

UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

**“Recuperación de cobre a partir de soluciones lixiviadas mediante
electrodeposición”**

PRESENTADO POR:

ITALO ALEJANDRO LIZZETTI DIAZ

ASESOR:

Ing. Víctor Raúl Coca Ramírez

CIP N° 48044

HUACHO – PERÚ

2021

DEDICATORIA

Este proyecto de investigación va dedicado
a mis padres que me brindaron su ayuda en todo
momento, así mismo a quienes estuvieron apoyándome
en mi camino por la universidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por guiarme y brindarme conocimiento y salud necesaria para poder culminar mis estudios en mi alma mater, así mismo también doy gracias a mis padres por guiarme en todo momento y brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente dentro de la universidad José Faustino Sánchez Carrión, finalmente quiero agradecer a quienes estuvieron apoyándome en todo momento en mi transcurso por la universidad.

“RECUPERACIÓN DE COBRE A PARTIR DE SOLUCIONES LIXIVIADAS MEDIANTE ELECTRODEPOSICIÓN”

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I : PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA	2
1.1. Descripción de la realidad problemática	2
1.2. Formulación del problema	3
1.2.1.Problema General	3
1.2.2.Problemas específicos.....	3
1.3.Objetivos de la investigación.....	3
1.3.1.Objetivo General.....	3
1.3.2.Objetivo Específicos.....	3
1.4.Justificación de la investigación	3
1.5.Delimitación	4
1.6.Viabilidad	4
CAPITULO II : MARCO TEÓRICO.....	5

2.1. Antecedentes de la investigación.....	5
2.2. Bases Teóricas	12
2.2.1. Lixiviación de minerales oxidados	12
2.2.2. Tipos de lixiviación respecto al Cobre	13
2.2.3. Precipitación con metales	13
2.2.4. Fundamentos de la purificación.....	14
2.2.5. Electrodeposición	16
2.2.6. Variables del proceso de electrodeposición.....	17
2.2.7. Administración de reactivos	19
2.2.8. Productos del electro extracción.....	24
2.2.9. Cantidad de cobre electro obtenido	30
2.3. Definiciones Conceptuales	32
2.4. Formulación de la Hipótesis	34
2.4.1. Hipótesis General	34
2.4.2. Hipótesis específicas.....	34
CAPITULO III : METODOLOGÍA.....	35
3.1. Diseño.....	35
3.2 Tipo.....	35
3.3. Nivel	35
3.4. Diseño.....	35
3.5. Población y Muestra	35
3.5.1. Población	35

3.5.2. Muestra	35
3.6. Operacionalización de las variables	36
3.7. Técnicas de recolección de datos.....	36
3.7.1. Técnicas a emplear	36
3.7.2. Técnicas para el procesamiento de información.....	37
3.8. Procedimiento experimental	37
3.8.1. Equipos, materiales reactivos.	37
3.8.2. Diseño y condiciones para el experimento.	39
3.9. Procedimiento de trabajo	41
CAPITULO IV: RESULTADOS	48
4.1. Resultados de las pruebas	48
CAPITULO V: DISCUSIÓN, CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES.....	50
5.1. Discusión	50
5.2. Conclusión	50
5.3. Recomendación	50
CAPITULO VI : REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXOS	53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.Reacciones que ocurren en la cementación del cobre con Hierro	14
Ilustración 2.Proceso de electrodeposición	17
Ilustración 3.Mecanismo anódica y catódica.....	21
Ilustración 4.Proceso de electro obtención de cobre.	22
Ilustración 5. Imagen representativa en función a la densidad de corriente.....	29
Ilustración 6. Imagen de la Estriación vs. Masa/volumen del flujo eléctrico.....	30
Ilustración 7.Equipos del proceso de electrodeposición.....	38
Ilustración 8.Configuración de la celda electrolítica.	40
Ilustración 9.Cobre recuperado en cada cátodo.....	49
Ilustración 10.Ánodos (aleación Pb-Sn).....	53
Ilustración 11.Cátodos (acero inoxidable AISI 316-L)	54
Ilustración 12.Pesado de cátodos.....	54
Ilustración 13.Proceso de electrodeposición 1 cm de distancia de electrodos	55
Ilustración 14.Proceso de electrodeposición 2 cm de distancia de electrodos	55
Ilustración 15.Cosecha de cátodos (separación de electrodos 1 cm).....	56
Ilustración 16.Cosecha de cátodos (separación de electrodos 2 cm).....	56
Ilustración 17.Recuperación de cobre en 2 horas, 1,5 V y separación de 1 cm (1) y 2 cm (2)	57
Ilustración 18.Recuperación de cobre en 2 horas, 1,8 V y separación de 1 cm (3) y 2 cm (4)	57
Ilustración 19.Recuperación de cobre en 3 horas, 1,5 V y separación de 1 cm (5) y 2 cm (6)	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Calidad de cobre electro obtenido respecto al Contenido de Cobre y la Densidad de Corriente.	27
Tabla 2. Operacionalización de la variable	36
Tabla 3. Dimensiones de cátodo y ánodo	40
Tabla 4. Estándares de labor respecto a la prueba 1	41
Tabla 5. Estándares de labor respecto a la prueba 2	42
Tabla 6. Estándares de labor respecto a la prueba 3	42
Tabla 7. Estándares de labor respecto a la prueba	43
Tabla 8. Estándares de labor respecto a la prueba	44
Tabla 9. Estándares de labor respecto a la prueba	44
Tabla 10. Estándares de labor respecto a la prueba	46
Tabla 11. Estándares de labor respecto a la prueba	46
Tabla 12. Cobre recuperado	48

RESUMEN

En la presente investigación desarrollada sobre “Recuperación de cobre a partir de soluciones lixiviadas mediante electrodeposición”, La solución de sulfato de cobre fue utilizada como electrolito en la electrodeposición de cobre (EW), la solución con la que se trabajó tenía un pH de 1 la cual ofrecía una buena conductividad brindando una gran facilidad al cobre metálico para que se deposite en la superficie de cátodo, entre los electrodos que se usaron son el acero inoxidable AISI 316-L como cátodo y una aleación de Pb-Sn como ánodo.

La solución de sulfato de cobre empleada tiene una ley de 8,1509 g/L de Cu, los resultados que se obtuvieron en la primera corrida es de recuperación de Cu es de 1,0669 g con un potencial eléctrico de 1,5 y 1,8 V, en tiempo de 2 y 3 horas, con una separación de electrodos de 1 y 2 cm. En la segunda corrida se recuperó una cantidad de 1,0829 g manteniendo las mismas condiciones que la primera corrida.

Palabras Clave: electrodeposición, recuperación, sulfato de cobre.

ABSTRACT

In the present investigation carried out on “Recovery of copper from leaching solutions by electrodeposition”, the copper sulphate solution was used as an electrolyte in the copper electrodeposition (EW), the solution with which it was worked had a pH of 1 which offered a good conductivity provided great ease to metallic copper to deposit on the cathode surface, among the electrodes that were used are stainless steel AISI 316-L as a cathode and an alloy of Pb-Sn as an anode. The copper sulfate solution used has a grade of 8,1509 g / L of Cu, the results obtained in the first run is recovery of Cu is 1.0669 g with an electrical potential of 1.5 and 1.8 V, in time of 2 and 3 hours, with a separation of electrodes of 1 and 2 cm. In the second run an amount of 1.0829 g was recovered while maintaining the same conditions as the first run.

Keywords: electrodeposition, recovery, copper sulfate.

INTRODUCCIÓN

Uno de los procesos más importantes de obtención del cobre de alta pureza es la Electrodeposición, proceso mediante el cual se obtienen cátodos de cobre de aproximadamente 99,99% de pureza.

Es bien sabido que en las menas de cobre aún existen cantidades de cobre que pueden ser recuperadas a través de la Lixiviación, proceso que consiste en hacer pasar una solución ácida, generalmente ácido sulfúrico, sobre las pilas (menas de cobre) con la finalidad de obtener una solución rica en cobre, la que finalmente es llevada a las celdas de electrodeposición, que son como cubetas en cuyo interior se encuentran dispuestos los ánodos y los cátodos, que es por donde va a circular la corriente eléctrica a baja intensidad y mediante la electrólisis es que los iones de Cu se van a depositar en el cátodo.

En la siguiente investigación es que vamos a tratar de recuperar el cobre a partir de las soluciones lixiviadas que se obtienen en las prácticas de laboratorio que se realizan en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Materiales de la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, utilizando la técnica de electrodeposición, coadyuvando a evitar que estas soluciones vayan a parar al alcantarillado de la universidad.

CAPITULO I : PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

1.1.Descripción de la realidad problemática

La minería a nivel mundial está considerada como una de las principales actividades económicas que favorecen el desarrollo económico de una nación, pues trae consigo la generación de empleo, una mayor recaudación de impuestos para la comuna e ingresos por concepto de exportaciones. En el lado negativo podemos señalar que es una de las actividades que origina impactos negativos en el medioambiente.

El Perú tradicionalmente es un país minero, por lo que la minería está considerada como uno de los principales ejes en el que gira su economía. En el ranking mundial está considerado uno de los principales productores de metales como Oro, Plata, Cobre y Zinc, siendo el segundo productor de cobre en el mundo, sin embargo, debido a los conflictos que existen con las comunidades locales por el impacto ecológico que ocasiona en la agricultura es que se han paralizado algunos proyectos mineros, ocasionando un incremento de la tasa de desempleo en el sector minero.

Para el proceso de obtención del cobre se ha venido utilizando a través de los años dos tipos de procesos, estos dependiendo de si la minera que contiene el cobre está como sulfuro u óxido. Si el mineral proviene de sulfuros se procede vía la Piro metalurgia, generándose pilas de ripio que contienen minerales sulfuraos de baja ley. Pero si proviene de óxidos se sigue un proceso hidrometalúrgico conocido como Lixiviación, proceso en el cual el cobre se extrae mediante solventes convenientes y finalmente de las soluciones lixiviadas se obtiene el cobre mediante procesos electroquímicos.

Uno de estos métodos electroquímicos económicamente rentables para la obtención de cobre es la electrodeposición, obteniéndose el metal relativamente puro.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

¿De qué manera se podrá recuperar el cobre a partir de soluciones lixiviadas mediante el método de electrodeposición?

1.2.2. Problemas específicos

¿En qué forma se podrá Evaluar el efecto del Sulfato de cobre en el proceso de electrodeposición del cobre en medio acuoso?

¿De qué modo se podrá obtener una línea de producción a escala de laboratorio para la recuperación de cobre?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo General

Recuperar el cobre a partir de soluciones lixiviadas mediante el método de electrodeposición.

1.3.2. Objetivo Específicos

Evaluar el efecto del Sulfato de cobre en el proceso de electrodeposición del cobre en medio acuoso

Obtener una línea de producción a escala de laboratorio para la recuperación de cobre

1.4. Justificación de la investigación

La justificación radica principalmente en el aporte respecto a la problemática existente para la recuperación del cobre generados en el proceso de lixiviación, permitiendo que este material se pueda aprovechar como para otros usos a fines , y así mismo reducir la contaminación que estos relaves dejan , por métodos mucho más limpios y menos contaminantes.

1.5.Delimitación

La realización de la investigación será desarrollada de manera adecuada en el interior de los laboratorios de la UNJFSC, realizadas en el año 2019.

Así mismo nos brindara un importante modelo de aplicación para el manejo adecuado y optimo respecto a la electrodeposición de cobre, específicamente en la ciudad de Huacho.

1.6.Viabilidad

Dicho proyecto de investigación es realizado por que el investigador posee todos los medios necesarios disponibles, así como los recursos , la asesoría y la información disponible respecto al desarrollo electrodeposición posición de cobre.

CAPITULO II : MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales.

Tal como señala (Arriagada Hernández, 2006) en su investigación para diseñar, construir y optimizar una celda de electro obtención de cobre, llevada a cabo en la Universidad de Chile, concluyó:

Es factible el electro obtención de cobre en una celda basada en la electrodiálisis, utilizando un ánodo de grafito y un cátodo particulado de cobre, obteniendo resultados superiores a los que se pueden obtener en celdas convencionales.

La eficiencia alcanzada para el caso base fue de 96,7% para una tensión media de 2,55 V y para un consumo específico de energía de 2,25 kWh/kg de Cobre, llegando a la conclusión que la caída de tensión es una de las variables que más influyen en el consumo de energía.

Una reducción de 33,3 % en la densidad de corriente generan un descenso del 17 % aproximadamente de la tensión de celda.

La temperatura es un factor de mucha importancia respecto al rendimiento energético y consumo de energía, concluyendo que para una temperatura de 56°C se logran mejores resultados (consumo energético de 1.5 kWh/kg de Cu y eficiencia de 97,1%) que para 27°C y 36°C.

Concluye que los mejores resultados obtenidos se consiguen cuando la concentración inicial de cobre en le cátodo es de 40 g/l, una temperatura de 56°C, velocidad de rotación de 40 RPM y un caudal de 990 cm³/min.

Según (Rivera, 2015) en su investigación denominada: “Diseño de Una planta para recuperación de oro a partir de minerales sulfurados con tiosulfato de sodio como agente lixivante” llevada a cabo en la Escuela Politécnica Nacional, indico lo siguiente:

La proporción de recuperación de oro fue del 28% con un pH de 10,5, mientras que el porcentaje de oro disminuyo con un pH de 12, así mismo el catalizador de la solución de oro es la cuprotetramina.

La disminuida recuperación de oro puede darse debido a un gigantesco aumento de iones de cobre, así mismo los resultados obtenidos de las diferentes concentraciones fueron de 127 y 381 mg/L teniendo como resultado 46 y 30% de recuperación de oro.

El porcentaje de recuperación de oro se reduce de 81% a 24% considerablemente al aumentar el porcentaje de residuos sólidos de 15% a 33%, teniendo en cuenta una proporción de 0.7 M del compuesto de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Otro de los componentes que perturban considerablemente el rescate de oro es el tamaño de partícula, visto que en el ensayo su recuperación de oro fue del 58% siendo tamaño de la partícula de 132 μm en comparación al 81% siendo el tamaño de 100 μm .

Un aumento en el flujo eléctrico brinda la oportunidad de aumentar de manera considerable el rescate del oro en los mecanismos de electrolisis , esto se debe a que la presencia del voltaje ajustándolo al rango de 0,35 a 1,50 V el rescate de oro dentro del área catódica se incrementó de 62% a 83%.

2.1.2. Antecedentes Nacionales.

De acuerdo con (Chamorro & Jimenez, 2011) en su investigación denominada: “Purificación y electrodeposición de cobre a través del lixiviado de la empresa

Ferroquímica S.R.L. para la obtención de cobre electrolítico a escala de laboratorio”, realizada en la Universidad Nacional del Centro del Perú, indico lo siguiente:

Después del análisis del lixiviado en la industria FERROQUIMICA S.R.L mediante diversos análisis entre el más principal que fue de espectrometría, se obtuvo los siguientes resultados: 12% de cobre; 1,5% de fierro; 0,1 % de carbonatos y 0,3 % de silicatos.

Se diseñó y elaboro una cuba de electrodeposición de un material resistente a al deterioro, así mismo también se le añadió varios cátodos de cobre y de plomo, que posteriormente lo efectuaron dentro del recinto de la Universidad donde se realizó el proyecto de investigación, también se diseñó un sistema para la purgación, el cual posee un receptáculo de acero no oxidable de 177 watts, un agitador y una termocupla para controlar la temperatura.

A través de la sedimentación se separó los carbonatos y silicatos anteriormente ya purificados a través de oxidación química pasando de ion ferroso (Fe^{2+}) a ion férrico (Fe^{3+}) con una disolución de HNO_3 y H_2O_2 .

El agente precipitante que se usó para la precipitación del fierro fue hidróxido de amonio al 25% como resultado de este se obtuvo un precipitado de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y una disolución de color celeste oscuro de tetraaminocuprato que posteriormente se filtró para su separación. En la tabla número 13 se muestran los resultados obtenidos por espectrofotometría UV-visible.

El porcentaje de separación de impurezas fue de 93,586 % y así mismo se halló diversos parámetros de espectrofotometría UV- visible hallándose una proporción de 1,4 g/L de Fe en las muestras experimentales del laboratorio de Química General ,asimismo para la separación del ion ferroso los parámetros adecuados de temperatura y pH fueron de 60°C 10.

Dado método determino la composición química del electrolito obteniendo resultados como 10,70 g/ L Cu y 0,04 g/L Fe llegando así el 99,70 % de cobre puro.

El volumen del electrolito fue de 1 litro, con un pH ácido de 0,8, esto más que todo es para aumentar la conductividad eléctrica, asimismo el voltaje fue constante 2,5 V, lo único variable fue la cantidad de ánodos y cátodos para determinar una óptima densidad catódica.

Así mismo se determinó las cuantificaciones para una electrodeposición adecuada y óptima siendo estos, relación masa/volumen catódico de 141,40 A/m, Periodo de 120 minutos , donde se puede observar que la deposición del mineral es aún mucho más elevada llegando a 10,7 g de Cu a diferencia de los otros datos cuantificables.

Se llegó a obtener un Cu aproximadamente de 99.60% por medio del lixiviado obtenido en la empresa FERROQUIMICA S.R.L, a través del mecanismo de electrodeposición teniendo en cuenta los diversos parámetros adecuados y óptimos como la relación de masa/volumen y el tiempo, manteniendo de manera periódica el pH y la temperatura de purgación.

De acuerdo con (Franklin, 2018) en su investigación denominada: “Implementación de un Convertidor de Corriente para Mejorar la Recuperación de Au y Ag en las Cubas Electrolíticas en la Industria Minera SOTRAMI S.A” realizada en la UNJFSC, Perú ,concluyo lo siguiente:

Luego de haber realizado dicho estudio se concluyó que los resultados óptimos se encuentran establecidos entre estas condiciones: 2,6 Kg/ TM de NaCN de 98%, con firmeza media de 0,18 gr/Lt, Carbón utilizado (Carcón A) con una granulometría de -6m a +14m, 36.22gr/Lt y en la desorción 2.5 volt.

Dichos límites tienen una confianza del 95%, control de sólidos 80,72%, con una probabilidad 1,73%, dadas estas condiciones, se tiene una liberación de 84,49 % - 200m y con una probabilidad de 0,318471 % quedando fuera.

La adsorción al principio era mayor mientras más se impregna su adhesión disminuye hacia el TK-2 esta relación posee una adsorción de tiene una relación de $= 4.36 + (1.294 - 4.36) \cdot^{-0.1024}$.

El KT-3 tiene una relación de $= 1.13 + (0.238 - 1.13) \cdot^{-0.0787}$, seguidamente su crecimiento disminuye a la vez que este se va cargando, su crecimiento observado es de 0.07gr/Kg, mientras que el calculado es de 0.05 gr/Kg de oro.

Definitivamente ingresa alrededor de 25.91 gr/TM, dicha extracción aproximada es de 24,48 gr/TM, en la disolución barren es de 0.33 gr/m³, por lo que el metal en el relave es de 1.1 gr/TM.

Finalmente, el rescate (lixiviación) es del 94% mientras que la recuperación total es del 99.7 %, por lo que la recuperación anual es de 93.99%.

Según Chinga & Murga (2016) en su investigación denominada: “Efecto de la temperatura, la concentración de $4.5 \cdot 10^{-2}$ y $2 \cdot 10^{-4}$ en el electrolito, sobre la electrodeposición de cobre en cátodos de acero inoxidable 316L” llevada a cabo en la Universidad Nacional de Trujillo, Perú, llegó a las siguientes conclusiones:

Su mejora calidad química y física depende de una mayor aglutinación de $4.5 \cdot 10^{-2}$ en el electrolito ya que a su vez esto también disminuye el peso de depósito de cobre.

La eficiencia de corriente del 98.27% se obtiene a partir de la concentración de 80 g/L de $4.5 \cdot 10^{-2}$ en el electrolito, con una mejor eficacia química

y mecánica, en cambio para la concentración de 40 g/L de H_2SO_4 se adquiere como acopio “polvo de Cu oxidado”.

La masa del depósito de cobre aumenta con una concentración mayor de H_2SO_4 y así mismo también mejorar su condición química y mecánica, respecto a la concentración de 100 g/L de H_2SO_4 , se adquiere el más alto porcentaje de depósito y Cu con una óptima condición química y mecánica que presenta una eficiencia del 98.60%.

Respecto a la temperatura, mientras mayor sea la masa de acumulación de cobre disminuye, su condición física y mecánica mejora. Pero en el rango de 38-41 °C, se obtiene una mayor masa en la acumulación de Cu, con una alta condición física y mecánica, presentando una eficiencia del 99%.

Después de haber realizado varios ensayos, se llegó a la conclusión de que tres variables presentan un alta elevada significancia en la acumulación del Cu, siendo la concentración el que presenta un mayor efecto. A continuación, se obtienen las siguientes condiciones de operación.

Densidad (CuSO_4) = 80 g/L

Densidad (H_2SO_4) = 100 g/L

Temperatura: = 313 K

Voltaje de la cuba electrolítica = 2.0 V

Potencia de corriente = 0.70 Amp

Fluidez de corriente = 150 Amp/ m^2

De acuerdo con Ramirez (2019) en su investigación que tiene como título “Optimización de la calidad de cátodos de cobre obtenidos a altas densidades de corriente” llevada a cabo en la Universidad Nacional De San Agustín De Arequipa, concluyo lo siguiente:

Los resultados de las pruebas demuestran que es factible obtener cátodos de calidad High Grade, (AA), operando a muy elevadas densidades de corriente, ($> 400 \text{ Amp/m}^2$), aplicando la inyección de Aire para lograr la Convección Forzada de iones cobre.

Los dos primeros diseños experimentales empleados, optimizaron los parámetros operativos existentes del proceso, siendo necesario, además, (a más de 400 Amp/m^2), aplicar la inyección forzada de aire para reducir la capa de Nernst y mejorar el depósito catódico.

Un resumen final de esta investigación muestra cómo se optimizó la calidad de cátodos, producidos a elevadas densidades de corriente, según:

Antes

Plomo = 4.2 ppm

Azufre = 19.4 ppm

Rugosidad = 35.2 %

Tamaño Max. Grano = 10.1

Después

Plomo = 0.5 ppm

Azufre = 4.8 ppm

Rugosidad = 6.9 %

mm Tamaño Max. Grano = 4.6 mm

Los análisis metalográficos muestran que los cátodos obtenidos con inyección de aire son más compactos, esto asegura la obtención de menos contaminantes ocluidos y mejora la calidad.

Sin Aire

Densidad del cátodo = 8.69 gr/cc

Porosidad del cátodo = 3.05%

Espesor del cátodo = 16.13 mm

Con Aire

Densidad del cátodo = 8.91 gr/cc

Porosidad del cátodo = 0.52 %

Espesor del cátodo = 13.89 mm

Adicionalmente, subir la densidad de corriente le permitió a la Planta electrolítica, incrementar su capacidad de producción de 211 TMD de cobre a 264 TMD, es decir un 25 % más con mínima inversión.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Lixiviación de minerales oxidados

Son considerados minerales aquellos que presenten en su composición el compuesto oxígeno como componente vital. Dicha propiedad les concede una mayor disociación en soluciones tanto alcalinas como ácidas. Los minerales oxidados que más resaltan es la malaquita y la atacamita.

La atribución de la ganga mediante el mecanismo de lixiviación de minerales de Cu es posible manifestar primariamente a partir del nivel del gasto de ácido, la velocidad de la disolución y el nivel de difusión de las partículas. Por otro lado, es de vital importancia también mencionar sobre la eficiencia del mecanismo presente respecto a la disolución que lo conforma el raro proceso de agrupamiento de las especies dispersadas en la disolución, aunque ha perjudicado constantemente a diversos minerales de oro, siempre cuando hay alguna existencia de especie no inorgánica en la ganga, con una reacción parecida al de carbón activado, de igual manera se ha podido apreciar en diversos compuestos de Cu. De igual manera en diverso caso, hay existencia de diversas acciones en donde la ganga está muy desordenada y elevadamente descompuesta, dando presencia

de una proporción elevada de arcillas en donde existen varias que funcionan con características de cambio iónico, permitiendo una óptima captación del Cu en disoluciones recién disueltas. (Chamorro & Jimenez, 2011)

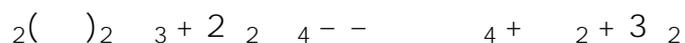
2.2.2. Tipos de lixiviación respecto al Cobre

Lixiviación principal de óxidos y de sulfuros

Transformaciones espontaneas, en menos tiempo, entre un periodo de 17 a 31 días.

Obtención entre 42 y 52 % de Cu en sulfuros y 78% del Cu en óxidos.

Las reacciones más relevantes del mineral oxidado de la malaquita son:



Lixiviación en bateas inundadas

Se denomina también lixiviación por percolación, este mecanismo es empleado para gestionar diversos tipos de minerales oxidados de Cu. Se trata de una organización que posee apariencia de paralelepípedo de hormigón, que este cubierto con resina epóxica, dotado de una base de madera falsa y un filtro, se introduce el mineral llenándolo al tope, la cantidad adecuada que normalmente se usa es de 3/4'' a 1/2'', posteriormente se vierte las disoluciones de lixiviación. Debido a que las bateas son un mecanismo de acción muy enérgico, son adecuadas y óptimas para la lixiviación de minerales que posee una velocidad de solución muy acelerada. El periodo de lixiviación ronda entre el rango de 7 a 13 días.

2.2.3. Precipitación con metales

La cementación es el mecanismo de precipitación de un mineral, así mismo también se sitúa encima del metal introducido.

Efecto de otras reacciones relevantes

En la cementación del Cu a través de hierro normalmente suceden los diferentes tipos de reacciones resumidas que daremos a continuación:

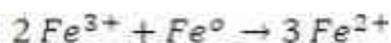
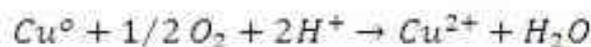
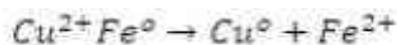


Ilustración 1. Reacciones que ocurren en la cementación del cobre con Hierro

Fuente: (Chamorro & Jimenez, 2011)

2.2.4. Fundamentos de la purificación

Su descomposición en iones de $(\text{SO}_4)^{-2}$ sobre iones de Cu^{+2} y en diferentes tipos de compuestos que son impurezas, así mismo también se encuentra en fase iónica (Fe^{+2}).

Al encontrarse impurezas en fase iónica, es necesario utilizar reactivos como el H_2O_2 y HNO_3 para oxidar iones, asimismo la elaboración de cloruros con el HCl para sedimentar el Fe en Fe^{+3} .

La velocidad de reacciones es un factor muy importante en el factor de purificación.

Aceleración química

La aceleración que también es denominado precipitación es una fase de vital importancia en la mayoría de los mecanismos enfocados en la hidrometalurgia , así mismo también es la fase en donde el mineral es separado de la disolución lixivante a través de un residuo sólido. En conceptos más comunes la precipitación química se origina introduciendo un reactivo, en donde puede ser un gas, o algún otro componente químico, en diversos medios , para que reaccione y libere el mineral de la disolución en base de una aceleración sólida, la precipitación se efectúa a presión ambiente, para que suceda las reacciones de aceleración.

Factores que intervienen en la purgación

Algunas de los factores o variables más relevantes que intervienen dentro del mecanismo de purificación son:

Elemento precipitante

El elemento precipitante NH_4OH es uno de los reactivos de vital importancia, esto se debe a que gracias a él se logra de manera rápida y optima la precipitación de los iones Fe^{3+} en $\text{Fe}(\text{OH})_3$ con cantidad excesiva de reactivo.

Movimiento

De acuerdo con el movimiento o agitación, la forma como se establezca o se disuelva homogéneamente dependerá de una óptima proporción de la distribución de las partículas de Fe en aglomeración en estado líquido. La agitación dentro del reactor es mecánica, por ende, se va a originar un flujo turbulento en dirección horizontal.

Temperatura

El factor temperatura es una de las más principales, la temperatura optima debe estar dentro de un rango de 40 a 70 °C, el incremento de temperatura aumenta de manera favorable una elevada acción de las impurezas brindando una óptima solución de Fe,

sabiendo que la disolución está en medio ácido, la solución se gana mediante el movimiento iónico de impurezas las cuales se incumben con las fuerzas electromotrices.

2.2.5. Electrodeposición

Técnicas empleadas para la electrodeposición

Según Hernández **Fuente especificada no válida.** Algunas técnicas empleadas para los recubrimientos de los metales son: Deposición térmica, deposición química, física de vapor y electrodeposición. La electrodeposición tiene un gran número de ventajas en comparación a los otros métodos, una de ellas es que puede ser utilizada para para el revestimiento o cubrimiento de piezas con grandes dimensiones y así mismo disminuyendo los gastos de operación de este.

La elección de una sustancia y el metal de recubrimiento pueden producirse varias combinaciones posibles, así como el metal-recubrimiento, además de eso se puede emplear otros compuestos, así como polímero, cerámico o material compuesto como la sustancia. Así mismo esta técnica tiene la opción de cambiar la formación del baño electrolítico mediante capas finas, también este método permite tener un control sobre la composición química en aleaciones **Fuente especificada no válida.**

Concepto de electrodeposición

De acuerdo con Hernández **Fuente especificada no válida.** con por medio de la corriente eléctrica continua se genera un revestimiento metálico que es empleado sobre el área de un material. Algunos de los materiales usados en la electrodeposición se muestran a continuación:

Cátodo: Más conocido como electrodo de trabajo es donde se va a presentar la reacción de reducción que en este caso sería:



Ánodo: Material tanto activo como inerte, donde ocurre la reacción de oxidación, generalmente es del mismo material que se desea a depositar siempre y cuando el ánodo sea activo, si fuera inmóvil no sufriría alguna variación durante el mecanismo.

Electrolito: Iones metálicos en una disolución que se desea depositar.

Corriente eléctrica: Flujo eléctrico continuo, normalmente puede ser directa o pulsante.

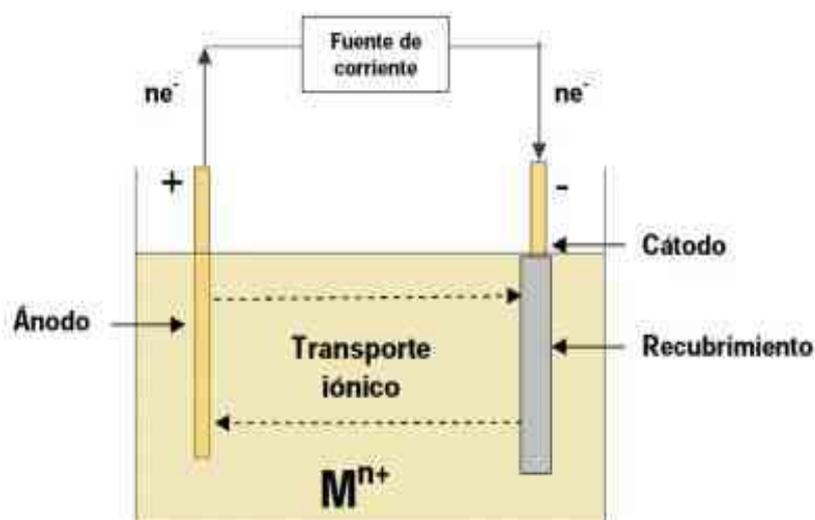


Ilustración 2. Proceso de electrodeposición

2.2.6. Variables del proceso de electrodeposición

Las variables principales y más importantes del proceso de electrodeposición se muestran a continuación:

Temperatura

La rapidez con la que se difunde la molécula, la mezcla del ánodo, la solución del cátodo y del mismo modo la conductividad del electrolito aumenta siempre cuando la temperatura sea mayor. También conocido como disminución de la polarización, la disminución de la resistencia del electrolito al aumentar dicho factor afecta a la disminución de la densidad de corriente continua saliente del electrolito, por lo tanto, sus

no regularidades se desenvuelven con una disminuida velocidad a temperaturas menores. **Fuente especificada no válida..**

Densidad de corriente

El crecimiento de la concentración del flujo eléctrico en cada cuba aumenta su capacidad de producción de recubrimientos. La concentración del flujo eléctrico posee una limitación, esto se debe a que las concentraciones de corrientes demasiado altas generan depósitos quebradizos, bajando la condición de revestimiento, las impurezas son producidas por las bajas intensidades de corriente eléctrica. **Fuente especificada no válida..**

PH

El factor más importante es el pH debido a que este interviene visualmente en la naturaleza, la condición del depósito y la eficiencia de corriente, del mismo modo la baja de este interviene de manera óptima en el flujo eléctrico. Así eliminando que las sales se precipiten y aumentando la liberación de H_2 , en otros casos se le aumenta

A algunos procesos industriales se les añade H_3BO_3 , el que trabaja como buffer y apoya a tener un pH novelado. **Fuente especificada no válida..**

Concentración de iones

La concentración de iones metálicos es hallada por la relación masa/volumen de la proporción de sales, grado de ionización, en función a la temperatura, por el apareamiento o disminución de iones de la electrodeposición que puede provocar u ocasionar iones estructurados. El aumento de iones ocasiona una variación sobre la relación más/volumen del metal, para ser más precisos en las mezclas concentradas, a través de una se encuentra limitada de disolubilidad de sales que se introducen. **Fuente especificada no válida..**

Proporción de Cu en el electrolito

El porcentaje respecto a la cantidad de Cu en el electrolito comúnmente posee entre 36 y 41 g/l de Cu^{2+} , lo cual no se puede alcanzar el límite de proporción en un régimen menor a 29 30 g/l puede ocasionar el apareamiento de pequeños cristales de Cu dentro del conducto donde se realiza el proceso y del mismo modo la inactividad del ánodo.

Proporción de H_2SO_4

El porcentaje de H_2SO_4 dentro del electro adquirido de Cu debe estar dentro de un estándar de 140 y 170 g/l . No obstante, si la relación masa/volumen supera los 170 g/l, se presentará una corrosión en mayor proporción , por lo que es de vital importancia aumentar el líquido del electrolito.

En el hipotético caso de tener una proporción menor a 140 g/l el cobre adquirido será de material blando y tedioso de desmontar. Así mismo también se disminuye la conductividad del electrolítico y por ende se incrementa el gasto eléctrico.

2.2.7. Administración de reactivos

De acuerdo con las vegetaciones de electro obtención de Cu se utilizan reactivo que permiten remover de manera eficiente los acopios densos de Cu, utilizando un disminuido nivel de acareo de impurezas.

Proporción de cloruros (Cl^-)

La proporción de Cloruros debe ser menor que 32 ppm, esto se debe a que si es más elevado que 32 ppm es de vital importancia analizar los niveles de cloruros dentro de los electrolitos. Respecto a la proporción existe el aumento de picadura en los catodos inoxidables, lo cual provoca problemas respecto al deslaminado. Así mismo se ven en desventajas y es perjudicial para el depósito y la dirección de los cristales de Cu

almacenado , lo cual ocasiona un granulo mucho más grande, y un incremento de nivel en impurezas en el depósito.

Proporción de disolvente orgánico

Es importante brindar una óptima proporción de disolvente orgánico o en algunos casos máximo a 5 ppm de disolvente no inorgánico, La apariencia del electrolito puede perjudicar de manera grave a la colocación del recipiente de los cristales de Cu, por ende, este da como resultado un sedimento quebrado con una proporción mayor de impurezas.

El compuesto no inorgánico se aglutina a las láminas de acero y como consecuencia de eso da una quemadura no orgánica que ocasiona una deposición de Cu de menor pureza.

Proporción de hierro

La proporción de Fe debe ser de no menor de 0.5 g/l y no mayor a 2.6 g/l, la proporción también va a depender el Fe trasladado en la fase de obtención por disolvente. Mientras mayor sea la proporción de Fe en el electrolito baja de manera directa la eficiencia del voltaje y por ende aumenta la calidad del cátodo. No obstante, si el cátodo empleado en la electrodeposición es de menor calidad el Fe es atrapado y por ende provocara un incremento de impurezas de depósito.

Procedimiento del mecanismo de electro extracción de Cu

- a) Primeramente, se sumerge un cátodo inerte, posteriormente un ánodo que permita conducir la electricidad dentro de la disolución de CuSO_4 que posee ($\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ electrolito).
- b) Emplear un flujo de potencial tanto en los ánodos como en los cátodos.
- c) Revestimiento de cobre metálico en la superficie de los cátodos.

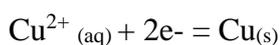
El material de los cátodos es de acero o de hojas de arranque de Cu. El Cu es el compuesto obtenido en ambos cátodos por un periodo aproximado de 7 días,

posteriormente se efectúa la cosecha, mientras que en simultaneo el agua se dispersa dando iones de H₂ y O₂ en el ánodo.

Mecanismo de reacción de electro obtención

A través del mecanismo de electro obtención de Cu, originan el siguiente mecanismo en los electrodos.

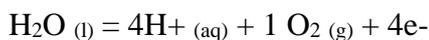
Cátodo:



$$G^{\circ}_{298} = -64,410 \text{ J}; E^{\circ}_{\text{e}} = +0.334 \text{ V}$$

Se observa que los iones de (Cu²⁺) son destacadamente liberados porque los iones de H⁺ que también se encuentran visibles dentro de la disolución ya que son mucho más electropositivos a los iones de Cu²⁺.

Mecanismo provocado en el ánodo.



$$G^{\circ}_{298} = 235,038 \text{ J}; E^{\circ}_{\text{e}} = -1.230 \text{ V}$$

Por ende, quedaría:

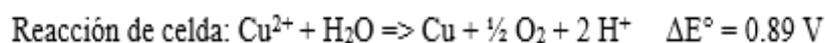
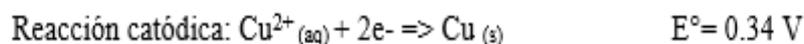
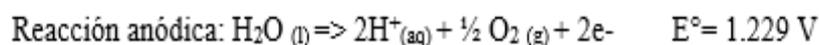


Ilustración 3. Mecanismo anódica y catódica

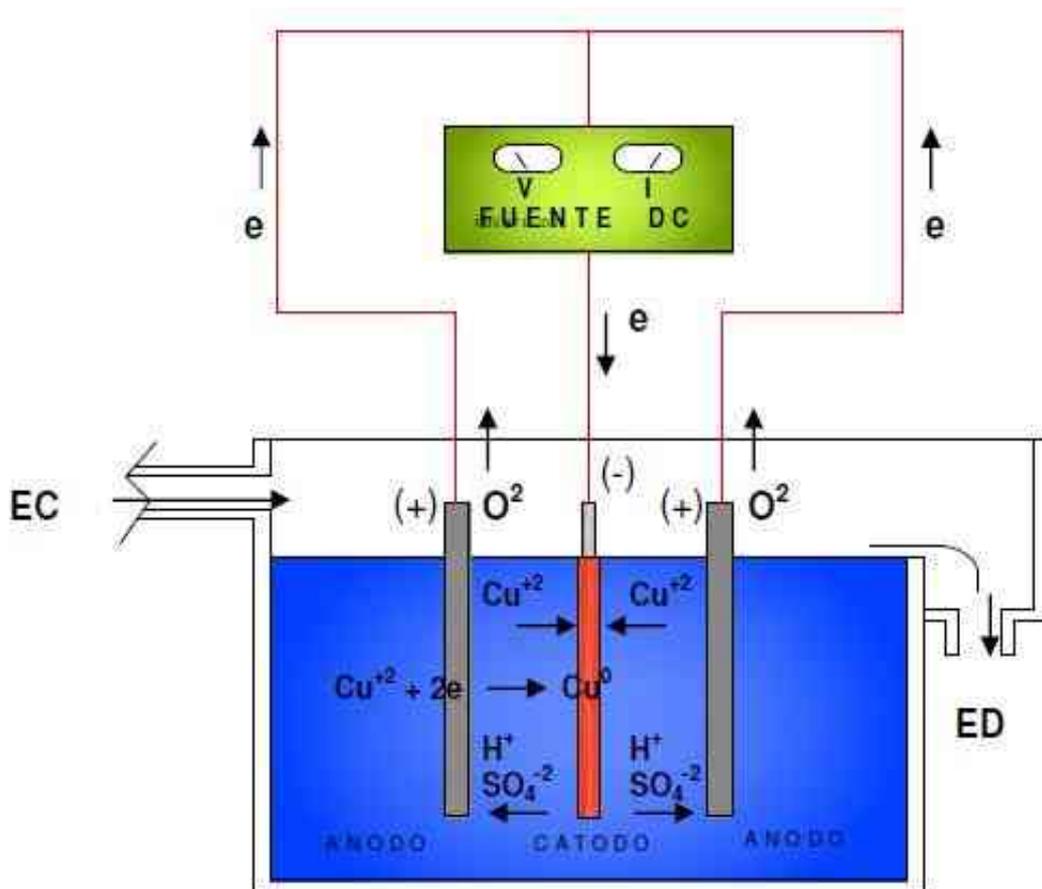


Ilustración 4. Proceso de electro obtención de cobre.

El mecanismo de electrodeposición de Cu (EW), es realizada en una cuba electrolítica, en donde se puede observar el paso continuo del electrolito cuyos componentes son CuSO_4 y H_2SO_4 que son obtenidas de la planta de obtención por disolventes. En la cuba suceden diversos tipos de reacciones electroquímicas las cuales son de oxidación y reducción ocasionada a través del flujo de corriente eléctrica.

El compuesto que posee ion cúprico es disminuido a Cu metálico alrededor del cátodo provocado por los electrones emitidos a través del flujo eléctrico y regresan de manera inmediata al electrodo que posee una polaridad negativa.

La desintegración de las moléculas del agua es ocasionada del mismo modo en el ánodo a través del déficit de electrones, provocando oxígeno en estado gaseoso que bulle en la superficie del ánodo aparte del H_2SO_4 , esto es provocado a la oxidación de los

aniones de sulfato porque el flujo potencial del electrodo respecto a su oxidación es elevado respecto a la desintegración del agua. (-1,229 V).

La algebra anódica mostrada con anterioridad es denominada la ecuación de la evolución de oxígeno dentro del mecanismo (REA). Por ende , el mecanismo de evolución de O₂ es una reacción de electrodo en donde el O₂ es ocasionado dentro del ánodo de una cuba electrolítica a partir de la descomposición u oxidación de (OH⁻) o por la oxidación del agua dentro de la disolución.

Dando un breve énfasis respecto a los datos obtenidos en el mecanismo electrolítico:

Degradación del Cu en el cátodo.

Desarrollo del O₂ en el ánodo

El electrolito ennoblecce en ácido y se debilita en Cu.

Mecanismo General en la cuba.



Mencionada molecularmente.

Finalmente, como dato obtenido luego de la estequiometria, indica que por cada

TM de Cu introducida en los cátodos:

Se obtiene:

1 T Cu metálico

1.54 T H₂SO₄

0.25 T O₂ (5.6 Nm³)

Se desintegran:

0.28 T H₂O

Se gasta: 1800 - 2400 kw/h

El compuesto electrolítico es una mezcla de medio ácido de CuSO_4 que posee entre 35 y 45 g/l de Cu^{2+} y 129 a 159 g/l de H_2SO_4 ; el nivel promedio de temperatura de operación es de 39°C . En el mecanismo de EW, otros compuestos llamados aditivos (CoSO_4 y guar) se añaden directamente al electrolito, esto va a servir como una mejor opción de los resultados dentro del mecanismo de electrodeposición.

El flujo de corriente eléctrica se establece dentro de un rango de 249 y 299 A/m^2 , con la finalidad de obtener una producción óptima y alta que sea compatible con una excelente condición del depósito.

Respecto a la cuba, los cátodos de acero cuyas dimensiones son de 1 m^2 se establecen alrededor de dos ánodos cuya composición son de plomo y están dentro de un periodo de 5 -8 días expuestos al cobre en ambos lados, consiguiendo una cosecha de 46 a 56 kg de cobre por lado. Los cátodos utilizados seguidamente se someten a mecanismos de lavado y despliegue, para posteriormente volver a ser empleados en la cuba eléctrica.

2.2.8. Productos del electro extracción

En breve se indica un énfasis de productos obtenidos después del proceso de electro extracción:

- a) Cu metálico depositado en el cátodo ; con un régimen de 21 ppm de contaminantes no deseables.
- b) O_2 en fase gaseosa en los lados del ánodo.
- c) Recuperación del H_2SO_4 en la mezcla.

El Cu metálico obtenido es sacado de forma mecánica de los cátodos, la hoja de arranque es limpiada, en simultáneo se vuelve a circular el ácido para el mecanismo de lixiviación.

Eliminación de niebla provocada por el ácido

La niebla acida es originada cuando el O_2 se libera y se prende en el ánodo por medio de la descarga en la fase de los electrolitos, provocando de manera peligrosa una niebla de H_2SO_4 . En la gran mayoría de plantas dedicadas al electro obtención emplean esferas de polietileno con un diámetro aproximado de 2cm, que normalmente flotan sobre el electrolito a una elevación de 6 a 11 cm. Mecanismos que actúan de forma mecánica en la eliminación de nieblas poseen cepillos de polímero cerca de los lados del ánodo, por otro lado, otras plantas emplean sopladores cuya finalidad es disminuir de manera proporcionar la niebla de ácido provocada u originada en el proceso.

Eficacia del cátodo sobre el Cu adquirido

Es la etapa final del mecanismo hidrometalúrgico respecto a la extracción de Cu (EW); la principal meta es conseguir cátodos de Cu que contengan un alto porcentaje de pureza cuya finalidad es aumentar de manera adecuada los datos económicos de ventas del producto.

Algunos mecanismos como los LX/SX/EW ha logrado una elevada producción de Cu con una óptima pureza en condiciones ideales o similares al Cu refinado a través de electricidad. El cátodo posee una pureza de 99.97%. Por lo tanto, en la mayoría de las reacciones de electro obtención las impurezas ocasionadas no deseables son:

- a) La primera impureza no deseable es el Plomo el cual se sitúa en el ánodo por medio de corrosión de 2 o 3 ppm.
- b) La segunda impureza es el azufre que del mismo modo se genera por la producción de la corrosión de 5 o 6 ppm
- c) El tercero es el Fe a partir de la captura de electrolitos de 2 o 3 ppm.

Así mismo también aparte de las impurezas se generan otros compuestos de poca tolerancia:

Arsénico (As),

Selenio (Se),

Bismuto (Bi)

Antimonio (Sb).

El grado de estas impurezas ubicadas en los lados de los cátodos, influencia de manera significativa por el mecanismo empleado en las diversas plantas de electro obtención.

La calidad que presenta los cátodos está en función a la característica física o apariencia visual en el depósito, desarrollándose en el uso operacional, que una superficie con características densas y coherentes, indica o muestra mejores propiedades químicas que una superficie que presenta propiedades rugosas y porosas. Lo que en realidad sucede es que en el caso 1, la mezcla posee iones sulfatados y del mismo modo también partículas de Pb, no queda atorada en los intrínsecos del depósito.

Por ende, debe tenerse en cuenta la pureza del cátodo teniendo en cuenta :

- a) Las placas de electrodos deben tener una característica recta, vertical y mantener una distancia prudente sin la necesidad de tocarse.
- b) Una exhaustiva limpieza de los depositados de Cu.
- c) Constante expulsión de productos de corrosión tanto en el ánodo como los generados en la parte debajo de las cubas de electro extracción.
- d) Tener la proporción de Fe en el electrolito de 2.2 2 Kg /m³ con la finalidad de disminuir el Fe en Cu catódico.

Consecuencias de la proporción de Cu en el electrolito

No obstante, a disminuidas proporciones de electrolito provocan una difusión bien lenta, por lo que el mecanismo de deposición es llevado por la adhesión de las moléculas de mayor tamaño encima de la placa electrolítica, así como se aprecia en breve:

Tabla 1. *Calidad de cobre electro obtenido respecto al Contenido de Cobre y la Densidad de Corriente.*

Cu (gpl)	Densidad aparente grano Cu, gr/cc	Análisis Tamaño partícula, %	
		<74 micras	< 44 micras
5	0.420	82.3	62.4
10	0.663	68.2	33.9
20	0.776	66.9	32.8
30	1.060	59.0	25.1
40	2.040	47.7	21.0
45	2.440	29.2	11.8

Fuente: Modi and Tenodlkar, 1953

De acuerdo con los datos indican que de un producto de cobre expuesto a un electrolito de baja relación masa/volumen de Cu posee una imagen visual granuliento y de igual manera se ve la división de los diversos cristales originados en la superficie del cátodo, en el hipotético caso de que un electrolito posea una alta relación de masa/volumen se puede apreciar que la resistencia de los cristales de Cu adquiridos es superior y que el área de este es mucho más lisa. La división de los cristales de Cu está relacionada proporcionalmente con la rapidez con la que se cristaliza o del mismo modo con la conversión del Cu iónico, los espacios se ocupan con facilidad por el compuesto electrolito remanente, de esa manera se llenan todas las cavernosidades visuales en el área y del mismo modo sucede en el interior del Cu introducido.

De esa manera las impurezas que están en los lados del cátodo de Cu se relacionan así mismo con la probabilidad de que el electrolito se aferre, aumentando de manera adecuada los grados de S ; Fe y pb comprendido. La manipulación total del mecanismo de electro obtención se enfoca en conservar la densidad de 34 a 41 g/l de Cu en el electrolito débil.

Si el Cu se coloca dentro de un valor menor a lo mencionado , la utilidad de los iones de Cu^+ en el área superior de los cátodos baja considerablemente, por lo tanto, generaría una eficiencia de corriente eléctrica baja.

Esto ocasiona un mayor grupo de depósitos de Cu. El manejo adecuado del Cu dentro del electrolito es también de vital importancia para advertir la cristalización de CuSO_4 por todo el mecanismo.

Consecuencia de la relación masa/volumen respecto a la calidad del Cu

El porcentaje de electro obtención respecto al cobre van en aumento respecto al flujo eléctrico. No obstante, el aumento o el sobrante de flujo eléctrico brinda depósitos de Cu , por ende, baja el porcentaje de pureza del cobre adquirido, este mecanismo es denominado estriación. Por ende, cada fabrica se enfoca en el adecuado análisis de flujo eléctrico manteniendo las consideraciones mencionadas con anterioridad.

A disminuidas proporciones, la velocidad del cambio iónico es menor, no obstante, la rapidez con la que se forma el cristal es mayor, en caso contrario perjudica las condiciones del depósito , la cual se observa en breve:

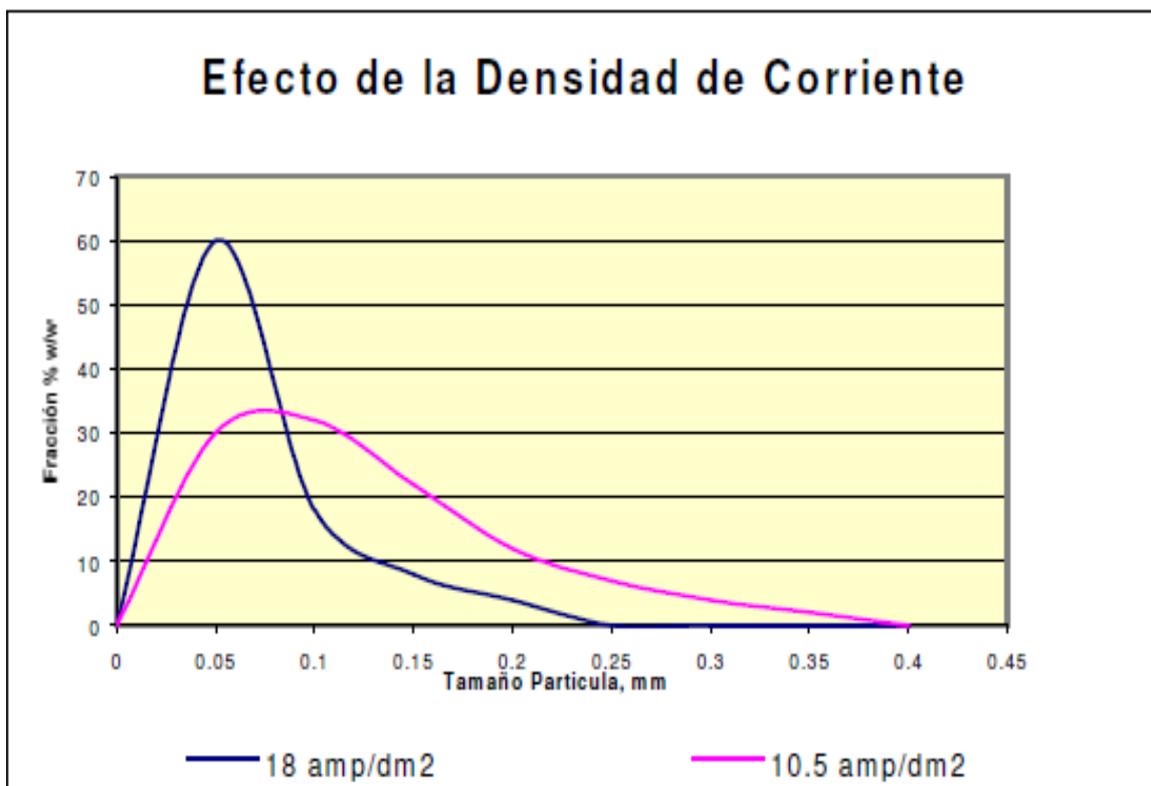


Ilustración 5. Imagen representativa en función a la densidad de corriente

Fuente: Fathi Habashi, 1962.

La ordenación del flujo de corriente para cada electrodo y en el área superficial es un factor principal, del mismo modo las desigualdades del contacto barra – electrodo, la separación de electrodos , la posición de ellos, comúnmente provocan que los datos del flujo de corriente oscilen en un rango de 19 a 21% de la densidad de flujo eléctrico medio. Por este facto es de vital importancia el análisis y revisión del revestimiento de la película de Cu en la barra de los cátodos, debido a que presentan una importancia ya que se debe requerir un equilibrio de barras con desgastes de forma similar a la del flujo eléctrico para su distribución uniforme.

Es lógico deducir que los datos más elevados de la relación entre masa/volumen del flujo eléctrico iniciarían un depósito más frágil, lo cual es provocado por la partícula, ya que sus dimensiones son más finas.

La media de estriación con la relación masa/volumen del flujo eléctrico afirma la óptima relación que existe entre ambos.

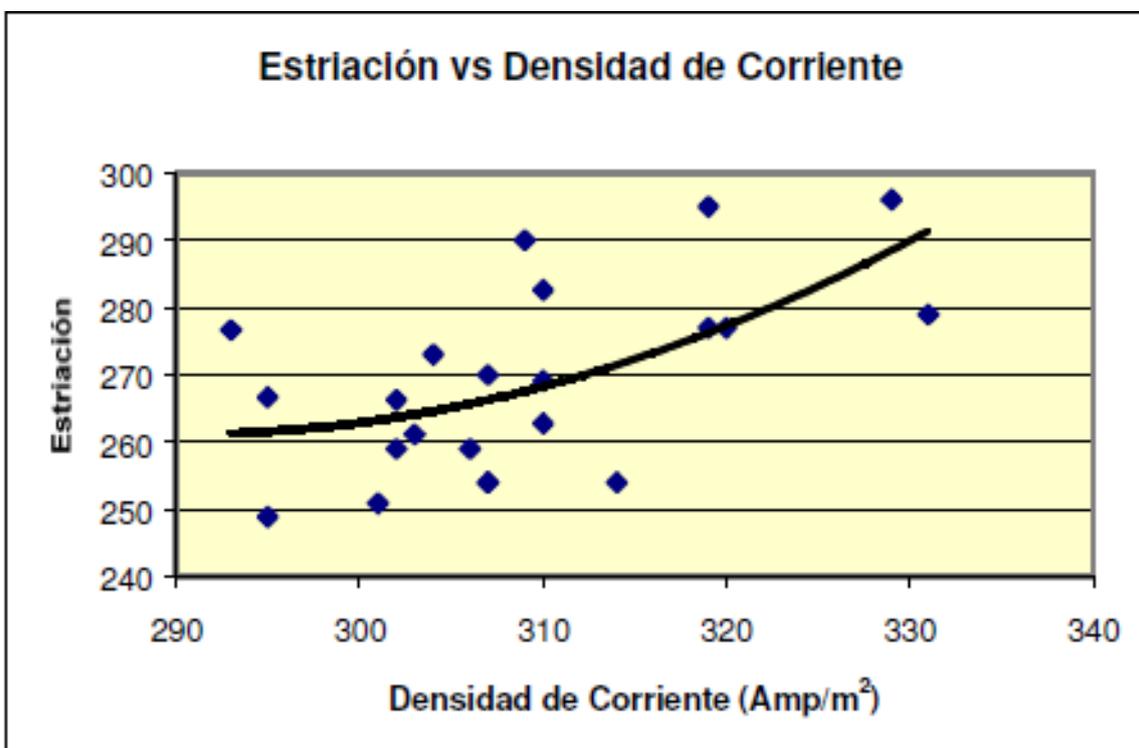


Ilustración 6. Imagen de la Estriación vs. Masa/volumen del flujo eléctrico.

2.2.9. Cantidad de cobre electro obtenido

Respecto al postulado de Faraday la cual indica que la proporción teórica del metal introducido es proporcional a un gramo de Cu si 96500 C (26.8 Ah) de flujo eléctrico es transferido.

No obstante, en lo empírico, la proporción real de flujo eléctrico que es necesario es aún mayor al teórico, esto se debe a las disminuciones de flujo eléctrico lo cual es provocado por:

Mala manipulación respecto a la repartición del electrolito.

Conexiones no optimas.

Escapes dentro de un circuito

Algún corto del electrodo a través del aumento del Cu mediante el mecanismo de deposición.

La proporción respecto al dato teórico y real del flujo eléctrico empleado es conocido como la eficiencia real. La eficiencia real es posible calcularla a través de la masa ganada por el cátodo, a continuación, se observa la ecuación que lo rige:

$$\varepsilon_e (I) = \frac{n F \Delta W}{I t M}$$

En el cual:

: eficiencia del flujo eléctrico

W: masa ganada

F: invariable de Faraday

I: corriente trabajadora

M: masa atómica del Cu.

t: tiempo

n: # de electrones

Otro factor de vital importancia para el cálculo es también el gasto de energía el cual puede describirse de la siguiente forma:

$$\text{Consumo de energía} = \frac{-n F E_{cell} 10^{-3}}{3.6 \varepsilon_e M}$$

En el cual:

n: # de electrones

M: masa molecular

E_{cell}: voltaje de celda

e: eficiencia del flujo eléctrico

F: invariable de Faraday

Finalmente, la eficiencia de energía dentro de una cuba se puede expresar por el siguiente postulado:

$$\text{Eficiencia de energía} = \frac{\text{Voltaje reversible de descomposición}}{\text{Voltaje aplicado}} \cdot \text{Eficiencia de corriente (\%)}$$

2.3. Definiciones Conceptuales

Adsorbato.

Son compuesto que presentan la propiedad de ser absorbida por un mineral adsorbente.

Adsorber.

Aspirar y estancan en el área de un compuesto algún tipo de ion de otro cuerpo diferente.

Adsorción.

Atracción de unos diversos finos de moléculas, tanto en estado líquido como gas, al área superficial del sólido.

Aglomeración.

Acumulación de partículas a través del mecanismo de adicción de componente llamados aglomerados.

Alta calidad.

Compuesto con una elevada pureza. Normalmente se refiere al área de la minería con el fin de seleccionar un óptimo mineral respecto a otros.

Análisis.

Estudio y ensayo a la cual es llevada una pequeña proporción de minerales con el fin de encontrar la proporción útil de dicho compuesto.

Ánodo.

Residuo obtenido luego de una fundición que ingresa al mecanismo de refinación como polo positivo dentro de una cuba electrolítica.

Atacar.

Agredir de manera rápida sobre la superficie de cualquier mineral con diversos reactivos tanto químicos como biológico con el fin de adquirir algún compuesto de la disolución.

Carbón.

Es un mineral no inorgánico formado principalmente de carbono. La producción es el fruto de la condensación de los compuestos de plantas descompuestas.

Cátodo.

Parte contraria del ánodo que también es utilizada en una cuba electrolítica con un polo negativo.

Celda.

Es una célula de forma cuadrada, rectangular o cilíndrica en donde se realizan diversos procesos con la finalidad de recuperar metales.

Columna de carbón.

Pilastra llena con un compuesto denominado carbón activo en estado granular que tiene como principal función adsorber diversas moléculas.

Descarga.

Denominado de igual manera desorción tanto de minerales como el Au y Ag respecto al carbón en una disolución más proporcionada.

Desorción (o desadsorción).

Es un mecanismo en donde las moléculas adsorbidas se desprenden del área del compuesto adsorbente.

Sulfuros.

Son sustancias que poseen dentro de sus mecanismos átomos de S y lo conforman una gran variedad de minerales sulfurosos como por ejemplo la pirita y galena entre otros.

Tasa o índice de carga.

Es el aforo límite de adsorción que presenta el compuesto del carbón activo dentro de los diversos mecanismos de trabajo

Es la capacidad máxima de adsorción de un carbón activo en las condiciones de trabajo y en el rango de los límites de eficiencias dadas y proyectadas dentro del proyecto.

2.4. Formulación de la Hipótesis

2.4.1. Hipótesis General

Es posible recuperar el cobre a partir de soluciones lixiviadas mediante el método de electrodeposición

2.4.2. Hipótesis específicas

Es posible evaluar el efecto del Sulfato de cobre en el proceso de electrodeposición del cobre en medio acuoso

Se puede obtener una línea de producción a escala de laboratorio para la recuperación de cobre

CAPITULO III : METODOLOGÍA

3.1. Diseño

Localmente el sector de estudio se va a ubicar en la UNJFSC localizada en el distrito de Huaura, provincia de Huacho. La parte empírica será llevada en los recintos de la misma universidad.

3.2 Tipo

El tipo de indagación es cuantitativa, esto es debido a que nos vamos a enfocar en la existencia de la relación-causa de ambas variables, la primera que es Recuperación de cobre y la segunda que es procesos de electrodeposición , más adelante se detallara de manera precisa sus indicadores y dimensiones.

3.3.Nivel

Respecto al nivel, esta indagación presenta un nivel descriptivo- explicativo.

3.4.Diseño

El diseño para la recuperación del cobre consta de la siguiente manera:

Preparación de la cuba y del relave a electrolizar

Preparación de los electrodos tanto el ánodo como cátodo

Preparación del electrolito en este caso será sulfato de cobre

Obtención del cobre

3.5.Población y Muestra

3.5.1. Población

La población está compuesta por los lixiviados tomados de las pruebas experimentales que se realizan en el laboratorio del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Materiales de la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica.

3.5.2. Muestra

Las muestras fueron recogidas de los ensayos que se realizan durante la lixiviación de muestras de minerales de cobre. Para los ensayos se emplearon 5 litros de soluciones.

3.6. Operacionalización de las variables

Variable Dependiente: Recuperación de cobre

Variable Independiente: Método de electrodeposición

Tabla 2. *Operacionalización de la variable*

Variables	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Recuperación de cobre	La lixiviación es un mecanismo hidrometalúrgico en donde se ocasiona la mezcla de un compuesto que posee minerales para recuperar a través de diversas etapas el porcentaje de pureza mayor. Comúnmente se emplea H ₂ SO ₄ cuando se lixiviaría el Cu.	Volumen de solución lixiviada Composición química del electrolito	mL g/L
Electrodeposición	La mezcla de Cu, concentrada y limpia se transfiere a las cubas de electrodeposición, en donde el compuesto a extraer que es el cobre se coloca sobre los cátodos de acero.	Tiempo Potencial eléctrico Densidad de electrodos	Minutos Voltios A/m ²

Fuente: Elaboración propia

3.7. Técnicas de recolección de datos

3.7.1. Técnicas a emplear

Respecto a la recolección de datos se emplearon diversas técnicas adecuándose a los parámetros necesarios del investigados los cuales fueron:

Información primaria (artículos , revistas)

Información secundaria (tesis , videos)

Diagramas de flujos

Termómetro

Multímetro

PH metro .

3.7.2. Técnicas para el procesamiento de información

Respecto al procesamiento de información se emplearon diversos programas de office , para la manipulación de datos en Excel , información complementaria Word, proyección del tiempo empleado Project, entre otros programas que fueron importantes para el procesamiento de datos durante la investigación.

3.8. Procedimiento experimental

La parte experimental se llevó a cabo en la cuba electroquímica, que estaba constituida por dos ánodos y un cátodo y las muestras de soluciones lixiviadas del laboratorio experimental. Para la recuperación de cobre se harán pruebas en donde se tomaron las siguientes restricciones para el diseño factorial:

Tiempo: 2 y 3 horas

potenciales eléctricos: 1,5 y 1,8 V

Distancia de electrodos: 1 y 2 cm

3.8.1. Equipos, materiales reactivos.

Equipos.

- a. Fuente corriente continua.** La fuente de corriente continua es más que todo un rectificador que nos permitirá cambiar el voltaje dependiendo del usuario.

Flujo eléctrico de salida: 17 A

Potencia Máxima: 60 W

Eficiencia: 92%

- b. Cuba electrolítica:** La cuba empleada en la parte empírica es de un material vidrioso, el volumen aproximado es de 1300 ml en donde se han colocado dos huecos de cobre para el sostén de los electrodos, que estarán unidos a los terminales de conexión.
- c. Multímetro:** El multímetro para la parte empírica es digital /manual con un aproximado de 30 rangos, posee un flujo de corriente de 12 A.
- d. Electrodo de electrodeposición. (ÁNODO – CÁTODO)**

Dimensiones: 6 cm x 4 cm

Espesor: 1 mm

Dimensiones: en las pruebas de electrodeposición de cobre se emplearon cátodos de medida: 6 cm x 4 cm

Espesor 0,5 mm



*Ilustración 7.*Equipos del proceso de electrodeposición

a. Materiales.

Vasos precipitados.

Probeta.

Bureta.

Pipeta.

Matraz

b. Reactivos

Ácido cítrico.

Tiosulfato de sodio.

Hidróxido de amonio.

Yoduro de potasio.

Ácido acético.

Almidón.

Características de la solución electrolítica

Para la electrodeposición de cobre se utilizaron soluciones de cobre lixiviadas con las siguientes características:

Concentración (g/L): 8,1509

Densidad (g/cm³): 1,019

Porcentaje (%): 0,815

pH: 1

3.8.2. Diseño y condiciones para el experimento.

Diseño de ánodos y cátodos.

El ánodo y cátodo tienen las siguientes dimensiones.

Tabla 3. Dimensiones de cátodo y ánodo .

Dimensiones	Ánodo	Cátodo
Ancho (cm)	4	4
Largo (cm)	6	6
Área (m ²)	0,0024	0,0024
Espesor (mm)	1	0,5
Área de contacto con el electrolito (m ²)	0,0020	0,0020

Fuente: Elaboración propia

Cada prueba tendrá 1 cátodo y dos ánodos como se aprecia en la siguiente figura.



Ilustración 8. Configuración de la celda electrolítica.

3.9. Procedimiento de trabajo

Para empezar con la electrodeposición es de vital importancia instalar la cuba con un cátodo y dos ánodos.

La alimentación es de 500 ml de CuSO_4 a la cuba. posteriormente se sumista flujo eléctrico para tratar las muestras.

En el tiempo que se desarrollan las muestras se posee un estricto control respecto a la operación, cuya finalidad es evitar algún tipo de inconveniente como por ejemplo alguno corto durante la operación.

Luego de un tiempo los cátodos adquieren una mayor masa y se pasa a cosecharlos, por ende, se debe retirar el flujo eléctrico.

Finalmente, los cátodos son pesados y la proporción depositada en ambos se determinará a partir de la diferencia con la masa inicial.

Prueba 1

Tabla 4. *Estándares de labor respecto a la prueba 1*

Concentración de Cu (g/L)	8,1509
Temperatura (°C)	25
Peso de cátodo inicial	9,6267
Intensidad de corriente (Amp)	0,24
Densidad de corriente (Amp/m ²)	120
Volumen (L)	0,5
Potencial eléctrico (V)	1,5
Tiempo de electrodeposición (minutos)	120
pH	1
Distancia de electrodos (cm)	1

Área catódica en contacto con el electrolito (m ²)	Largo: 5 cm	0.0020 m ²
	Ancho: 4 cm	

Fuente: Elaboración propia

Prueba 2

Tabla 5. *Estándares de labor respecto a la prueba 2*

Concentración de Cu (g/L)	8,1509	
Temperatura (°C)	25	
Peso de cátodo inicial	9,4856	
Intensidad de corriente (Amp)	0,24	
Densidad de corriente (Amp/m ²)	120	
Volumen (L)	0,5	
Potencial eléctrico (V)	1,5	
Tiempo de electrodeposición (minutos)	120	
pH	1	
Distancia de electrodos (cm)	2	
Área catódica en contacto con el electrolito (m ²)	Largo: 5 cm	0.0020 m ²
	Ancho: 4 cm	

Fuente: Elaboración propia

Prueba 3

Tabla 6. *Estándares de labor respecto a la prueba 3*

Concentración de Cu (g/L)	8,1509	
Temperatura (°C)	25	
Peso de cátodo inicial	9,1175	

Intensidad de corriente (Amp)	0,32	
Densidad de corriente (Amp/m ²)	160	
Volumen (L)	0,5	
Potencial eléctrico (V)	1,8	
Tiempo de electrodeposición (minutos)	120	
pH	1	
Distancia de electrodos (cm)	1	
Área catódica en contacto con el electrolito (m ²)	Largo: 5 cm	0.0020 m ²
	Ancho: 4 cm	

Fuente: Elaboración propia

Prueba 4

Tabla 7. *Estándares de labor respecto a la prueba*

Concentración de Cu (g/L)	8,1509	
Temperatura (°C)	25	
Peso de cátodo inicial	9,285	
Intensidad de corriente (Amp)	0,32	
Densidad de corriente (Amp/m ²)	160	
Volumen (L)	0,5	
Potencial eléctrico (V)	1,8	
Tiempo de electrodeposición (minutos)	120	
pH	1	
Distancia de electrodos (cm)	2	
Área catódica en contacto con el electrolito (m ²)	Largo: 5 cm	0.0020 m ²
	Ancho: 4 cm	

Fuente: Elaboración propia

Prueba 5

Tabla 8. *Estándares de labor respecto a la prueba*

Concentración de Cu (g/L)	8,1509	
Temperatura (°C)	25	
Peso de cátodo inicial	7,8008	
Intensidad de corriente (Amp)	0,24	
Densidad de corriente (Amp/m ²)	120	
Volumen (L)	0,5	
Potencial eléctrico (V)	1,5	
Tiempo de electrodeposición (minutos)	180	
pH	1	
Distancia de electrodos (cm)	1	
Área catódica en contacto con el electrolito (m ²)	Largo: 5 cm	0.0020 m ²
	Ancho: 4 cm	

Fuente: Elaboración propia

Prueba 6

Tabla 9. *Estándares de labor respecto a la prueba*

Concentración de Cu (g/L)	8,1509
Temperatura (°C)	25
Peso de cátodo inicial	9,1557
Intensidad de corriente (Amp)	0,24
Densidad de corriente (Amp/m ²)	120

Volumen (L)	0,5	
Potencial eléctrico (V)	1,5	
Tiempo de electrodeposición (minutos)	180	
pH	1	
Distancia de electrodos (cm)	2	
Área catódica en contacto con el electrolito (m ²)	Largo: 5 cm	0.0020 m ²
	Ancho: 4 cm	

Fuente: Elaboración propia

Prueba 7Tabla 10. *Estándares de labor respecto a la prueba*

Concentración de Cu (g/L)	8,1509	
Temperatura (°C)	25	
Peso de cátodo inicial	9,2551	
Intensidad de corriente (Amp)	0,32	
Densidad de corriente (Amp/m ²)	160	
Volumen (L)	0,5	
Potencial eléctrico (V)	1,8	
Tiempo de electrodeposición (minutos)	180	
pH	1	
Distancia de electrodos (cm)	1	
Área catódica en contacto con el electrolito (m ²)	Largo: 5 cm	0.0020 m ²
	Ancho: 4 cm	

Fuente: Elaboración propia

Prueba 8Tabla 11. *Estándares de labor respecto a la prueba*

Concentración de Cu (g/L)	8,1509
Temperatura (°C)	25
Peso de cátodo inicial	9,2083
Intensidad de corriente (Amp)	0,32

Densidad de corriente (Amp/m ²)	160	
Volumen (L)	0,5	
Potencial eléctrico (V)	1,8	
Tiempo de electrodeposición (minutos)	180	
pH	1	
Distancia de electrodos (cm)	2	
Área catódica en contacto con el electrolito (m ²)	Largo: 5 cm	0.0020 m ²
	Ancho: 4 cm	

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV: RESULTADOS

4.1.Resultados de las pruebas

Los resultados de la recuperación de cobre se aprecian en la siguiente tabla, en donde se recuperó gran cantidad de cobre en un mayor tiempo.

Tabla 12. *Cobre recuperado*

Tiempo (h)	Potencial eléctrico (v)	Distancia de electrodos (cm)	Recuperación de cobre (g)	
			1ra corrida	2da corrida
2	1,5	1	0,0612	0,0597
		2	0,0571	0,0552
	1,8	1	0,0936	0,1024
		2	0,0663	0,0738
3	1,5	1	0,2241	0,2452
		2	0,1602	0,1587
	1,8	1	0,2329	0,2256
		2	0,1715	0,1623
Total de cobre recuperado (g)			1,0669	1,0829

Fuente: Elaboración propia

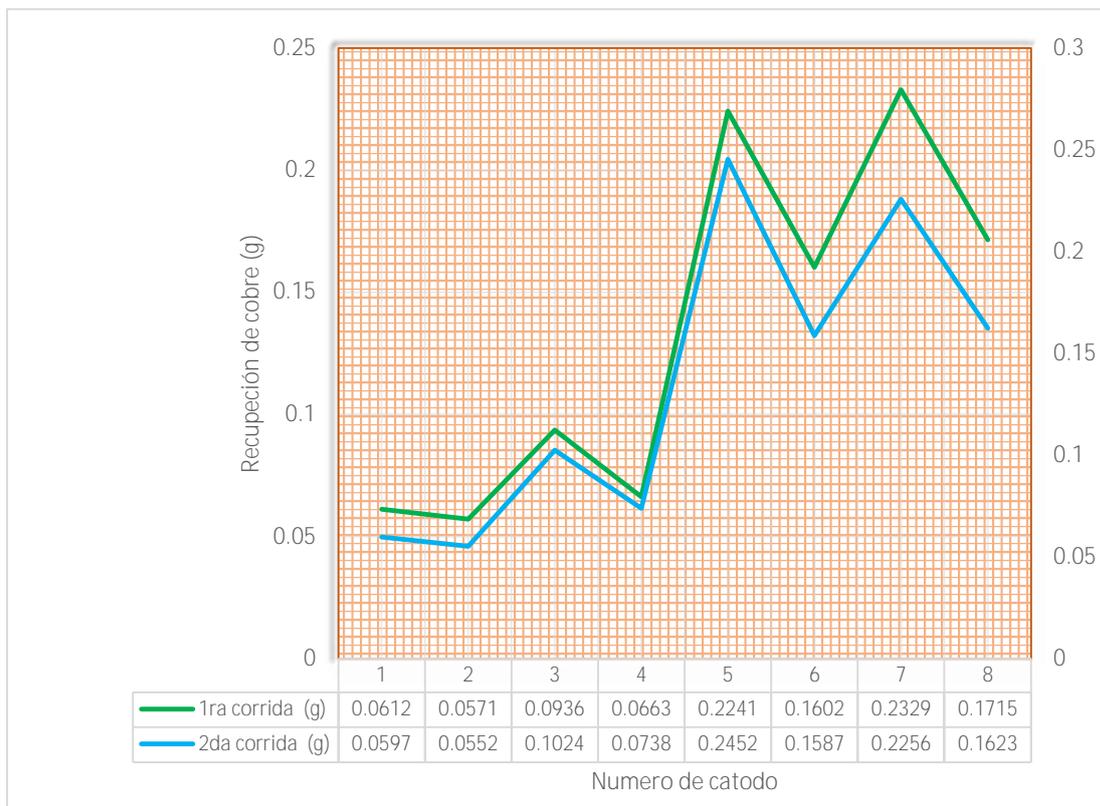


Ilustración 9. Cobre recuperado en cada cátodo

CAPITULO V: DISCUSIÓN, CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

5.1.Discusión

El presente trabajo de investigación se decidió trabajar con un potencial eléctrico de 1,5 y 1,8 V, ya que al ser mayor existe la formación de óxido de cobre en la superficie del cátodo y la intensidad de corriente tiende a disminuir y la separación de electrodos entre 1 y 2 cm. Según Chamorro y Jimenez (2011), en su investigación trabajaron con un potencial eléctrico de 2,5 V y separación de 1 cm, logrando recuperar el 99,596 % de cobre y de acuerdo a Soto y Solís (2012) en su tesis, trabajaron con un potencial eléctrico de 2,03 V y una separación de electrodos de 41 mm, logrando una recuperación de cobre de 99,97 %.

5.2. Conclusión

Se logró desarrollar una línea de producción a escala de laboratorio para la recuperación de cobre mediante la electrodeposición en donde se trabajó con un volumen de 0,5 litro de sulfato de cobre, una concentración de cobre de 8,1509 g/L y con un pH de 1, la buena conductividad del electrolito permitió que se deposite gran cantidad del cobre metálico en el cátodo, logrando recuperar cobre, 1,0669 g en la primera y 1,0829 g en la segunda corrida.

5.3.Recomendación

Para evitar que exista una alteración en el pH del electrolito es recomendable añadir jabón en la superficie de la solución.

Para obtener una buena calidad de cobre se recomienda realizar un análisis a los ánodos ya que, al corroerse, generan contaminación en los cátodos, se sugiere que el ánodo sea de una aleación de Pb-Ca-Sn para evitar estos fenómenos.

Se recomienda desarrollar otras investigaciones con temperaturas aproximadas de 45-55 °C, ya que permite una buena conductividad del electrolito en la celda de electrodeposición.

CAPITULO VI : REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arriagada, P. A. (2006). *Diseño, construcción y optimización de una celda de electro obtención de cobre con cátodo particulado móvil basada en electro diálisis reactiva*. Obtenido de http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2006/arriagada_p/sources/arriagada_p.pdf
- Arriagada Hernández, P. A. (2006). *Diseño, construcción y optimización de una celda de electro obtención de cobre con cátodo particulado móvil basada en electro diálisis reactiva*.
- Chamorro, C. G., & Jimenez, Y. R. (2011). “*PURIFICACIÓN Y ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE A PARTIR DEL LIXIVIADO DE LA EMPRESA FERROQUÍMICA S.R.L. PARA OBTENER COBRE ELECTROLÍTICO A NIVEL LABORATORIO*”.
- Chinga, V. A., & Murga, A. A. (2016). *Efecto de la temperatura, la concentración de sulfato de cobre (4.5×10^{-2}) y ácido sulfúrico (2×10^{-4}) en el electrolito, sobre la electrodeposición de cobre en cátodos de acero inoxidable 316L*. Obtenido de <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9301>
- Franklin, C. M. (2018). “*Implementación de un Convertidor de Corriente para Mejorar la Recuperación de Oro y Plata en las Celdas Electrolíticas en la Empresa Minera SOTRAMI S.A*”. Obtenido de <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/UNJFSC/2211>
- Gutierrez, E. R. (2019). *RECUPERACIÓN DE COBRE A PARTIR DE LA MALAQUITA UTILIZANDO SOLUCIONES DE TARTRATO MEDIANTE PROCESO DE LIXIVIACIÓN, PUNO 2017*. Puno, Peru. Obtenido de http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/11551/Esteban_Rey_Chavez_Gutierrez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Ramirez, D. (2019). "Optimización de la calidad de cátodos de cobre obtenidos a altas densidades de corriente". *posgrado*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA, Arequipa.
- Rivera, S. A. (2015). *Diseño de una planta para la recuperación de oro a partir de minerales sulfurados con tiosulfato de sodio como agente lixivante*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10441?locale=de>
- Soto, J., & Solís, A. (2012). Caracterización y optimización de parametros de Sx/ew para la obtención de cobre electrolítico a nivel laboratorio. *Pregrado*. Universidad Nacional Mayor De San Marcos, Lima.
- Talace, B. (2017). "Diseño Y Construcción De Planta Piloto De Extracción Por Solventes Y Electrodeposición De Cobre". *Pregrado*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.

ANEXOS

Ilustración 10. Ánodos (aleación Pb-Sn)



Ilustración 11. Cátodos (acero inoxidable AISI 316-L)



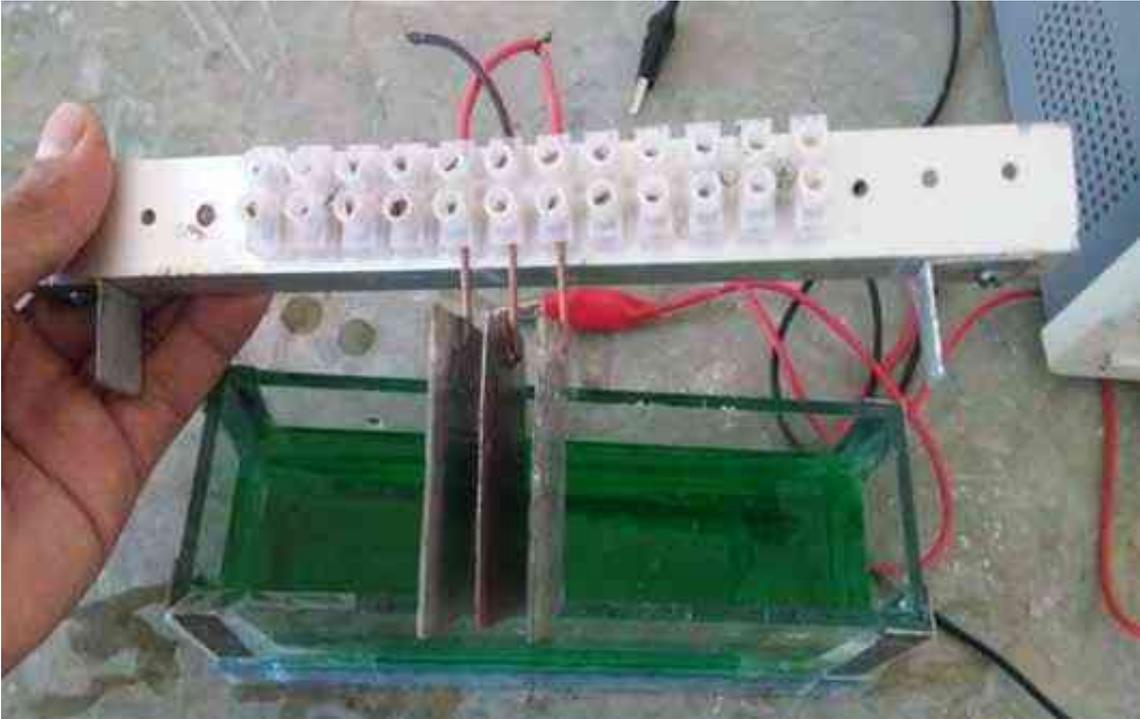
Ilustración 12. Pesado de cátodos



*Ilustración 13.*Proceso de electrodeposición 1 cm de distancia de electrodos



*Ilustración 14.*Proceso de electrodeposición 2 cm de distancia de electrodos



*Ilustración 15.*Cosecha de cátodos (separación de electrodos 1 cm)



*Ilustración 16.*Cosecha de cátodos (separación de electrodos 2 cm)



Ilustración 17. Recuperación de cobre en 2 horas, 1,5 V y separación de 1 cm (1) y 2 cm (2)



Ilustración 18. Recuperación de cobre en 2 horas, 1,8 V y separación de 1 cm (3) y 2 cm (4)



Ilustración 19. Recuperación de cobre en 3 horas, 1,5 V y separación de 1 cm (5) y 2 cm (6)