que permite determinar el contenido de cobre; los paquetes luego son despachados en camiones como se muestra en la figura 2-3.



Fuente: Proceso de EO, PPT entregado por docente.

Figura 2-3. Transporte de láminas de cobre.

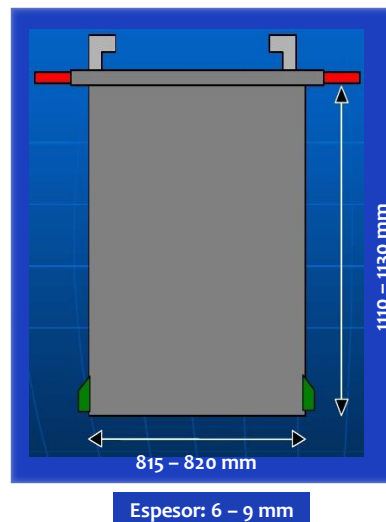
2.2. ÁNODOS:

Los ánodos empleados o utilizados en las celdas de EO están compuestos de material de aleación inerte que no participa en la reacción, pero actúa como soporte eléctrico en donde se produce la oxidación con liberación de electrones.

Este es utilizado dentro de la celda como electrodo de carga positiva el cual se usa para hacer pasar la corriente eléctrica por el electrolito.

Existe un déficit de electrones y produce que se descomponga el agua generándose oxígeno gaseoso (este burbujea en la superficie del ánodo), y ácido sulfúrico.

Las medidas de los ánodos son: 815-820 mm de ancho por 1110-1130 mm de largo y con un espesor de 6-9 mm tal como lo muestra la figura 2-4.



Fuente: <https://es.slideshare.net/AnHeII/hidro-ew>

Figura 2-4. Medidas de un ánodo de plomo.

2.3. CÁTODOS:

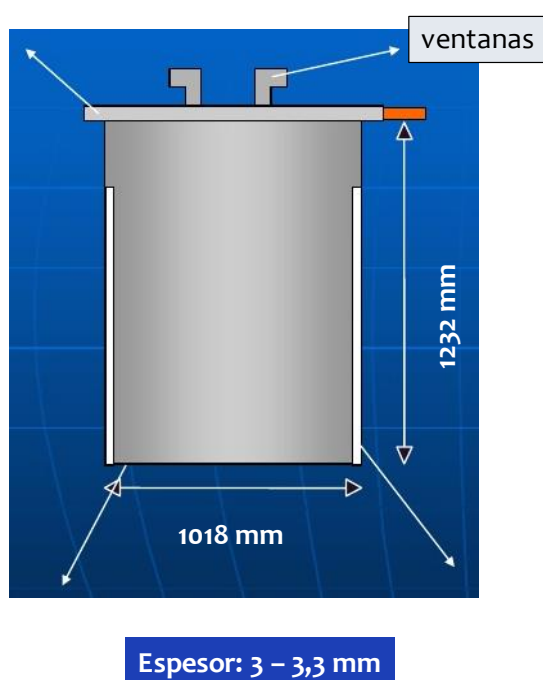
Los cátodos empleados o utilizados en la celda de EO para que el cobre en forma metálica sea depositado sobre él, corresponde a una placa de acero inoxidable.

Corresponde además al electrodo de carga negativa utilizado dentro de la celda para que se produzcan las reacciones provocadas por la energía eléctrica. Este electrodo es conductor y en su superficie se realiza un proceso de reducción con los electrones provenientes del ánodo.

La reacción producida en el cátodo se debe a que el ion cúprico Cu^{2+} es reducido a cobre Cu^0 por los electrones suplidos por la corriente.

La placa de acero inoxidable consta además de 2 ventanas para permitir su levante por los ganchos del marco de la grúa. Sus bordes están recubiertos con cera removible para facilitar el despegue de las planchas de cobre.

Las medidas de los cátodos son: 1018 mm de ancho por 1232 mm de largo y con un espesor de 3 mm - 3,3 mm tal como lo muestra la figura 2-5.



Fuente: <https://es.slideshare.net/AnHeII/hidro-ew>

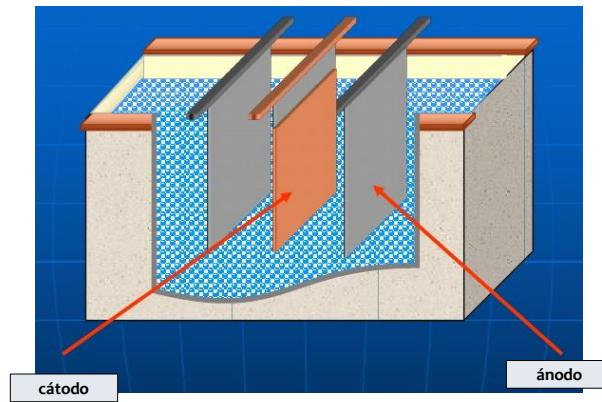
Figura 2-5. Medidas de un cátodo de acero inoxidable.

2.4. **CELDAS:**

Las celdas electrolíticas corresponden a un estanque rectangular que contiene el electrolito. Se realiza una reacción electroquímica no espontánea dentro de esta, debido a la energía eléctrica proveniente de una fuente de poder.

Las celdas, debido a sus características del proceso y sus limitaciones, se requiere disponer de un alto número de ellas de acuerdo a la producción deseada.

Estas tienen una capacidad para 60 cátodos y 61 ánodos el cual van alternados como se muestra en la figura 2-6.



Fuente: <https://es.slideshare.net/AnHeII/hidro-ew>

Figura 2-6. Disposición de cátodos y ánodos dentro de la celda de EO.

2.5. **PROCESO DE ELECTRÓLISIS:**

La conductividad eléctrica de las sustancias consiste en un desplazamiento de la carga eléctrica a través de ellas en el cual dicho movimiento de las cargas puede producirse de dos maneras distintas:

Puede ser a través de un flujo de electrones, como sucede en los metales, a los cuales se les conoce como conductores de primera especie o a través del movimiento de los iones positivos y negativos, mediante una disolución o mediante un compuesto iónico fluido. Esta forma de conductividad se conoce como conductividad iónica, también llamada, electrolítica, tratándose de la conductividad propia de los electrolitos que son conductores de segunda especie.

El proceso de electrólisis se puede definir como un proceso en el que el paso de la corriente eléctrica a través de una disolución o a través de un electrolito fundido, da como resultado una reacción de oxidación – reducción (redox), no espontánea.

2.6. **ELECTROLITO:**

Un electrolito es cualquier sustancia que contiene en su composición iones libres, que hacen que actúen como un conductor eléctrico. Debido a que generalmente se encuentran iones en una solución, los electrolitos también son conocidos como soluciones iónicas y pueden ser sometidos al proceso de electrólisis.

En simples palabras un electrolito es una sustancia que cuando se disuelve en agua permite la conducción eléctrica.

2.7. CONDICIONES ÓPTIMAS PARA LLEVAR A CABO EL PROCESO DE EO.

Para poder obtener buenos resultados y llevar a cabo el proceso de EO de la manera más efectiva posible se debe tener en cuenta algunas condiciones y variables que son además de suma importancia tenerlas en cuenta al momento de construir la celda de EO y son las siguientes.

- Control de impurezas: existe la presencia de un ion cloruro que debe estar en una concentración menor a 30 ppm, en el ánodo se produce la oxidación anódica del ion Cl^- a cloro gas Cl_2 y en el cátodo permite el desarrollo de corrosión en el de SS316 (fenómeno denominado picadura o pitting), esto genera orificios en la superficie del mismo y entorpece el despegue del depósito de cobre como se muestra en la figura 2-7, obteniéndose cátodos y láminas de depósito doblados. Estos problemas pueden ser minimizados mediante el uso de prácticas operacionales adecuadas y el control diario de la composición química del electrolito que ingresa a la nave de EO.



Fuente: Proceso de EO, PPT entregado por docente.

Figura 2-7. Corrosión de cátodo producto del cloro.

- Orgánico: El orgánico que está presente en el electrolito debe estar en una concentración menor a 1 ppm de lo contrario este puede afectar la distribución del depósito de los cristales de cobre por lo que resulta un depósito quebradizo como se muestra en la figura 2-8 y figura 2-9.



Fuente: Proceso de EO, PPT entregado por docente.

Figura 2-8. Presencia de orgánico en el electrolito.



Fuente: Proceso de EO, PPT entregado por docente.

Figura 2-9. Cátodo mal depositado producto de la presencia de orgánico.

El orgánico presente en la solución se adhiere en la plancha de acero inoxidable y el resultado será una quemadura orgánica dando como resultado una pobre presencia de cátodo de cobre.

- Hierro (Fe): el nivel de operación de Fe en el electrolito debe estar por debajo de 1,5 gpL y esto depende de la cantidad que se transfirió por el proceso de SX.

Si el cátodo es de baja calidad, el Fe será atrapado lo que lleva a un aumento de impurezas en el depósito.

A pesar de que la electrólisis del $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ es parasitaria (causa pérdida del rendimiento) es menos perjudicial que la formación de permanganato. Su presencia suprime la formación de este compuesto.

- Manganeso (Mn): un exceso de Mn puede provocar la formación de permanganato, e cual es un fuerte oxidante que atacará la capa de óxido de plomo del ánodo, provocando una aceleración del consumo del ánodo y contaminación por Plomo y además atacará la fase orgánica de SX, llevando a una rápida destrucción del extractante presente en el electrolito que vuelve a la etapa de re-extracción conocido también como electrolito spent.

- Dosificación de reactivo: las tasas de adición de reactivos son específicas para cada planta. Cuando se agrega un reactivo este puede ayudar como agente suavizante para lograr un buen depósito de cobre a alta densidad de corriente.

Una adición significativa mayor o menor, produce características de superficie no deseadas en el cobre depositado en los cátodos como se muestra en la figura 2-10.



Fuente: Proceso de EO, PPT entregado por docente.

Figura 2-10. Apariencia de una lámina de cobre mal depositada.

En el electrolito se utilizan aditivos tales como:

- Guarfloc, este aditivo tiene por objetivo mejorar la calidad del depósito.
- Pastas antisulfatantes, cuyo objetivo es mantener limpios los contactos eléctricos y no agregar caídas de tensión al sistema.
- Cobalto y cloro, que tienen por finalidad reducir la corrosión de los ánodos de plomo y reducir la tensión de celda, en el caso del primero.
- Densidad de corriente: el rango de operación depende de la cantidad de cobre que ingrese a la nave de EO y esta se varía cambiando la potencia del rectificador o la fuente de poder, por lo general el rango es de 280 – 350 A/m² obteniendo un cátodo de cobre de buena calidad.
- Temperatura (T°): es importante mantener la T° tan constante como sea posible para minimizar el desprendimiento de oxígeno de Pb del ánodo.

El rango de T° por lo general es de 45 – 50°C, una menor T° de 30°C puede dar como resultado un grano más grueso y, por consiguiente, un cobre catódico de mala calidad.

Este rango se justifica por: costo de calefacción, pérdidas de agua por evaporación y mayor efecto de neblina ácida.

2.8. DISEÑO DE LA CELDA DE EO.

Luego de establecidas las condiciones y variables que afectan el proceso de EO se debe realizar el modelo de la celda de manera tal que en ella se pueda llevar a cabo el proceso de EO lo más cercano posible a la EO que se realiza en la industria. Para ello se utilizan los siguientes materiales:

- Recipiente de plástico cuyas dimensiones son 11 cm x 8 cm x 10 cm.
- Placa de acero inoxidable con dimensiones de 5 cm x 0.1 cm x 10.5 cm.
- 2 placas de plomo con dimensiones de 5 cm x 0.2 cm x 10 cm.
- 2 electrodos para soldadura de 16 cm de largo.

En la construcción de la celda se utilizará el recipiente de plástico que muestra la imagen 2-11 como simulador de la nave de EO.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 2-11. Recipiente de plástico simulador de la nave de EO.

En cada esquina de este recipiente se hace un orificio para insertar los electrodos de soldadura los que servirán como apoyo de las placas de acero inoxidable o cátodo y las de plomo o ánodo como muestra la figura 2-12. Se utilizan estos electrodos de soldadura como apoyo de las placas ya que para poder realizar el proceso de EO, la deposición del cobre en el cátodo o placa de acero inoxidable es a través del uso de corriente eléctrica, es por ello que los materiales a utilizar no deben ser conductores de electricidad para no interferir el proceso de deposición del cobre y se realice de una forma eficiente.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 2-12. Nave de EO con los electrodos que afirmarán las placas.

Una vez diseñada la estructura de la celda de EO, se procede en el Capítulo 3 a construir y evaluar el funcionamiento de la celda teniendo en cuenta todas las condiciones descritas en el Capítulo 2 y una construcción similar a la figura 2-6 del Capítulo 2, título "Celdas".

CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE EO.

Ya teniendo en cuenta todos los factores que afectan de forma favorable o de forma negativa el proceso de EO, además teniendo la estructura y diseño de la celda a construir, se comienza a realizar el armado de la celda.

En primer lugar, se reúnen todos los materiales a utilizar y además se confeccionan las placas a utilizar en este proceso, las cuales son:

- Un cátodo de acero inoxidable tipo austenítico; a diferencia con el acero usado en la industria que es de tipo ferrítico, este acero austenítico no posee molibdeno (la presencia de molibdeno en el acero le proporciona la característica de ser más resistente a la corrosión) con dimensiones 5 cm x 0.1 cm x 10.5 cm con un trozo de alambre revestido con plástico con el fin de que no afecte la reacción producida dentro de la celda al momento de utilizar la corriente eléctrica en el proceso de EO, tal como se muestra en la figura 3-1.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-1. Placa de acero inoxidable utilizada como cátodo.

- Dos ánodos de plomo con dimensiones 5 cm x 0.2 cm x 10 cm, al igual que la placa de acero se coloca en la superficie de estas placas un trozo de alambre revestido con plástico para que no afecte la reacción que se produce dentro de la celda al momento de utilizar la corriente eléctrica en el proceso de EO, tal como se muestra en la figura 3-2. Este alambre es utilizado como agarre de estas placas en la celda.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-2. Placas de plomo utilizadas como ánodos.

La celda de EO debe contar con 2 ánodos y 1 cátodo, esto con la finalidad de que el cobre se deposita en el cátodo por ambas caras de la placa de acero inoxidable. Por lo tanto, la disposición de las placas es de un ánodo, luego el cátodo y por último otro ánodo, tal como se muestra en la figura 3-3 y 3-4.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-3. Disposición de las placas en la celda vista de forma horizontal.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-4. Disposición de las placas en la celda, vista aérea.

Una vez armada la celda y dispuesto las placas en ella, se reúnen todos los materiales a utilizar para poder realizar la evaluación de esta y llevar a cabo el proceso de EO. Además de los materiales mencionados en Capítulo 2, título 3 "Diseño de la celda de EO" se deben utilizar:

- Fuente de poder MCP M10 – Q5303.
- Cables de conexión positivo y negativo.
- Agitador magnético marca EQUILAB.
- Matraz de aforo.
- Pipeta graduada.
- Vaso precipitado 1 L.
- Vaso precipitado 500 ml.
- Ácido Sulfúrico.
- Sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).
- Medidor láser de temperatura ALLOSUN.
- Balanza SHIMADZU UX620H con margen de error de 0.01 g.

3.2. FUNCIONAMIENTO DE LA CELDA DE EO.

Antes de comenzar el armado y la evaluación de la celda de EO, se debe preparar la mezcla o solución que se utilizará para llevar a cabo dicho proceso, la solución debe contener 45 g/L de cobre aproximadamente.

Antes de comenzar a trabajar en el proceso experimental se deben utilizar los EPP necesarios y acordes con el trabajo a realizar para así no sufrir ningún tipo de accidente ya que se está trabajando con sustancias peligrosas e impedir algún tipo de daño en la salud.

La solución con la que se trabaja en esta ocasión corresponde a una mezcla de:

- 600 ml de agua destilada.
- 106.092 g de sulfato de cobre.
- 48.91 ml de ácido sulfúrico.

Para comenzar a preparar la solución, en primer lugar, se vierte en el vaso precipitado de 1 L los 600 ml de agua destilada y se agrega posteriormente los 106.092 g de sulfato de cobre, los cuales son llevados al agitador magnético con el fin de que el sulfato de cobre en forma sólida se disuelva en el agua generando una mezcla homogénea, tal como se muestra en la figura 3-5.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-5. Solución de agua destilada y sulfato de cobre.

La solución es puesta sobre el agitador durante 15 minutos, revisando constantemente la mezcla ya que no debe quedar ninguna partícula sólida en la solución.

Una vez realizada la disolución del sulfato de cobre en el agua, se debe extraer el ácido sulfúrico de su contenedor, para ello se deben acondicionar con ácido la pipeta y el vaso precipitado de 500 ml con el fin de sacar cualquier basura que pueda haber en estos y así no afecten al proceso. Ya acondicionado los materiales, se vierte una cantidad de ácido en el vaso precipitado para tener un mejor control de este y trabajar con mayor seguridad, y luego con la pipeta se extraen los 46.91 ml de ácido sulfúrico los cuales son depositados en la solución de agua destilada y sulfato de cobre.

Para poder verter el ácido sulfúrico en la solución, primero se debe cambiar la solución de sulfato de cobre vertiéndola en un matraz de aforo, una vez realizado esto se puede agregar el ácido a la solución, el matraz se sella con la tapa y se comienza a agitar de forma manual la solución y así quede una mezcla homogénea como lo muestra la figura 3-6, la que será llevada al proceso de EO.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-6. Solución que es llevada al proceso de EO.

Antes de verter la solución en la celda, se debe calcular la dimensión de las placas que serán sumergidas y así poder calcular la cantidad de corriente que se le debe aplicar a la celda para realizar una depositación de cobre de manera eficiente, y además se debe determinar el peso del cátodo antes del proceso y al final del proceso para saber la cantidad de cobre depositado.

Para ello se tiene en cuenta que la cantidad de corriente que utiliza la industria es de 350 Amper por m² sumergido en la solución.

En esta oportunidad las dimensiones de las placas que serán sumergidas son de 6.5 cm de alto y 5 cm de ancho, obteniendo como resultado 32.5 cm² los que equivalen a una utilización de corriente de 1.1 Amper.

El peso del cátodo de acero inoxidable es de 33.4 g, el que será pesado nuevamente al final del proceso.

3.3. ARMADO DE LA CELDA DE EO:

Una vez con la solución terminada y obtenido el cálculo de corriente a utilizar en la celda, además el peso del cátodo, se coloca la celda sobre el agitador magnético, se instalan los ánodos y el cátodo dentro de la celda y luego se vierte la solución quedando lista la celda para realizar la conexión de cables como se muestra en la figura 3-7.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-7. Celda de EO lista para la conexión de cables.

Mientras se preparan los cables que irán conectados a las placas para realizar la transferencia de corriente, el agitador magnético se enciende y se lleva a una temperatura de 40 °C con la finalidad de que se produzca y comience el traspaso de temperatura desde el agitador hacia la solución.

Los cables que se utilizan para llevar a cabo el proceso de EO, son: dos cables con polo positivo los que van conectados a los ánodos y uno con polo negativo el cual va conectado al cátodo de acero inoxidable sobre el cual es depositado el cobre.

Estos tres cables van conectados desde una fuente de poder a las placas dentro de la celda. La fuente de poder tiene regulación de corriente y de voltaje, la que debe ser llevada a 1.1 Amper según los cálculos obtenidos anteriormente y con un voltaje de 2 volts, estos valores se mantienen constante durante todo el proceso.

Estos cables tienen 3 salidas, dos positivas y una negativa, que van con unas pinzas conectados a las placas de plomo y acero inoxidable que corresponden a los ánodos y al cátodo respectivamente como se muestra en la figura 3-8.



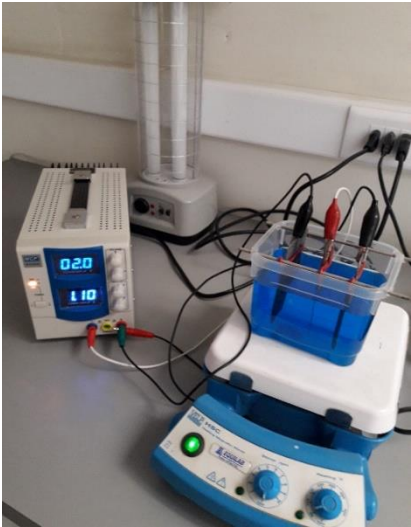
Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-8. Conexión de cables desde la fuente de poder a las placas dentro de la celda de EO.

Una vez armada la celda de EO, con la disposición de las placas y conectados los cables se procede a realizar la evaluación de esta.

3.4. EVALUACIÓN DE LA CELDA DE EO:

Para comenzar con la evaluación de la celda de EO, se deben conectar los cables a la fuente de poder llevándola a los 2 volts y a los 1.1 de amperaje como lo muestra la figura 3-9, además se debe tener una temperatura constante de 40 °C.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-9. Evaluación de la celda con los valores óptimos.

El tiempo en el que la celda estará trabajando o el tiempo de cosecha de cátodo es de 30 minutos para la primera prueba y de 1 hora para la segunda prueba con la finalidad de lograr que el cobre se deposite en la placa de acero inoxidable y el proceso se realice de manera eficiente.

Para la primera prueba, la temperatura se va midiendo cada 10 minutos con el marcador láser, como lo muestran las figuras 3-10, 3-11 y 3-12, ya que es uno de los factores importantes para que la depositación de cobre sea eficiente. La temperatura tiene que aproximarse lo mayor posible a los 40 °C.

Para la segunda prueba solo se mide al comienzo y al final arrojando una temperatura inicial de 40° C y una temperatura final de 43.5° C.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-10. Primera medición de la temperatura.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-11. Segunda medición de la temperatura.



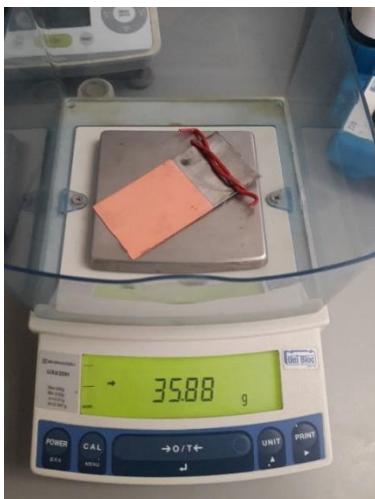
Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-12. Tercera medición de la temperatura.

3.4.1. Resultados obtenidos en la evaluación de la celda.

Una vez finalizadas las pruebas de evaluación del funcionamiento de la celda, se procede a desmontar esta misma, comenzando por desconectar los cables de las placas, y desconectar todos los equipos que se encuentren conectados a corriente, para así trabajar de una forma más segura.

Para poder determinar la efectividad del proceso realizados, se sacan las placas de la celda y se llevan a la balanza para determinar qué cantidad de cobre fue depositado en la prueba número 1 y en la prueba número 2 tal como se muestra en las figuras 3-13 y 3-14 respectivamente.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-13. Cosecha de cátodos prueba 1, 30 minutos



Fuente: Imagen capturada por alumno.

Figura 3-14. Cosecha de cátodos prueba 2 de 1 hora.

Ya obtenido los datos arrojados por la balanza una vez terminado el proceso de EO y ya depositado el cobre en la placa y además recordando la masa del cátodo o placa de acero inoxidable antes de ser llevado al proceso de EO el cual tiene una masa de 33,4 g, se obtienen los siguientes resultados de la cantidad de cobre depositado en ambas pruebas realizadas:

- Prueba número 1: en 30 minutos de cosecha de cátodos se logró depositar una masa 2.48 g de cobre.
- Prueba número 2: en 1 hora de cosecha de cátodos se logró depositar una masa de 6.56 g de cobre.

3.5. PROCEDIMIENTO PARA EL USO DE LA CELDA DE EO.

1. Preparar solución (electrolito) de agua destilada y sulfato de cobre.
2. Llevar la solución al agitador magnético por 15 minutos para disolver las sustancias sólidas y quede una solución homogénea.
3. Agregar ácido sulfúrico y agitar usando la técnica del bartender (persona que prepara bebidas en un bar) quedando una solución de $\text{Cu}^{2+}=45\text{g/L} + 180\text{g/L H}^+$.
4. Calcular la dimensión del cátodo y de los ánodos a sumergir en la solución dentro de la celda y además pesar el cátodo de acero inoxidable.
5. Determinar la corriente a utilizar en el proceso sabiendo que para llevar a cabo dicho proceso se necesita una corriente de 350 Amper por m^2 .
6. Armar la celda sobre el agitador magnético y llevar la solución (electrolito) a una temperatura de 40°C .
7. Realizar la conexión de cables desde la fuente de poder a las placas.
8. Encender la fuente de poder y llevar esta misma a 2 volts y a la corriente obtenida en el paso número 5.
9. La primera prueba tiene una duración de 30 minutos donde cada 10 minutos se va registrando la temperatura de la solución.
10. Terminada la prueba se desmonta la celda y se pesa el cátodo.
11. Se calcula la cantidad de cobre depositado.
12. Se monta nuevamente la celda y se realiza la segunda prueba con una duración de 1 hora.
13. Se mide la temperatura solo al comienzo y al final.
14. Se desmonta la celda y se procede a pesar el cátodo.
15. Se calcula la cantidad de cobre depositado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo lo que se busco conseguir era la construcción e implementación de una celda de EO a escala en el Laboratorio de Metalurgia de la UTFSM con la finalidad de que los nuevos alumnos que ingresan a esta carrera de Minería y Metalurgia puedan conocer de forma práctica el último proceso de la Hidrometalurgia del cual se obtiene el cobre con un alto grado de pureza del 99.99%.

El análisis de los resultados obtenidos en las 2 pruebas de evaluación de la celda permitió asegurar que se logró una correcta construcción y simulación de una celda de EO, ya que al realizar el proceso se ve como el cobre es depositado en el cátodo o placa de acero inoxidable a partir de una solución de $\text{Cu}^{2+}=45\text{g/L} + 180\text{g/L H}^{+}$ y aplicando el proceso de electrolisis con la corriente determinada a partir de las dimensiones de las placas.

Una de las diferencias entre el proceso realizado por la industria y el realizado en el laboratorio es el uso de las placas de acero, ya que en la industria el acero utilizado es un acero inoxidable ferrítico el cual tiene en su composición presencia de molibdeno lo que lo hace un acero con más resistencia a la corrosión y el utilizado en el laboratorio es un acero sin austenítico sin presencia de molibdeno en su composición lo que lo hace un acero menos resistente a la corrosión que el de la industria.

Si bien el proceso fue simulado de manera correcta y se logró mostrar la depositación de cobre en el cátodo, la cantidad de cobre depositado fue muy mínima y esto debido a que no se utilizó ningún tipo de reactivo para llevar a cabo el proceso y el tiempo de cosecha de cátodo fue muy bajo ya que se realizó una prueba de 30 minutos y otra de 60 minutos.

Para finalizar se logra cumplir el objetivo principal de este trabajo construyendo una celda de EO con un funcionamiento eficiente, entregando además un procedimiento para el uso de esta con el fin de que los nuevos alumnos que ingresan a esta carrera puedan ampliar sus conocimientos aprendiendo no solo la teoría de los procesos, sino que también puedan saber y conocer como son llevado a cabo.

BIBLIOGRAFÍA

ARRIAGADA Hernández, Pablo Andrés, Diseño, construcción y optimización de una celda de electro obtención de cobre con cátodo particulado móvil basada en electro diálisis reactiva, Tesis (Magíster en ciencias de la ingeniería, mención metalurgia extractiva) Santiago, Chile: Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Escuela de Postgrado Departamento de Ingeniería de Minas, 2006, 86h.

AGUILERA Rojas, Carla. Electro Obtención. [Diapositivas] [consulta: en octubre 2017] Antofagasta, Chile, Disponible en:
<https://www.academia.edu/9823593/Presentacion_Electro_obtencion?auto=download>. 2015. 334 diapositivas.

SALAS, Katherine. Planta piloto Electro Obtención. [Prezzi] [consulta: en Julio 2017] Disponible en: <<https://prezi.com/stgkfia7tmky/laboratorio-n-5-planta-piloto-electroobtencion/>>. 2015. 49 diapositivas.

SILVA Berrios, José. Electro Obtención. [Prezzi] Santiago, Chile, Disponible en:
< <https://prezi.com/av3yhlkil1ys/electro-obtencion/> >. 2014. 18 diapositivas.

COCHILCO. Base de datos electrónica. [en línea] Disponible en:
< <http://www.cochilco.cl:4040/boletin-web/>> [consulta: en Julio 2017]

COCHILCO. Informe Tendencias del Mercado del Cobre. [en línea] Disponible en : <
https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/20160127143042_Versi%C3%B3n%20final%20Informe%20de%20Tendencias%20enero%202016.pdf>[consulta: en Julio 2017]

COCHILCO, SERNAGEOMIN. Anuario de Estadísticas del cobre y otros minerales. [en línea] Disponible en:
<<https://www.cochilco.cl/Lists/Anuario/Attachments/17/Anuario-%20avance7-10-7-17.pdf> > [consulta: en Julio 2017]

CODELCO EDUCA. Electro Obtención de cobre [en línea] Disponible en:
<https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/escolares_electroobtencion.aspx> [consulta: en agosto 2017]

CRUZ, Héctor. Tecnología ISA. [en línea] Disponible en:
<<https://hector2011.blogspot.cl/2010/10/tecnologias-isa-eisa-pci-agp-y-amr.html>> [consulta: en agosto 2017]

RIDER, José Tomás. Lixiviación y Electro Obtención. [en línea] <<http://www.copperandino.com/lixiviacion-y-electro-obtencion/>> [consulta: en septiembre 2017]

ALVAREZ, Jaime Roberto. Celda electrolítica para la obtención de metales, mediante electrodiálisis reactiva y proceso electrolítico para obtención de metales que utiliza dicha celda. [en línea] Disponible en: <<https://patents.google.com/patent/WO2012127438A2/es>> [consulta: en diciembre 2017]