

20 de Agosto del 2020

Hgo. Del Parral, Chih.

IDENTIFICACION DEL PROYECTO.

Institución: Universidad Tecnológico De Parral.

Docente titular del proyecto: Ing. Anna Isabel Carrillo Garcia.

Alumno colaborador del proyecto:

ORPINEDA RÍOS ELDER LEONEL

SANCHEZ ALVAREZ MANUEL RICARDO

ALATRISTE SÁENZ ARIEL

EDUARDO MACIAS GONZALEZ MARTIN

LEO FERIA FERNANDA SARAHI

CRUZ HERRERA SAYRA DANIELA

LOERA CHAVEZ JESUS OMAR

Asesor empresarial: Ing. Héctor Talamantes.

Título del proyecto: EVALUACION DE LA FACTIBILIDAD DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSITACION PARA RECUPERACION DE CU EN EL PROCESO SART

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PARAL.

DIRECCION ACADEMICA.

PRESENTE.

Asunto: EVALUACION DE LA FACTIBILIDAD DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSITACION PARA RECUPERACION DE CU EN EL PROCESO SART

Por medio del presente. Se informa de la conclusión por parte del Maestro Ing. Anna Isabel Carrillo Garcia del proyecto: **EVALUACION DE LA FACTIBILIDAD DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSITACION PARA RECUPERACION DE CU EN EL PROCESO SART**, realizado en esta organización el periodo **MAYO AGOSTO 2020**

En cumplimiento de lo acordado, cada actividad este proyecto, fue debidamente registrada y documentada para la representación de los resultados obtenidos en **EVALUACION DE LA FACTIBILIDAD DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSITACION PARA RECUPERACION DE CU EN EL PROCESO SART**. Haciendo entrega al Maestro Anna Isabel Carrillo Garcia, Análisis y conclusión, así como las recomendaciones para el análisis y optimización metalúrgica. Este reporte ha sido en beneficio de esta empresa y permitirá tomar decisiones para optimizar la operación.

Agrademos y reconocemos la intervención del Maestro Anna Isabel Carrillo Gracia, por su desempeño y profesionalismo, para la realización de un proyecto de mejora a nuestra empresa. Creando la vinculación del Sector Empresarial y Educativo.

ATENTAMENTE.

LIC. ARMANDO DOMINGUEZ MEZA
JEFE RECUSOS HUMANOS
GRUPO COANZAMEX
TEL 6275274600

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PARRAL





REPORTE TÉCNICO

“Evaluación de la factibilidad del proceso de electrodeposición para recuperación del cobre en el proceso SART”

ALUMNOS:

MANUEL RICARDO SANCHEZ ALVAREZ

ELDERL LEONEL ORPINEDA RIOS

ARIEL ALATRISTE SAENZ

FERNANDA SARAHI LEON FERIA

JESUS OMAR LOERA CHAVEZ

MARTIN EDUARDO MACIAS GONZALEZ

SAYRA DANIELA CRUZ HERRERA

ASESOR EMPRESARIAL

INGENIERO HECTOR TALAMANTES.

DIRECTOR DE PROYECTO

INGENIERO ANNA ISABEL CARRILLO GARCIA.

Resumen

En el presente documento se encuentra información y parámetros reales delimitados y realizados para la electroobtención de cobre por medio de celdas galvánicas y electrolíticas por alumnos de la Universidad Tecnológica de Parral como proyecto de gran importancia para grupo COANZAMEX, en el presente se trata de informar y dar a conocer los parámetros a nivel laboratorio de la electroobtención de cobre, así como las reacciones secundarias que puedan efectuarse al aplicarla. Los datos presentes y tablas de pruebas son los cuales nos arrojaron una recuperación de Cu el cual es proveniente de un proceso llamado SART el cual consiste en recuperar y liberar las partes del CN que ingresan por medio de una lixiviación en pilas , el propósito es la recuperación de cobre como un mineral de interés y como un mineral cianicida que nos entorpece la recuperación de oro y plata, el propósito en este proyecto es la recuperación del cobre en el cual se hicieron las pruebas suficientes para estandarizar los parámetros adecuados así como el equipo y materiales adecuados para la obtención de Cu, dando en cuenta los tiempos de residencia adecuados en la celda para lograr la captación del mineral, los procesos de identificación de unidad laboral para un mayor orden de trabajo, en el se encuentran los tipos de celdas, ánodos y cátodos que son posibles para la obtención de minerales, cabe destacar que todo este documento cuenta con actividades e ilustraciones captadas mediante las pruebas correspondientes en el transcurso del proyecto.

Índice

Índice de ilustraciones	10
Índice de tablas.....	11
I.- Introducción.....	12
II.- Justificación.....	14
2.1.- Delimitación del proyecto.....	15
III.- Objetivos del proyecto.....	16
3.1.- Objetivos generales	16
3.2.- Objetivos específicos.....	16
IV.- Marco teórico.....	17
4.1.- Electrometalurgia	17
4.1.2.- Electroquímica	17
4.1.3.- Electrolisis.....	17
4.1.4.- Leyes de Faraday	18
4.1.5.- Potencial estándar de reducción	19
4.1.6.- Electro obtención.....	19
4.2.- Tipos de celdas	20
4.2.1.- Celda Electroquímica	20
4.2.2. – Galvánicas o voltaicas.....	20
4.2.3.- Celdas Electrolíticas	20
4.2.4.- Celdas para el procesamiento de sales fundidas	21
4.2.5.- Celdas para lecho particulado fluidizado.....	21
4.2.6.- Celda para producción directa de láminas de metal	21
4.2.7. – Celda cilíndrica para electroobtención de oro	22
4.2.8.- Celda convencional electrolisis en medio acuoso	22
4.3.- Tipos de Cátodos.....	22
4.3.1. – Cátodo	22
4.3.2.- Placas madre	22
4.3.2.- Cátodos permanentes.....	22
4.4.- Tipos de ánodos.....	23
4.4.1.- Anodo	23

4.4.2.- Anodo de electro refinación.....	23
4.5.- Puente salino	23
4.6.- Cobre	24
4.6.1.- Distribución y usos.....	25
4.6.2.- Aleaciones y compuestos.....	25
4.6.3.- Riesgos.....	26
4.6.4.- Toxicidad aguda	27
4.6.5.- Toxicidad crónica.....	28
4.6.6.- Medidas de salud y seguridad	29
4.7.- Herramientas y Equipo.....	29
4.8.- Operación de celdas de electroobtención	30
4.8.1.- Identificación de la Unidad de Competencia Laboral (UCL)	30
V.- Desarrollo.....	31
5.1.- Desarrollo de actividades.....	31
5.1.1.- Secado de muestra	31
5.1.2.- Determinación de humedad	32
5.1.3.- Homogenización y Cuarteo.....	33
5.1.4.- Pruebas de electroobtención.....	34
5.1.5.- Prueba de funcionamiento de celda.....	35
5.1.6.- Prueba 1	36
Prueba-1	36
5.1.7.- Prueba 2	37
Prueba-2.....	37
5.1.8.- Prueba 3	41
Prueba-3.....	41
5.1.9.- Prueba 4	43
Prueba-4.....	43
5.1.10.- Prueba 5	45
Prueba-5.....	45
5.2.- Recuperación teórica del cobre	51
5.2.1.- Superficie de contacto.....	51

5.3.- Equivalente químico.....	52
5.3.1.- Constante de Faraday.....	52
5.3.2.- Equivalente Electroquímico.....	52
5.3.3.- Fórmula de Faraday.....	53
5.3.4.- Reacción Química.....	53
5.3.5.- Aplicación de fórmulas en sulfato de cobre.....	54
Formula de Faraday.....	54
5.4.- cálculos por prueba de recuperación de cobre.....	55
5.4.2.- prueba 1- recuperación teórica.....	55
5.4.3.- prueba 2.- recuperación teórica.....	55
5.4.4.- prueba 3.- recuperación teórica.....	55
5.4.5.- prueba 4.- recuperación teórica.....	56
5.4.6.- prueba 5.- recuperación teórica.....	56
VI.- Actividades adicionales.....	56
Estatus de columnas de lixiviación.....	58
Tasa de riego:.....	59
Área del tubo.....	59
Caudal.....	60
Consumo de cal de cada mina.....	60

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Celda Galvánica	20
Ilustración 2 Celda Electrolítica	21
Ilustración 3 cobre	25
Ilustración 4 secado de mineral	32
Ilustración 5 homogenización.....	33
Ilustración 6 toma de muestra representativa, técnica del pescado.....	33
Ilustración 7 pesaje de muestra.....	34
Ilustración 8 armado de celda.....	35
Ilustración 9 muestra de soluto y solvente	35
Ilustración 10 funcionamiento correcto de celda con solución salina	36
Ilustración 11 anodo con cubierta de cobre.....	37
Ilustración 12 solución antes de ingresar a celda.....	38
Ilustración 13 captación de cobre a los 5 minutos.....	39
Ilustración 14 solución agotada y paso de corriente en sedimentos	39
Ilustración 15 oxidación y pérdida de cuerpo en anodo.....	40
Ilustración 16 presencia de cobre en cátodo.....	40
Ilustración 17 sedimentos con presencia de cobre.....	41
Ilustración 18 anodo afectado.....	42
Ilustración 19 presencia de cobre en el cátodo	43
Ilustración 20 sulfato de cobre.....	44
Ilustración 21 cátodo de acero inoxidable.....	44
Ilustración 22 cátodo con presencia de cobre.....	45
Ilustración 23 lavado del cátodo	46
Ilustración 24 preparación de sulfato de cobre.....	47
Ilustración 25 solución al ingresar a celda	47
Ilustración 26 cambio de color en solución.....	48
Ilustración 27 anodo.....	48
Ilustración 28 cátodo.....	49
Ilustración 29 prueba de paso de corriente.....	49
Ilustración 30 presencia de barros	50
Ilustración 31 presencia de cobre en el cátodo	50
Ilustración 32 instalación de columnas	57
Ilustración 33 homogenización y cuarteo.....	58
Ilustración 34 relleno de columnas con el mineral	58

Índice de tablas

Tabla 1 magnitudes eléctricas.....	18
Tabla 2 potencial estándar de reducción	19
Tabla 3 Electrolitos y cátodos necesarios para la obtención de metales.....	24
Tabla 4 Formato de identificación	31
Tabla 5 parámetros prueba 1	37
Tabla 6 parámetros prueba 2	38
Tabla 7 parámetros prueba 3	41
Tabla 8 parámetros prueba 4	43
Tabla 9 parámetros prueba 5	46
Tabla 10 consumo de cal proyecto el Abra	61
Tabla 11 consumo de cal la Famosa	62
Tabla 12 consumo de cal proyecto la colorada.....	62
Tabla 13 consumo de cal proyecto San Pedro.....	63
Tabla 14 consumo de cianuro.....	65

I.- Introducción

Grupo Coanzamex S.A. de C.V. subsidiaria de Go Gold Resources Inc., inicio operaciones en junio del 2014 en su planta de lavado de jales en Hidalgo del Parral. La planta tiene una capacidad para procesar 5,000 ton. por día, utilizando tecnología de punta de origen Sud-Africano mediante la cual extraerán mineral de los jales antiguos que han permanecido durante siglos cerca de la mancha urbana, siendo este proyecto la primera planta de este tipo en Latinoamérica. El proyecto contempla una inversión de 500 millones de dólares y crear cerca de 250 empleos, entre directos e indirectos, apoyando y el bienestar social y económico de los y las Parralenses, así como a municipios cercanos a la comunidad. Empezando y colaborando con las distintas universidades de la región se inició la evaluación de un proceso y proyecto nuevo a realizar por parte de grupo coanzamex en el área de operación y metalurgia de las instalaciones, este proceso es la evaluación de la *factibilidad* del proceso de *electrodeposición* para la recuperación del cobre en el proceso llamado SART en el cual se ha trabajado desde inicios de recuperación del mineral en jales que yacían en nuestra localidad en el cual solo se obtenían valores de Au (oro) y Ag (plata) como principales en el proceso y analizando estos precipitados hay un buen porcentaje de Cu (cobre) presente en él y sin más que decir en este nuevo proyecto se buscara el proceso efectivo para la recuperación del cobre que aparece en nuestro precipitado SART. Para la obtención de cobre existen diversos métodos que nos permiten extraerlo de las rocas o zonas mineralizadas donde yace pero como obtenerlo en beneficio, el cobre es un material de gran uso en la actualidad, es un mineral de bajo costo pero buen conductor de electricidad, para realizar su obtención y beneficio existe la flotación de minerales que consiste en flotar por medio de espumantes o distintos reactivos que trabajen con el cobre y el tipo de flotación seleccionada o necesaria para el tipo de mineral en el que se encuentra, así como también existe la lixiviación que en algunos casos y de acuerdo a las leyes que se encuentran en el mineral se aplica el tipo de lixiviación perteneciente

puesto que esta es realizada por medio de una precipitación del mineral con ácidos que captan las partículas expuestas en las aglomeraciones o rocas que contiene mineral y de acuerdo a la permeabilidad que existe en el yacimiento o rocas presentes, así como también existe la lixiviación para jales con altas leyes y algunas que incluso se realizan *in-situ*, existe otro proceso como lo es la electrodeposición en la actualidad es requerida para la obtención de minerales en una solución impregnada o un mineral procesado y con una reducción granulométrica considerable para el ingreso en estas celdas, la cual se ingresa junto con un ácido que ayude a captar las partículas del mineral que en este caso es el cobre (Cu) y a pesar de ser un proceso de altos costos se realiza por la factibilidad y los altos grados de pureza que ofrece al obtener los minerales mediante este proceso. En el presente trabajaremos a detalle y analizaremos si el cobre (Cu) presente en nuestras muestras es redituable al aplicar una electro-obtención.

II.- Justificación

En el proyecto de evaluación de la factibilidad en la electrodeposición del cobre proveniente del proceso SART del cual surge al a necesidad de grupo Go Gold Resources se busca establecer una planta de electroobtención de cobre el cual es proveniente de un precipitado del proceso SART y que tiene como finalidad recabar la mayor recuperación de Cu (cobre) para obtener un beneficio de este mineral y aprovechar la mayor cantidad de pureza en el precipitado, para luego comercializar esa materia prima ya maquilada como una lámina, por consecuente también existe la recuperación de CN^- que es una gran mejora para la empresa tratadora de minerales puesto que todo el proceso de lixiviación que se maneja antes de obtener un precipitado del proceso SART se realiza con la lixiviación en pilas por aspersión y grandes cantidades de cianuro (CN) son ingresadas para hacer una adherencia de mineral en la solución rica o PLS (Pregnant leaching solution) y recabar todo este mineral, el siguiente proceso se analiza puesto que las moléculas de los minerales a lixiviar como Au y Ag tienen una granulometría mayor a las partículas de Cu presente el cual es un agente cianicida y satura la solución haciendo una menor captación de los minerales de interés, por lo tanto se pretende liberar la mayor cantidad de cianuro para reducir la inversión de cianuro y darle una cierta reutilización. Por lo tanto, se pretende que el cobre recuperado sea un mineral utilizado en segundo plano puesto que al hacer una electroobtención de él nos permite obtenerlo mas libre de impurezas y por lo tanto al aplicar una refinación se obtendría de cierta manera una pureza elevada de el por lo tanto es que se pretende aplicar una fundición y comercializarlo como una lamina de cobre.

Dicho proceso se llevará a cabo en pruebas a nivel laboratorio donde se evaluará la recuperación del mineral de interés y con el cual se espera sea redituable para la empresa y permita una ampliación y generación de una planta de electroobtención.

2.1.- Delimitación del proyecto

Este proyecto es tan interesante y necesario para lograr las mejoras de la empresa tanto económicamente como social y de interés para otras industrias del ramo, así como este proyecto fue de mi interés para aprender acerca de este método de extracción de minerales puesto que no es algo muy usual en la entidad y en las plantas que se encuentran donde radico y me gustaría el aprovechar el máximo conocimiento que se pueda obtener de él.

III.- Objetivos del proyecto

3.1.- Objetivos generales

- Obtener mediante la electroobtención la mayor cantidad de cobre (Cu) proveniente en un precipitado del proceso SART.
- Analizar y revisar la factibilidad del proceso a emplear.
- Obtener redituables ganancias del maquilado de este mineral.
- Establecer una planta de electroobtención en el área de grupo Coanzamex

3.2.- Objetivos específicos

- Recuperar la mayor pureza del cobre en el proyecto de electroobtención.
- Analizar si la inversión es factible en este proceso.
- Recuperar los valores más posibles en el proceso de electrodeposición de cobre.

IV.- Marco teórico

4.1.- Electrometalurgia

La electrometalurgia es el proceso físico-químico empleado y basado en la transformación de la energía eléctrica en trabajo para realizar una captación de minerales provenientes de un material soluble o sólido ingresados en celdas electrolíticas o galvánicas. (Morales, 2003)

4.1.2.- Electroquímica

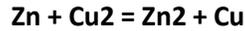
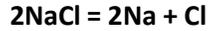
Como lo menciona Alejandro Morales (2003):

La electroquímica es la parte de la fisicoquímica que trata la relación entre la electricidad y las reacciones químicas, esas reacciones químicas que dan lugar a energía eléctrica (celdas o pilas galvánicas) y el proceso inverso de estas reacciones que tienen lugar por medio de energía eléctrica (celda de electrólisis). (pág. 3)

4.1.3.- Electrolisis

Es un proceso en el que se usa energía eléctrica para separar los elementos de un compuesto. Una celda electrolítica utiliza energía eléctrica para producir una reacción. La celda consta de un líquido conductor que se llama electrolítico y dos electrodos conectados a una fuente eléctrica o batería. Un electrodo es negativo y recibe el nombre de cátodo ya que atrae los cationes hacia él. El otro electrodo es positivo y se llama ánodo porque atrae los aniones. La batería se encarga de suministrar electrones al cátodo.

Un ejemplo es la electrolisis del agua, que se descompone en sus elementos: gas hidrógeno y gas oxígeno, se observa en la figura un recipiente con agua y cloruro de sodio disueltos, se colocan dos tubos de ensayo invertidos con alambres de cobre y éstos se conectan a una batería de 9 o 12 V, y después se observa la acumulación de cada gas en un tubo, el flujo de electrones rompe los enlaces covalentes O-H, generando protones H^+ , y O_2 , los portones son atraídos hacia el polo negativo y ahí se le aportan los electrones para unirse a otro hidrógeno, formando H_2 , y el oxígeno se dirige al polo positivo y allí se forma el O_2 . La oxidación ocurre en el ánodo y la reducción en el cátodo, Por lo tanto, en el electrodo negativo se produce una semirreacción de reducción, y en el electrodo positivo se produce una semirreacción de oxidación. Cátodo: Ejemplos de reacción de electrolisis:



4.1.4.- Leyes de Faraday

Primera Ley de Faraday: “La masa de un producto obtenido o de reactivo consumido durante la reacción en un electrodo, es proporcional a la cantidad de carga (corriente x tiempo) que ha pasado a través del circuito”.

Segunda Ley de Faraday: “Las masas de diferentes sustancias producidas por el paso de la misma cantidad de electricidad, son directamente proporcionales a sus equivalentes gramos”.

El equivalente químico se obtiene dividiendo la masa atómica del elemento entre su valencia.

Ejemplo Ca = 40 grs-mol/ 2 = 20

La masa del calcio es 40 grs-mol y su valencia es dos así que nos queda 20 grs/equivalente como si deseamos el equivalente electroquímico, nuestro resultado deberá ser dividido por la constante de faraday de 96500

Magnitud	Símbolo	Unidad	Relación
Resistencia	R	Ohms	$R=V/I$
Intensidad de Corriente	I	Amperes	$I=V/R$
Voltaje (fuerza electromotriz)	V	Volts	$V=R \cdot I$
Potencia	P	Watts	$P=V \cdot I$

Tabla 1 magnitudes eléctricas

Fuente: (Latina, sf)

4.1.5.- Potencial estándar de reducción

Es la espontaneidad o tendencia a que se efectuó una función redox, en este caso a la reacción de los electrodos con el ácido. Energía de la pila = energía de reducción – energía de oxidación Se considera que en una pila uno de los electrodos se reduce mientras que otro se oxida.

Nº	Reacción	E° (V)	Nº	Reacción	E° (V)
1	$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}$	-3.02	21	$\text{Cu}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^+$	0.15
2	$\text{Cs}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cs}$	-3.02	22	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	0.34
3	$\text{Rb}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Rb}$	-2.99	23	$\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cl}^- + 2\text{OH}^-$	0.52
4	$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$	-2.92	24	$\text{I}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{I}^-$	0.53
5	$\text{Ba}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ba}$	-2.90	25	$\text{MnO}_4^- + 2\text{H}_2\text{O} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_2 + 4\text{OH}^-$	0.57
6	$\text{Sr}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Sr}$	-2.89	26	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	0.77
7	$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ca}$	-2.87	27	$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	0.80
8	$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$	-2.71	28	$\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	0.81
9	$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2.34	29	$\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightarrow \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$	0.96
10	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1.57	30	$\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{ClO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	1.00
11	$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}$	-1.05	31	$\text{Br}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Br}^-$	1.07
12	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0.76	32	$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	1.21
13	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0.44	33	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$	1.36
14	$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$	-0.40	34	$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cl}^-$	1.36
15	$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$	-0.28	35	$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	1.42
16	$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0.25	36	$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	1.52
17	$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$	-0.14	37	$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.77
18	$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$	-0.18	38	$\text{F}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{F}^-$	2.86

Tabla 2 potencial estándar de reducción

Fuente: (Latina, sf)

4.1.6.- Electro obtención

Básicamente, este proceso consiste en recuperar el metal desde una solución de lixiviación debidamente acondicionada (solución electrolito) y depositarlo en un cátodo, utilizando un proceso de electrólisis. Para ello se hace circular a través de la solución electrolito, una corriente eléctrica continua de baja intensidad entre un ánodo (la solución misma) y un cátodo. De esta manera, los iones del metal de interés (cationes) son atraídos por el cátodo (polo de carga negativa) depositándose en él y las impurezas quedan disueltas en el electrolito y también precipitan en residuos o barras anódicos. (Codelco , 2019).

4.2.- Tipos de celdas

4.2.1.- Celda Electroquímica

Las celdas electroquímicas son aquellas en las cuales la energía eléctrica que procede de una fuente externa provee reacciones químicas *no espontáneas*. (electroquímicas", s.f.)

4.2.2. – Galvánicas o voltaicas

Son aquellas en las cuales las reacciones químicas espontáneas producen energía eléctrica (electricidad) la cual sale a un circuito eléctrico. (electroquímicas", s.f.)

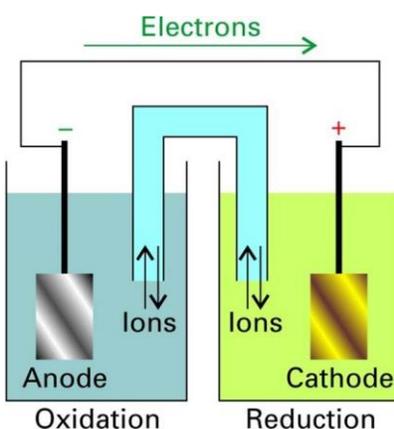


Ilustración 1 Celda Galvánica

Fuente: (Termodinámica de Procesos Electroquímicos, S.F)

4.2.3.- Celdas Electrolíticas

La celda electrolítica transforma una corriente eléctrica en una reacción química de oxidación-reducción que no tiene lugar de modo espontáneo. En muchas de estas reacciones se descompone una sustancia química por lo que dicho proceso recibe el nombre de electrolisis. (electroquímicas", s.f.)

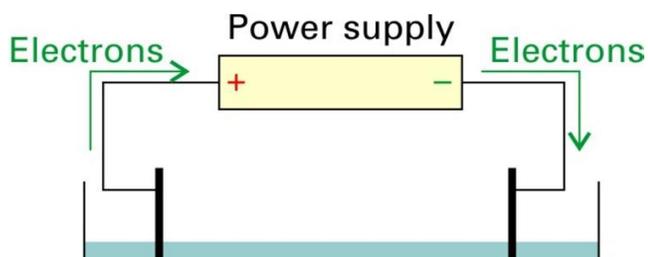


Ilustración 2 Celda Electrolítica

Fuente: (Termodinamica de Procesos Electroquimicos, S.F)

4.2.4.- Celdas para el procesamiento de sales fundidas

Para las sales fundidas, la situación es muy diferente de un caso a otro, considerando si el metal se puede depositar en un líquido más pesado o más liviano que el electrolito mismo. Es así que para cada situación se requiere un diseño específico. (Codelco , 2019)

4.2.5.- Celdas para lecho particulado fluidizado

Desde hace años, los lechos de material particulado como concentrados de sulfuros, cementos granallados, mata granallada y recortes de recuperación secundaria de metales, son un desafío interesante para la electrólisis directa, que evite los pasos intermedios, ya sea por vía pirometalúrgica o por lixiviación y purificación. En estos casos se logran altas densidades de corriente, de 10 a 100 veces las alcanzadas en los sistemas convencionales, debido al permanente movimiento y fricción de las partículas, lo que ayuda a despolarizarlas, y desprende los eventuales residuos de la disolución del ánodo de partida. (Codelco , 2019)

4.2.6.- Celda para producción directa de láminas de metal

Mediante este tipo de celdas se puede lograr en forma directa y continua la preparación de una lámina de cobre electrolítico. Esta celda contiene un cátodo en forma de tambor,

parcialmente sumergido en el electrolito de la celda, y que gira con velocidad variable de acuerdo al espesor de la lámina que se desea obtener. (Codelco , 2019)

4.2.7. – Celda cilíndrica para electroobtención de oro

La recuperación electrolítica del oro, usando como electrolito la solución de elución de carbono. En estos casos se usa un anodo inerte de acero y un cátodo, compuesto de un conductor inserto con lana de acero colocando en un contenedor apropiado. (Codelco , 2019)

4.2.8.- Celda convencional electrolisis en medio acuoso

Las diferencias tienen que ver con el uso final, según se trate de electroobtención (EW) o de electrorefinación (ER). En EW es más necesario renovar y agitar el electrolito frente a las placas, ya que con la nueva solución se renueva el metal para la deposición. (Codelco , 2019)

4.3.- Tipos de Cátodos

4.3.1. – Cátodo

Sin importar el tipo de celda (electrolítica o voltaica) se define como el electrodo en el cual se produce la reducción porque algunas especies ganan electrones. Este posee carga negativa y a él migran los iones o cargas positivas. (electroquímicas", s.f.)

4.3.2.- Placas madre

Las placas madre corresponden, en general, a un sustrato de un metal sobre el cual se deposita el metal de interés, como ocurre en los procesos de EW, en los que los depósitos pueden ser desde soluciones acuosas de zinc sobre una placa de aluminio hasta una de cobalto sobre una placa de acero inoxidable. (Codelco , 2019)

4.3.2.- Cátodos permanentes

El sustrato de estos cátodos fue inicialmente de titanio, pero hoy se emplea acero inoxidable 316L. Las dimensiones sumergidas de estos cátodos, útiles para la deposición, se han estandarizado en 1 m de ancho por 1 m de alto. (Codelco , 2019)

4.4.- Tipos de ánodos

4.4.1.- Anodo

Sin importar el tipo de celda (electrolítica o voltaica) se define como el electrodo en el cual se produce la oxidación porque algunas especies pierden electrones. Este posee carga positiva y a él migran los iones o cargas negativas. (electroquimicas", s.f.)

4.4.2.- Anodo de electro refinación

Los ánodos -principalmente en la ER de níquel y cobre-, tienen una superficie irregular y rugosa, con dimensiones de 80 a 100 cm de ancho, 90 a 110 cm de largo y unos 3 a 6 cm de espesor. (Codelco , 2019)

4.5.- Puente salino

Es un tubo con un electrolito en un gel que está conectado a las dos semiceldas de una celda galvánica; el puente salino permite el flujo de iones, pero evita la mezcla de las disoluciones diferentes que podría permitir la reacción directa de los reactivos de la celda. (electroquimicas", s.f.)

Metal	Electrolito	Cátodo	Comentario
Antimonio	Soda y sulfuro de sodio	Acero	
Cadmio	Solución de sulfato	Aluminio	Subproducto de recuperación de Zn.

Cromo	Solución de sulfato	Hastelloy	
Cobalto	Solución de sulfato	Acero inoxidable	Producido junto al cobre en Zaire.
Cobre	Solución de sulfato	Acero inoxidable	Soluciones de lixiviación de alta ley o tras la extracción por solventes.
Galio	Solución de sodio (NaOH)	Acero inoxidable	Subproducto de la producción de aluminio desde bauxita.
Manganeso	Solución de sulfato	Acero inoxidable	
Níquel	Solución de sulfato	Níquel o acero inoxidable	
Oro	Solución de cianuro	Lana de acero	
Plata	Solución de nitrato	Plata o grafito	
Telurio	Solución de sodio (NaOH)	Acero inoxidable	
Zinc	Solución de sulfato Solución de sodio (NaOH)	Aluminio Acero inoxidable	Producción de zinc en polvo.

Tabla 3 Electrolitos y cátodos necesarios para la obtención de metales.

Fuente: (Codelco , 2019)

4.6.- Cobre

El cobre (Cu) es maleable y dúctil, un excelente conductor del calor y la electricidad, y su capacidad funcional se altera muy poco con la exposición al aire seco. Si se encuentra en una atmósfera húmeda con anhídrido carbónico, se cubre con una capa verde de carbonato. El cobre

es un elemento esencial del metabolismo humano. (Nordbeco, s.f)



Ilustración 3 cobre

Fuente: (Nordbeco, s.f)

4.6.1.- Distribución y usos

El cobre se encuentra principalmente en forma de compuestos minerales en los que el ^{63}Cu constituye el 69,1 % y el ^{65}Cu el 30,9 % del elemento. El cobre está ampliamente distribuido en todos los continentes y forma parte de la mayoría de los organismos vivos. Aunque se han descubierto algunos depósitos naturales de cobre metálico, generalmente se extrae en forma de sulfuros, como es el caso de la covelita (CuS), la calcocita (Cu_2S), la calcopirita (CuFeS_2) y la bornita (Cu_3FeS_3); o de óxidos, como la malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$); la crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la calcantita ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

Debido a sus propiedades eléctricas, más del 75 % del cobre que se produce se utiliza en la industria eléctrica. Entre otros usos de este metal se encuentra la fabricación de cañerías para el agua, material para techumbres, baterías de cocina, equipos químicos y farmacéuticos y producción de aleaciones de cobre. El cobre metálico también se utiliza como pigmento y como precipitante del selenio. (Nordbeco, s.f)

4.6.2.- Aleaciones y compuestos

Las aleaciones no ferrosas más ampliamente utilizadas son las de cobre y zinc (latón), estaño (bronce), níquel (metal monel), aluminio, oro, plomo, cadmio, cromo, berilio, silicón o fósforo.

El *sulfato de cobre* se utiliza como algicida y molusquicida en el agua; como fungicida vegetal, mezclado con cal; como mordente en galvanoplastia; como agente espumante para la separación por flotación del mineral de sulfuro de zinc; y como agente para el curtido del cuero y la conservación de pieles. El sulfato de cobre neutralizado con cal hidratada, conocido como mezcla de Burdeos, se utiliza para la prevención del mildiu en viñedos.

El *óxido cúprico* se ha utilizado como componente de las pinturas para los fondos de las embarcaciones y como pigmento para vidrio, cerámica, esmaltes, vitrificado de porcelanas y gemas artificiales. También se utiliza en la fabricación de rayón y otros compuestos de cobre, como agente para el pulido de cristales ópticos y como disolvente para los minerales de cromo y hierro. El óxido cúprico se utiliza como componente del fundente en la metalurgia del cobre, en los compuestos pirotécnicos, en los fundentes para la soldadura del bronce y en productos agrícolas, como insecticidas y fungicidas. El óxido cúprico negro se utiliza para corregir las deficiencias de cobre en el suelo y como complemento de piensos.

Los *cromatos de cobre* son pigmentos, catalizadores para la hidrogenación en fase líquida y fungicidas para las patatas. Una solución de hidróxido cúprico con un exceso de amoníaco se utiliza como disolvente de la celulosa en la fabricación del rayón (viscosa). El hidróxido cúprico se utiliza en la fabricación de los electrodos de baterías y para el tratamiento y la coloración del papel. También se utiliza como pigmento, aditivo para piensos, mordente para teñir textiles y como componente de fungicidas e insecticidas. (Nordbeco, s.f)

4.6.3.- Riesgos

Los complejos aminados de clorato cúprico, ditionato cúprico, azida cúprica y acetílicos cuprosos son explosivos, pero no son importantes desde el punto de vista industrial o sanitario.

El acetiluro de cobre ha sido causa de explosiones en las fábricas de acetileno, por lo que se ha eliminado el uso del cobre en la construcción de dichas plantas. Fragmentos de cobre metálico o de aleaciones de cobre pueden alojarse en los ojos, produciendo lo que se conoce como chalcosis, que puede dar lugar a uveítis, abscesos y pérdida de los ojos. Los trabajadores que

fumigan los viñedos con la mezcla de Burdeos pueden padecer lesiones pulmonares (conocidas como “pulmón de fumigador de viñedos”) y granulomas hepáticos cargados de cobre.

La ingestión accidental de sales de cobre solubles es generalmente inocua, ya que la inducción del vómito libera al paciente de gran parte del cobre. Puede existir un riesgo de toxicidad inducida por cobre en las siguientes situaciones:

- la administración oral de sales de cobre se utiliza en ocasiones con fines terapéuticos, especialmente en la India;
- se ha demostrado que el cobre disuelto procedente del filamento de ciertos dispositivos intrauterinos se absorbe sistémicamente;
- una fracción apreciable del cobre disuelto a partir de las conexiones utilizadas normalmente en los equipos de hemodiálisis puede ser retenida por los pacientes y producir aumentos significativos del cobre hepático;
- el cobre añadido frecuentemente al pienso del ganado y las aves de corral se concentra en el hígado de estos animales y puede incrementar considerablemente la ingesta de este elemento al ingerir este órgano. También se añade cobre en grandes cantidades, en comparación con la ingesta humana normal a través de la dieta, a diversos alimentos para animales domésticos que en ocasiones son consumidos por algunas personas. El empleo de estiércol de animales con dietas complementadas con cobre puede producir un exceso de cobre en las verduras y cereales cultivados en los terrenos abonados con este estiércol. (Nordbeco, s.f)

4.6.4.- Toxicidad aguda

A pesar de que en los trabajos químicos de referencia se indica que las sales de cobre son tóxicas, en la práctica esto sólo es cierto cuando las disoluciones se utilizan de forma incontrolada, con fines suicidas o como tratamiento tópico de áreas con quemaduras graves. Cuando se ingiere sulfato de cobre, también conocido como piedra azul o azul vitriolo, en cantidades del orden de gramos, se producen náuseas, vómitos, diarrea, sudoración, hemólisis intravascular y posible fallo renal; en raras ocasiones, se observan también convulsiones, coma y la muerte. Cuando se beben aguas carbonatadas o zumos de cítricos que han estado en contacto con recipientes, cañerías, grifos o válvulas de cobre se puede producir irritación del tracto gastrointestinal, que pocas veces

llega a ser grave. Este tipo de bebidas son suficientemente ácidas para disolver niveles de cobre irritantes. Existe un informe de úlceras corneales e irritación cutánea, con baja toxicidad de otro tipo, en un minero de cobre que cayó en un baño electrolítico, aunque la causa pudo haber sido la acidez más que el cobre. En algunos casos en que se utilizaron sales de cobre para el tratamiento de quemaduras, se observaron concentraciones elevadas de cobre sérico y manifestaciones tóxicas.

La inhalación de polvos, humos o nieblas de sales de cobre puede causar congestión nasal y de las mucosas, y ulceración con perforación del tabique nasal. Los humos desprendidos durante el calentamiento del cobre metálico pueden producir fiebre, náuseas, gastralgias y diarrea. (Nordbeco, s.f)

4.6.5.- Toxicidad crónica

Efectos tóxicos crónicos atribuibles al cobre sólo parecen existir en personas que han heredado una pareja específica de genes recesivos autosómicos y que, como consecuencia, desarrollan una degeneración hepatolenticular (enfermedad de Wilson). Es una enfermedad rara. La mayor parte de la alimentación diaria que consume el hombre contiene de 2 a 5 mg de cobre, que prácticamente no se retiene en el organismo. El contenido corporal de cobre en una persona adulta es de 100 a 150 mg y es casi constante. En individuos normales (sin enfermedad de Wilson), casi todo el cobre está presente como parte integrante y funcional de una docena de proteínas y sistemas enzimáticos, como la citocromo oxidasa, la dopa-oxidasa y la ceruloplasmina sérica. En personas que ingieren grandes cantidades de ostras o mariscos de concha, hígado, setas, nueces y chocolate, alimentos todos ellos ricos en cobre, o en mineros que trabajan y comen durante 20 años o más en un ambiente cargado con un 1 ó 2 % de polvo de minerales de cobre, pueden llegar a observarse concentraciones hasta 10 veces superiores a lo normal. Sin embargo, aún no se ha descrito ningún caso de toxicidad crónica primaria por cobre (perfectamente definida a partir de las observaciones de pacientes con toxicosis por cobre crónica heredada —la enfermedad de Wilson— como disfunción y lesiones estructurales hepáticas, del sistema nervioso central, de los riñones, los huesos y los ojos) excepto en personas que padecen la enfermedad de Wilson. Sin embargo, los depósitos excesivos de cobre hallados en el hígado de pacientes con cirrosis biliar primaria, colestasis y cirrosis infantil de la India pueden contribuir a la gravedad de la enfermedad hepática característica de estos procesos. (Nordbeco, s.f)

4.6.6.- Medidas de salud y seguridad

Los trabajadores expuestos al polvo o nieblas de cobre deben utilizar ropa de protección adecuada para evitar el contacto repetido o prolongado con la piel. Cuando no sea posible controlar adecuadamente las concentraciones de polvo, deberán proporcionarse equipos de protección respiratoria y ocular adecuados. La limpieza del lugar y la existencia de instalaciones sanitarias adecuadas es fundamental, y debe estar prohibido fumar, comer y beber en el lugar de trabajo. En las minas en que existan minerales solubles en agua, como la calcantita, los trabajadores deberán tener especial cuidado de lavarse las manos con agua antes de las comidas.

La prevención de la fiebre por humos metálicos se logra manteniendo el nivel de exposición por debajo de las concentraciones aceptadas como satisfactorias para el trabajo con cobre en la industria. El empleo de sistemas de extracción de aire local es una medida necesaria para eliminar los humos de cobre en el lugar en que se producen.

Las personas que padecen la enfermedad de Wilson no deben trabajar en la industria del cobre. La determinación de la concentración sérica de ceruloplasmina es una forma de detectar este trastorno, ya que los individuos no afectados muestran niveles entre 20 y 50 mg/100 cm³ de esta proteína de cobre, mientras que el 97 % de los pacientes con enfermedad de Wilson presentan menos de 20 mg/100 cm³. Sin embargo, este es un procedimiento relativamente caro para utilizarlo en programas de detección generalizados. (Nordbeco, s.f)

4.7.- Herramientas y Equipo

- Elementos de Protección Personal.
- Sistemas de registro de información
- Herramientas ofimáticas.
- Programa de cosecha.
- Manuales de los equipos.
- Celdas electrolíticas.
- Electroodos.
- Cátodos.
- Equipos de comunicación.

- Sensores de Medición de Gases.
- Voltímetro.
- Extractores.
- Material de laboratorio graduado.

4.8.- Operación de celdas de electroobtención

4.8.1.- Identificación de la Unidad de Competencia Laboral (UCL)

Código	U-0400-8121-002-V02
Nombre	Operar celdas de electroobtención de acuerdo a procedimiento de trabajo y normativa vigente
Versión	2
Sector	Minería Metálica
Subsector	Minería del Cobre
Área Productiva	Hidrometalurgia (LX-SX-EW)

Nivel de Cualificación (de acuerdo al Marco de Cualificaciones para la Minería)	02		
Códigos de Clasificación	CIU4.CL	CIU008	CAE SII
	Ingrese código CIU	Ingrese código CIUO	Ingrese código CAE
Fecha de Acreditación	Haga clic aquí para escribir una fecha.		
Fecha de Vigencia	Haga clic aquí para escribir una fecha.		
Transversal/Específica	Específica	Obligatoria/Opcional	Opcional

Tabla 4 Formato de identificación

Fuente: (CCM, 2019)

V.- Desarrollo

5.1.- Desarrollo de actividades

5.1.1.- Secado de muestra

Se dio inicio al proceso de electroobtención aplicando un secado al precipitado obtenido del proceso SART para detectar el porcentaje de humedad y determinar el peso seco correspondiente el cual se efectuó en charolas de lámina y ayuda de una parrilla eléctrica.



Ilustración 4 secado de mineral



5.1.2.- Determinación de humedad

Después de la determinación del peso húmedo y peso seco se hizo el cálculo de humedad que se encontraba en el precipitado.

$$\frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso húmedo}} \times 100$$

$$\frac{4.300_{Kg} - 3.800_{Kg}}{4.300_{Kg}} \times 100 = 11.62\% \text{ humedad}$$

5.1.3.- Homogenización y Cuarteo

Al terminar con la determinación de humedad se procede a tomar una muestra representativa de 500gr (cabeza) para enviar a la empresa con los datos correspondientes y a analizar por su laboratorio interno, continuamos aplicando una homogenización al precipitado ya seco haciendo movimientos de levantamientos contrarios tratando de juntar vértice con vértice y un cuarteo correspondiente para tomar nuestra muestra de cabeza.



Ilustración 5 homogenización



Ilustración 6 toma de muestra representativa, técnica del pescado



Ilustración 7 pesaje de muestra

5.1.4.- Pruebas de electroobtención

La función de las pruebas es dar a conocer los parámetros correctos a implementar en la electroobtención principal, así como el tipo de ánodo y cátodo que se utilizara para la captación del mineral, la cantidad de corriente exacta que debe ingresarse a través de ellos, por consecuente sabremos de acuerdo a todas las pruebas máximas el tiempo de residencia de la solución cargada en la celda para lograr la captación mayoritaria del cobre, así como el mínimo de impurezas en él.

5.1.5.- Prueba de funcionamiento de celda

Se realizo el armado de la celda para realizar una prueba en la cual se ingreso un catodo de cobre y un anodo de acero inoxidable en una cantidad de agua y un poco de sal disuelta en ella para comprobar el funcionamiento de la celda y evitar problemas tecnicos a futuro.



Ilustración 8 armado de celda

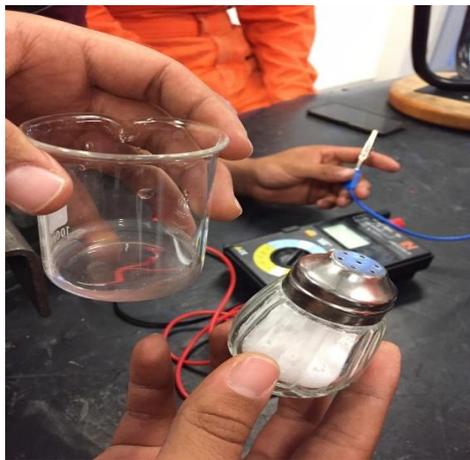


Ilustración 9 muestra de soluto y solvente

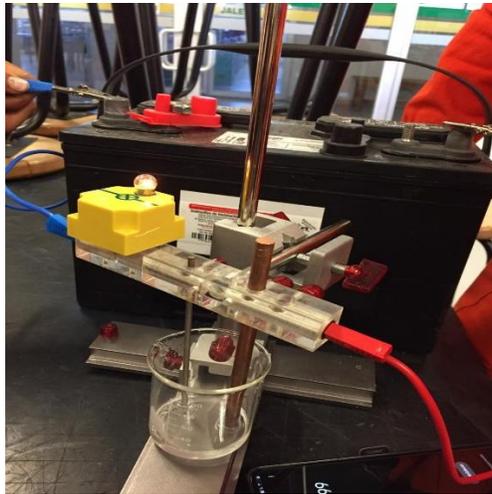


Ilustración 10 funcionamiento correcto de celda con solución salina

5.1.6.- Prueba 1

Prueba-1	
Concentración de H_2SO_4	100ml al 5%
Relación L/S	2:1
Agitación RPM/Tiempo	130 RPM/ 30 min
pH	6
Tiempo de residencia en celda	600 segundos
Carga eléctrica	9 volts

Anodo	Cobre
Cátodo	Acero inoxidable
Recuperación de cobre	

Tabla 5 parámetros prueba 1

En esta prueba se dio a conocer que la solución estaba muy saturada por lo cual se hizo una captación de cobre no tan apreciable ni en mayor cantidad ya que por pruebas solo se ingresan 2 cm en la solución para su captación a la cual no hay un dato preciso del cobre captado comprobable a falta de sensibilidad de la báscula.



Ilustración 11 anodo con cubierta de cobre

5.1.7.- Prueba 2

Prueba-2	
Concentración de H_2SO_4	100ml al 10%
Relación L/S	4:1
Agitación RPM/Tiempo	130 RPM/ 6 horas
pH	1
Tiempo de residencia en celda	79200 segundos
Carga eléctrica	14 volts
Anodo	Cobre

Cátodo	Acero inoxidable
Recuperación de cobre	

Tabla 6 parámetros prueba 2

En esta prueba hay un mayor porcentaje de solución en la cual se observó que hay una mayor captación de cobre a los 4 minutos de haber ingresado, al tanto de las 24 horas estimadas observamos cambios a las 22 horas en el anodo de cobre el cual perdió cuerpo debido a que la solución se había consumido en un aproximado del 90 % y la sedimentación continuaba permitiendo el paso de corriente y por lo tanto ocasiono una pequeña oxidación en el anodo y la perdida de cuerpo en él, al parecer las partículas del anodo se captaron en el cátodo así como también algunas partículas de cobre se encontraban en la sedimentación al fondo de la celda, no hay un valor o porcentaje aproximado de la recuperación de cobre puesto que lo entorpeció el cobre que desprendió el anodo.



Ilustración 12 solución antes de ingresar a celda



Ilustración 13 captación de cobre a los 5 minutos



Ilustración 14 solución agotada y paso de corriente en sedimentos



Ilustración 15 oxidación y pérdida de cuerpo en anodo



Ilustración 16 presencia de cobre en cátodo



Ilustración 17 sedimentos con presencia de cobre

5.1.8.- Prueba 3

Prueba-3	
Concentración de H_2SO_4	100ml al 15%
Relación L/S	11:1
Agitación RPM/Tiempo	130 RPM/ 6 horas
pH	
Tiempo de residencia en celda	4680 segundos
Carga eléctrica	14 volts
Anodo	Cobre
Cátodo	Acero inoxidable
Recuperación de cobre	

Tabla 7 parámetros prueba 3

Se observó que hay un mayor porcentaje de solución, se ingresó a la celda y la captación de cobre se vio presente al tanto de 6 minutos de haber ingresado, pero después de 30 minutos de

residencia notamos un cambio en el anodo de cobre el cual estaba siendo atacado por la solución y el flujo de corriente, a lo cual decidimos cambiar a un anodo de acero inoxidable para la siguiente prueba pues el aproximado de cobre que se captó tenía partículas del anodo de cobre y entorpecía la prueba, no hay una cifra del cobre recuperado puesto que la báscula no contaba con la suficiente sensibilidad y el nivel de pH no se tomo lectura por la falta de tiras lectoras de pH.



Ilustración 18 anodo afectado



Ilustración 19 presencia de cobre en el cátodo

5.1.9.- Prueba 4

Prueba-4	
Concentración de H_2SO_4	200ml al 15%
Relación L/S	11:1
Agitación RPM/Tiempo	130 RPM/ 6 horas
pH	
Tiempo de residencia en celda	50400 segundos
Carga eléctrica	16 volts
Anodo	Acero inoxidable
Cátodo	Acero inoxidable
Recuperación de cobre	

Tabla 8 parámetros prueba 4

Se ingreso a la celda el anodo y el cátodo los cuales tuvieron una respuesta buena pues al principio se observó un burbujeo en el anodo con una corriente de 14 volts y una recuperación, al paso del tiempo se decidió sumergir un poco más el cátodo en la solución para ver si se aumentaba la recuperación de cobre en una zona más limpia y se hizo un aumento de corriente a 16 volts y resulto factible pues la solución comenzó a liberar las partículas de cobre y se percibieron adheridas en el cátodo y dando un buen resultado de la captación pues hay gran cantidad de cobre presente en el cátodo y que proviene de una solución.



Ilustración 20 sulfato de cobre

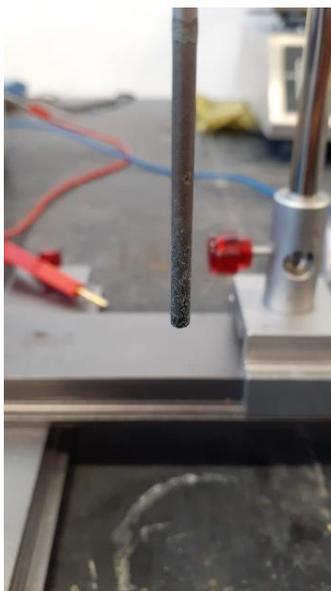


Ilustración 21 cátodo de acero inoxidable

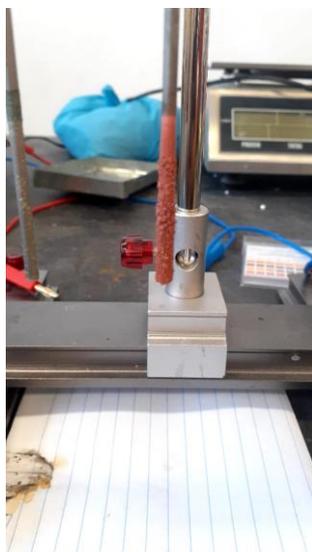


Ilustración 22 cátodo con presencia de cobre

5.1.10.- Prueba 5

Prueba-5	
Concentración de H_2SO_4	10.800 L al 13.42%
Relación L/S	10.8:1
Agitación RPM/Tiempo	85 RPM/ 6 horas
pH	
Tiempo de residencia en celda	10800 segundos
Carga eléctrica	30.4 volts
Anodo	Acero inoxidable
Cátodo	Acero inoxidable
Recuperación de cobre	

Tabla 9 parámetros prueba 5

Se hizo una prueba a la celda tamaño escala galvánica para obtener un funcionamiento óptimo y evitar percances al momento de ingresar la solución cargada y para tomar los parámetros y datos que deben tomarse en cuenta para proceder con la electroobtención.

Dentro de las observaciones después de ingresar el sulfato de cobre y dar una permanencia de 3 horas la tonalidad del precipitado de color negro cambio a un color café, así como a expedir un olor similar al agua estancada, hubo una gran formación de lodos los cuales se precipitaron por la tubería y celda, se observó cierta corrosión en el recipiente de lámina, el cátodo constaba de una lámina delgada de acero inoxidable la cual durante el proceso sufrió una gran y apreciable oxidación y comenzó a consumirse dando así una contaminación al precipitado, pero aun así se encontró con la captación de cobre en las paredes del cátodo afectándolo directamente y no en la lámina de acero como se había previsto en el apoyo visual se aprecia la presencia de cobre y el cambio de color de solución.



Ilustración 23 lavado del cátodo



Ilustración 24 preparación de sulfato de cobre



Ilustración 25 solución al ingresar a celda



Ilustración 26 cambio de color en solución



Ilustración 27 anodo



Ilustración 28 cátodo

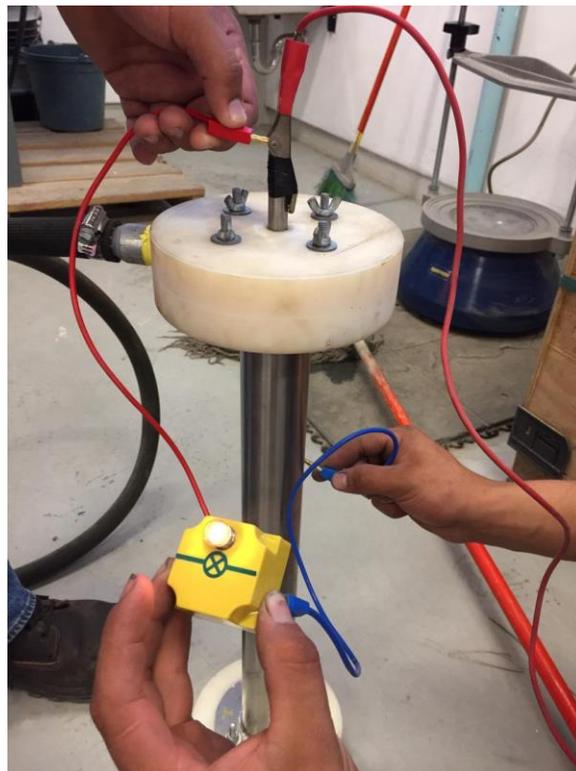


Ilustración 29 prueba de paso de corriente



Ilustración 30 presencia de barras

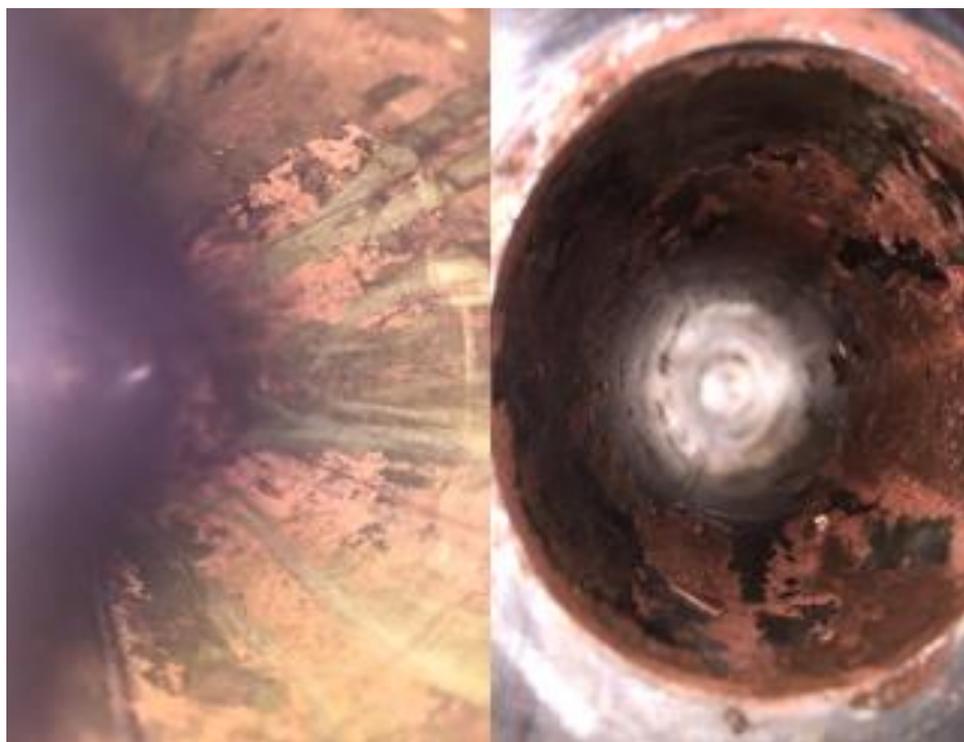


Ilustración 31 presencia de cobre en el cátodo

5.2.- Recuperación teórica del cobre

Para la recuperación del cobre de manera teórica debemos calcular la superficie de contacto del cátodo con la solución

5.2.1.- Superficie de contacto.

Tenemos que obtener el área del círculo inferior que entrara en contacto con el electrolito:

r = 1.64 mm o bien 0.00164 m.

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi(0.00164)^2$$

$$A = \pi(0.000002689)$$

$$A = 0.000008449 \text{ m}^2$$

Enseguida definimos la altura del electrodo que deseamos entre en la solución:

$$\text{Superficie} = 2\pi r h$$

$$S = (2) (3.1416) (0.00164 \text{ m}) (0.02 \text{ m})$$

$$S = 0.0002060 \text{ m}^2$$

Es así como calculamos el área de contacto del cátodo con el electrolito en m^2 .

Las mismas formulas son utilizadas para el calculo de todos los cátodos de las pruebas realizadas. En los cuales se dan cambios cuando el diámetro o la superficie inferior que se ingresara en la solución se amplía o se disminuye.

5.3.- Equivalente químico

El equivalente químico es igual al peso atómico del elemento a depositar dividido por su valencia.

$$EQ = \left(\frac{Meq}{n^0 e^-} \right).$$

5.3.1.- Constante de Faraday.

Se define como la cantidad de carga eléctrica en un mol de electrones. Es utilizada en los sistemas electroquímicos para calcular la masa de los elementos que se formaran en un electrodo. Se define como F.

Su fórmula es la siguiente:

$$F = N_A \cdot e$$
$$F = 96,485.3365 \text{ C mol}^{-1}$$

Donde:

N_A = Número de Avogadro ($6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).

e = *Carga electrica elemental de un electrón* (1.602×10^{-19} Coulumbios por electrón).

5.3.2.- Equivalente Electroquímico.

En base a estas dos leyes es posible conocer la masa de cobre metálico que ha de depositarse en el cátodo al finalizar la prueba electrolítica, a este suceso es al que se le llamo Equivalente Electroquímico (EEQ). Y es la cantidad de sustancia que se deposita o se desprende en una célula electrolítica cuando circula durante un segundo una corriente de un amperio.

$$\left(\frac{Meq}{((n^0 e^-)(96500 \text{ C}))} \right).$$

5.3.3.- Fórmula de Faraday.

Es así como Faraday determino que, conociendo estas variables, la intensidad de la corriente eléctrica suministrada, y el tiempo de contacto del electrolito con dicha corriente eléctrica es posible determinar la más que se deposita en el cátodo.

$$\left(\frac{(Meq)(I)(t)}{(n^0 e^-)(96500 C)} \right).$$

Donde:

I = Intensidad de corriente electrica (A).
t = Tiempo de contacto.

5.3.4.- Reacción Química

Producto de Grupo Coanzamex se tiene un producto de Sulfuro de Cobre (I) (Cu_2S), el cual ha de ser sometido a una extracción del elemento cobre a través del solvente ácido sulfúrico (H_2SO_4). A continuación, se observa la siguiente reacción después del ataque acido al precipitado de cobre.



Así:

Sulfuro de Cobre + Ácido sulfúrico = Sulfato de Cobre + Dióxido de Azufre + Agua

Es entonces que obtenemos una solución que tiene el valor metálico que buscamos extraer, el Cobre (Cu^{2+}), el cual trataremos de aplicar energía eléctrica para provocar la ruptura en su molécula.

Es entonces que nuestra molécula problema es el Sulfato de cobre (III) ($CuSO_4$), en el cual aplicaremos las formulas antes mencionadas para tratar de obtener la recuperación teórica después de la prueba.

Estos cálculos se pueden realizar antes de las pruebas, ya que en las pruebas únicamente se tiene una variación en la intensidad de la corriente y el tiempo de la electrodeposición, y estando el sulfato de cobre presente en todas y cada una de las pruebas.

5.3.5.- Aplicación de fórmulas en sulfato de cobre.

La masa equivalente del Cobre (Cu^{2+}), que es el metal que deseamos recuperar es de **63.55 gr/mol**, con número de electrones 2+.

Equivalente químico:

$$EQ = \left(\frac{63.55}{2} \right).$$

$$EQ = 31.775$$

El equivalente químico nos dice que para la obtención de 1 mol de Cu es preciso el paso de 2 moles de electrones, para que el elemento llegue a un estado de estabilidad aniónica.

Por lo tanto, de igual manera podemos calcular el Equivalente electroquímico (EEQ) para este compuesto, ya que como mencionamos este va a ser constante en todas las pruebas, la única variante va a ser la intensidad de la corriente y el tiempo de estancia.

Equivalente Electroquímico.

$$EEQ = \left(\frac{Meq}{((n^0 e^-)(96500 C))} \right).$$

$$EEQ = \left(\frac{63.55 \text{ gr/mol}}{((2)(96500 C))} \right)$$

$$EEQ = \left(\frac{63.55 \text{ gr/mol}}{(193,000 C/e)} \right)$$

$$EEQ = 3.2927 \times 10^{-4} = 0.00032927$$

Formula de Faraday.

$$m = \left(\frac{((Meq)(I)(t))}{((n^0 e^-)(96500 C))} \right).$$

Como anteriormente se había obtenido una constante para la masa equivalente, el número de electrones y la constante de Faraday, la formula queda de la siguiente manera:

$$m = ((EEQ)(\perp)(t))$$

$$m = ((0.00032927)(0.06 A)(600 s))$$

$$m = 0.0118 \text{ gr de Cu}$$

Aplicando la fórmula de Faraday exhibe que la cantidad de cobre obtenida es demasiado baja, teniendo consideración para la siguiente prueba de aumentar el tiempo de residencia.

5.4.- cálculos por prueba de recuperación de cobre

5.4.2.- prueba 1- recuperación teórica

$$m = ((EEQ)(\perp)(t))$$

$$m = ((0.00032927)(0.06 A)(600 s))$$

$$m = 0.0118 \text{ gr de Cu}$$

5.4.3.- prueba 2.- recuperación teórica

$$m = ((EEQ)(\perp)(t))$$

$$m = ((0.00032927)(0.06 A)(79200 s))$$

$$m = 1.56469104 \text{ gr de Cu}$$

5.4.4.- prueba 3.- recuperación teórica

$$m = ((EEQ)(\perp)(t))$$

$$m = ((0.00032927)(0.06 A)(4680 s))$$

$$m = 0.092459016 \text{ gr de Cu}$$

5.4.5.- prueba 4.- recuperación teórica

$$m = ((EEQ)(\perp)(t))$$

$$m = ((0.00032927)(0.06 A)(50400 s))$$

$$m = 0.995711248 \text{ gr de Cu}$$

5.4.6.- prueba 5.- recuperación teórica

$$m = ((EEQ)(\perp)(t))$$

$$m = ((0.00032927)(3.08 A)(10800 s))$$

$$m = 10.95 \text{ gr de Cu}$$

VI.- Actividades adicionales

Se colaboro con el proyecto de lixiviación en columnas para determinar el oro y plata en el mineral, apoyando con la elaboración de las columnas y realizando los cálculos correspondientes del consumo de cal, la homogenización de mineral con cal y la carga de las columnas, así como llevando un conteo del cianuro que se utilizo y cuidando día con día los parámetros de riego de las columnas.



Ilustración 32 instalación de columnas



Ilustración 33 homogenización y cuarteo



Ilustración 34 relleno de columnas con el mineral

Estatus de columnas de lixiviación

- Información de las columnas.

- Las columnas están elaboradas con material de un tubo de PVC, están instaladas en una base de madera por la parte de abajo tienen bidones de 10 litros donde estará cayendo la solución lixiviada. En la parte de arriba por encima de las columnas está una repisa donde está colocada la solución lixiviante.
- Carga de las columnas
- 1.- Columna La Famosa: **29.65 kg**
- 2.- Columna San Pedro: **54.66 kg**
- 3.-Columna La Colorada: **115.77 kg**
- 4.- Columna El Abra: **112 kg**

Tasa de riego:

10 l/hm²

1 min= 3.04 ml

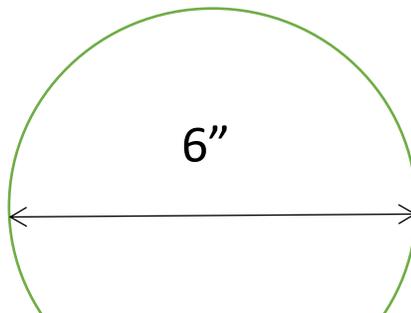
60 min=182.4 ml

24 hrs. =4377.6 ml

$$4377.6ml \times 1lt \div 1000ml = 4.3776 lt$$

4.3776 lt

Área del tubo



$$6in * 2.54cm \div 1in = 15.24cm(\text{diametro})$$

$$15.24 \div 2 = 7.62cm(\text{radio})$$

$$7.62cm \times 1m \div 100cm = 0.0762m$$

$$A = \pi * (0.0762)^2 = 0.01824m^2$$

Caudal

$$10lt \times 1000ml \times 1hr \times 0.01824m^2 \div 1lt \div 60lt = 3.04ml/min$$

El riego de las columnas se instaló el día 3 de agosto del 2020 a las horas 1:30 del día

Consumo de cal de cada mina

El cálculo del consumo de cal es importante para cada composito pues es el que regula el pH del medio (consiste y ayuda en aumentar el nivel de pH) lo cual controla la eficiencia y recuperación del proceso de manera factible.

Formula: $\frac{(Kg \text{ de cal})(\text{Peso total por mina})}{1000Kg}$

Por lo tanto, los cálculos correspondientes y datos reales se encuentran en las tablas siguientes:

El Abra		
Relación	Cálculos	Consumo total de Cal
1:1	$0.3kg \text{ ————— } 1000 \text{ kg}$ $0.336 \text{ kg ————— } 112 \text{ kg}$	7 KG=784 GR
2:1	$0.2 \text{ kg ————— } 1000 \text{ kg}$ $0.224 \text{ kg ————— } 112 \text{ kg}$	
3:1	$0.4 \text{ ————— } 1000 \text{ Kg}$ $0.448Kg \text{ ————— } 112 \text{ Kg}$	

Tabla 10 consumo de cal proyecto el Abra

La Famosa		
Relación	Cálculos	Consumo total de Cal

1:1	0.2 kg ———> 1000 kg 0.060Kg ———> 29.65 kg	7 KG= 207 GR
2:1	0.3 kg ———> 1000 kg 0.090Kg ———> 29.65 kg	

Tabla 11 consumo de cal la Famosa

La Colorada		
Relación	Cálculos	Consumo total de Cal
1:1	0.3 Kg ———> 1000 kg 0.347 kg ———> 115.77 kg	7 KG =.810 GR
2: 1	0.2 kg ———> 1000 kg 0.231 kg ———> 115.77 kg	
3:1	0.5 ———> 1000 kg 0.578 kg ———> 115.77 kg	

Tabla 12 consumo de cal proyecto la colorada

San Pedro		
Relación	Cálculos	Consumo total de Cal
1:1	0.3kg ——— 1000 kg 0.164kg ——— 54.66 kg	7KG= .382 GR
2:1	0.2 kg ——— 1000 kg 0.109 kg ——— 54.66 Kg	
3:1	0.4 kg ——— 1000 kg 0.218 kg ——— 54.66 kg	

Tabla 13 consumo de cal proyecto San Pedro

Consumo de CN

Fecha	Mina			
	La Famoso	San Pedro	El Abra	La Colorada
03/Agosto/2020	5 Litros	5 litros	5 litros	5 litros
04/Agosto/2020				
05/Agosto/2020	2.150 litros	1.250 litros	3.450 litros	4.300 litros
06/Agosto/2020	5 litros	5 litros	4.900 litros	4.450 litros
07/Agosto/2020	1.850 litros	5 litros	2.450 litros	5 litros
De los días 8 de agosto al 10 de agosto no se ingresó al laboratorio				
11/Agosto/2020	5 litros	3.750 litros	5 litros	5 litros
12/Agosto/2020	2.850 litros	3.600 litros	4 litros	4.575 litros
13/Agosto/2020	3.700 litros	5 litros	3.450 litros	3 litros
14/Agosto/2020	1.700 litros	3.650 litros	2.400 litros	4 litros
15/Agosto/2020	9 litros	10 litros	9 litros	9.500 litros
17/Agosto/2020	1.250 litros	4.950 litros	2.500 litros	3.600 litros
19/Agosto/2020	5 litros	5 litros	5 litros	5 litros
20/Agosto/2020	4.750 litros	4.950 litros	3.950 litros	4.500 litros
21/Agosto/2020	5 litros	4.500 litros	5 litros	4.500 litros
22/Agosto/2020	9 litros	7.500 litros	8 litros	9 litros

25/Agosto/2020	900 mililitros	3 litros	3.700 litros	1.900 litros
26/Agosto/2020	3.500 litros	4.300 litros	5 litros	4.600 litros

Tabla 14 consumo de cianuro

VII.- Conclusiones

Es un largo proceso en el cual no se tenía mucho conocimiento, se investigó en la mayoría de las fuentes fidedignas posibles, para la comprensión de este proyecto a desarrollar y poder llevar a cabo las pruebas metalúrgicas en el subproceso de electroobtención a nivel laboratorio, mediante el producto obtenido anteriormente en el proceso SART, con el objetivo tener resultados factibles y rentables, buscando la mayor pureza de Cu metálico, el proceso deja espacio para la continuidad de pruebas a desarrollar, debido al corto tiempo operativo ocasionado por la contingencia **Covid 19**, se continuara con las pruebas, para encontrar la estandarización de los parámetros más óptimos de electroobtención de Cu y se obtenga una mejor recuperación del mismo, se contemplan varias pruebas programar, buscando los equipos y materiales más adecuado para el proceso.

Se dejó establecido el formato de operación de celdas de electroobtención a programar el cual nos permite identificar la unidad de competencia de operación adecuada.

Bibliografía

- CCM. (2019). operar celdas de electroobtencion de acuerdo a procedimientos de trabajo y normativa vigente.
- Codelco . (2019). *Electroobtencion*. Chile .
- electroquimicas", ". (s.f.). *Celdas electroquimicas*. Mexico.
- Latina, U. A. (sf). Obtenido de http://ual.dyndns.org/Biblioteca/Bachillerato/Quimica_II/Pdf/Sesion_08.pdf
- Morales, A. (2003). *Electrometalurgia*. Chile.
- Nordbeco, G. (s.f). Metales propiedades quimicas y toxicidad .
- (sf). En U. A. Latina.
- Termodinamica de Procesos Electroquimicos. (s.f.).