



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**FABRICACIÓN DE LÁMINAS DE ARRANQUE PARA CÁTODOS
DE ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE EN EL LABORATORIO
DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA UNA-PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. GEORGINA YANETH LAURA CANCAPA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PUNO – PERÚ

2024



GEORGINA YANETH LAURA CANCAPA

FABRICACIÓN DE LÁMINAS DE ARRANQUE PARA CÁTODOS DE ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE EN EL LABORATORIO D...

Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid::8254:412144970

78 Páginas

Fecha de entrega
3 dic 2024, 7:19 a.m. GMT-5

13,780 Palabras

Fecha de descarga
3 dic 2024, 7:35 a.m. GMT-5

75,398 Caracteres

Nombre de archivo
borrador de tesis Georgina Yaneth Laura Cancapa (4).docx

Tamaño de archivo
3.0 MB



Hg-2
Hipólito Córdova Gutiérrez
COORDINADOR DE INVESTIGACIÓN DE LA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y METALÚRGICA

Hg-2
Dr. Hipólito Córdova Gutiérrez
asesor





6% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 6% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 1% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

- Texto oculto**
8 caracteres sospechosos en N.º de páginas.
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Dr. Hipólito Córdova Gutiérrez
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y METALÚRGICA

Dr. Hipólito Córdova Gutiérrez
asesor





DEDICATORIA

Con respeto, admiración y profundo cariño, dedico esta tesis a mis padres, **Vidal Laura Figueroa** y **Felicitas Cancapa Huaricallo de Laura**, quienes me dieron la vida, me guiaron con sus consejos y siempre me brindaron su apoyo incondicional en mi formación profesional.

Esta obra es un humilde homenaje y un agradecimiento por todo lo que han hecho por mí. En estas páginas se refleja la sabiduría, la constancia y los valores que me inculcaron. Ustedes me enseñaron que con esfuerzo y determinación se puede alcanzar cualquier meta. Espero que este trabajo sea un reflejo del legado que me transmitieron y que, con mis logros, pueda honrar su nombre.

A mi compañero de vida, **Cristian Hanco Ventura**, por su apoyo incondicional, su paciencia y su amor, que me han fortalecido en los momentos más difíciles. Gracias por caminar a mi lado y ser mi mayor inspiración para seguir adelante. Tu confianza en mí ha sido clave para alcanzar este sueño.

Con todo mi amor y admiración, esta tesis es para ustedes.



AGRADECIMIENTOS

- Agradezco a Dios, por darme la vida, salud, fortaleza, sabiduría y capacidad para alcanzar mis metas. Eres quien guía el destino de mi vida y el de mi familia cada día.
- A la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, a la Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por haber contribuido de manera significativa en mi formación profesional.
- Expreso mi gratitud al Dr. Hipólito Córdova Gutiérrez, mi director y asesor, por guiarme en el proceso de elaboración del presente trabajo de investigación, y por compartir su vasto conocimiento, contribuyendo así a mi desarrollo académico y profesional.
- A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por su apoyo constante, su disposición incondicional y por compartir sus conocimientos y experiencias. Asimismo, agradezco especialmente a quienes facilitaron y abrieron las puertas del Laboratorio de Metalurgia para la realización de las pruebas experimentales que fueron esenciales en esta investigación.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2.1 Problema general.....	17
1.2.2 Problemas específicas	18
1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.3.1 Hipótesis general	18
1.3.2 Hipótesis específicas	18
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
1.5.1 Objetivo general	19
1.5.2 Objetivos específicos	19

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



2.1	ANTECEDENTES	20
2.1.1	Antecedentes internacionales	20
2.1.2	Antecedentes nacionales	21
2.2	MARCO TEÓRICO	24
2.2.1	Cobre	24
2.2.1.1	Características	25
2.2.1.2	Propiedades físicas y químicas	25
2.2.1.2.1	Propiedades químicas	25
2.2.1.2.2	Propiedades físicas	26
2.2.1.2.3	Propiedades mecánicas	27
2.2.1.3	Usos de interés	27
2.3	FUNDAMENTO TEORICO DE LA ELECTROLISIS.....	28
2.3.1	ELECTROQUIMICA	28
2.3.2	Electrodeposición	29
2.3.3	Proceso de electroobtención.....	30
2.3.3.1	Celdas electroquímicas	30
2.3.3.1.1	Celda galvánica	31
2.3.3.1.2	Celda electrolítica.....	33
2.3.3.2	Características de diseño de los electrodos	34
2.3.4	Proceso de electro-refinación (ER)	39
2.3.4.1	Principios electroquímicos.....	40
2.3.4.1.1	Electrolitos.....	40
2.3.4.1.2	Tipos de electrolitos	40
2.3.4.1.3	Naturaleza del electrolito.....	41
2.3.4.2	Ley de Faraday	42



2.3.4.2.1	Primera ley de Faraday	42
2.3.4.2.2	Segunda ley de Faraday	43
2.3.4.3	Eficiencia de corriente	43
2.3.4.3.1	Las causas que provocan este rendimiento son:	44
2.3.4.4	Sistema de unidades eléctricas	46
2.3.4.5	Requerimientos energéticos	47
2.3.4.5.1	Medidores eléctricos.....	47
2.3.4.6	Reacción química	48
2.3.4.6.1	Reacción catódica.....	49
2.3.4.6.2	Reacciones anódicas.....	49
2.3.4.6.3	Reacción redox total.....	49
2.3.4.7	Reacción electroquímica	50
2.3.4.7.1	Beneficio, purificación y electrodeposición.....	51
2.3.4.8	Las variables aplicadas en el proceso de electrodeposición	51
2.3.4.8.1	Tiempo de deposición	51
2.3.4.8.2	La densidad de corriente.....	51
2.3.4.8.3	Temperatura.....	53
2.3.4.8.4	Deposición del metal	53
2.3.4.8.5	Voltaje de celda	53
2.3.4.8.6	pH.....	54
2.3.4.8.7	Rectificador de corriente	54

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO.....	56
3.2	PROCEDENCIA DEL MATERIAL ESTUDIADO.....	56



3.3	POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO	57
3.4	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL	59
3.4.1	Tipo de investigación	59
3.4.2	Diseño experimental.....	59
3.4.2.1	Matriz de diseño.....	59
3.4.3	Variables independientes para la electrodeposición son:	60
3.5	PROCEDIMIENTO.....	60
3.5.1	Masa molecular del sulfato de cobre pentahidratado $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	60
3.5.2	Calculo de la cantidad de sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) necesaria para obtener 50 g/L de cobre (Cu^{2+})	60
3.5.3	Metodología experimental para evaluar la influencia de la densidad de corriente.....	65
3.5.4	Metodología experimental para evaluar la influencia del tiempo.	66

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	RESULTADOS OBTENIDOS.....	67
4.2	OBTENCIÓN DE LÁMINA DE COBRE	71
V.	CONCLUSIONES.....	73
VI.	RECOMENDACIONES	75
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
ANEXOS.....		80

Área: Metalúrgica extractiva

Tema : Cátodos de electrodeposición de cobre

Fecha de sustentación: 10 de diciembre del 2024



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Celda galvánica.	32
Figura 2 Celda electrolítica.	34
Figura 3 Plancha madre de acero inoxidable.	35
Figura 4 Protectores de bordes de los cátodos.	37
Figura 5 Bordes colocados en la plancha madre.	37
Figura 6 Ánodo de plomo, calcio y estaño.	38
Figura 7 Proceso de electrodeposición de cobre.	50
Figura 8 Solución de sulfato de cobre.	61
Figura 9 Celda instalada.	62
Figura 10 Cátodo de acero inoxidable	63
Figura 11 Montaje de celda.	63
Figura 12 Conexión del sistema.	64
Figura 13 Cátodo de arranque.	65
Figura 14 Recuperación de cobre con variación de la densidad de corriente.	68
Figura 15 Porcentaje de recuperación de cobre con variación de la densidad de corriente.	68
Figura 16 Depósito del cobre con variación del tiempo.	70
Figura 17 Porcentaje de recuperación de cobre con variación del tiempo.	71
Figura 18 Lamina de arranque	72



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Propiedades químicas.....	26
Tabla 2 Propiedades físicas.....	26
Tabla 3 Serie galvánica.....	31
Tabla 4 Materiales que se recuperan por precipitación electrolítica reductiva.....	39
Tabla 5 Ejemplo de electrolitos y no electrolitos.....	41
Tabla 6 Resumen de relaciones básicas de electricidad, relevantes para el estudio de la electrometalurgia.....	46
Tabla 7 Matriz de diseño.....	59
Tabla 8 Experimentos variando la densidad de corriente con un tiempo de 20 minutos.....	65
Tabla 9 Experimentos variando el tiempo en minutos con una densidad de corriente 2,50 A/dm ²	66
Tabla 10 Depósito de cobre con variación de la densidad de corriente a un tiempo constante de 20 minutos.....	67
Tabla 11 Depósito de cobre con variación del tiempo a una densidad de corriente constante de 2.50A/dm ²	69
Tabla 12 Pureza de la lámina de cobre obtenida.....	71



ACRÓNIMOS

dm ²	: Decímetro cuadrado.
Cu	: Cobre.
CuSO ₄ .5H ₂ O	: Sulfato de cobre pentahidratado.
A	: Amperios.
V	: Voltios.
%	: Porcentaje.
Kg	: kilogramo.
G	: Gramos.
EW	: Electro obtención.
°C	: Grados Celsius.
cm ²	: Centímetro cuadrado.
cm	: Centímetro.
mm	: Milímetros.
L	: Litros.
mL	: Mililitros.
Min.	: Minutos.
s	: Segundos



RESUMEN

La presente investigación titulada “Fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre se ha realizado en el laboratorio de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – Puno. El uso de láminas de arranque tiene propiedades eficientes frente a los cátodos de acero inoxidable, en el proceso de electrodeposición de cobre. El objetivo principal es fabricar láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre. El método de investigación es experimental, con un diseño factorial de 2^2 . La población está constituida por 12 litros de solución de sulfato de cobre, con una concentración de 50g/L de Cu^{2+} y 196,5g/L de sulfato de cobre, la experimentación se llevó a cabo en una celda de PVC de dimensiones 6.3 x 11.07 x 14.4 cm y capacidad de 700 ml, equipada con barras conductoras de platina de cobre de 1” y 1/32” de espesor. Se realizaron cinco pruebas experimentales con diferentes valores de densidad de corriente y cinco pruebas experimentales con diferentes valores de tiempo, utilizando un ánodo y cátodo de acero inoxidable y un rectificador de corriente con una capacidad de 10 A. Los resultados obtenidos mostraron que, utilizando una densidad de corriente de 2,50 A/dm² y un tiempo de 6 horas, se logró obtener una lámina de arranque de cobre con un espesor de 0.5mm, con un peso de 16.81g y una pureza de 99,87 %. Las pruebas también demostraron que una densidad de corriente de 2.50 A/dm² en condiciones experimentales de 20 minutos proporciono un alto porcentaje de recuperación de cobre de 96.19 %, mientras que un tiempo de 60 minutos alcanzó el 96.52 % de recuperación. Estos resultados sugieren que la manipulación de la densidad de corriente y el tiempo permite obtener láminas de arranque de alta calidad, optimizando tanto la pureza como el espesor.

Palabras clave: Electrodeposición, Solución de sulfato de cobre, Cátodo, Acero inoxidable, Cobre



ABSTRACT

The present research entitled “Manufacturing of starter sheets for copper electrodeposition cathodes has been carried out in the laboratory of the professional school of Metallurgical Engineering UNA – Puno. The use of starting sheets has efficient properties compared to stainless steel cathodes, in the copper electrodeposition process. The main objective is to manufacture starting sheets for copper electrodeposition cathodes. The research method is experimental, with a 22 factorial design. The population consists of 12 liters of copper sulfate solution, with a concentration of 50g/L of Cu^{2+} and 196.5g/L of copper sulfate, the experimentation It was carried out in a PVC cell with dimensions 6.3 x 11.07 x 14.4 cm and a capacity of 700 ml, equipped with platinum conductive bars. 1” and 1/32” thick copper. Five experimental tests were carried out with different values of current density and five experimental tests with different values of time, using a stainless steel anode and cathode and a current rectifier with a capacity of 10 A. The results obtained showed that, using a current density of 2.50 A/dm² and a time of 6 hours, it was possible to obtain a copper starter sheet with a thickness of 0.5mm, with a weight of 16.81g and a purity of 99.87%. The tests also demonstrated that a current density of 2.50 A/dm² in experimental conditions of 20 minutes provided a high percentage of copper recovery of 96.19%, while a time of 60 minutes reached 96.52% recovery. These results suggest that manipulation of current density and time allows obtaining high-quality starter sheets, optimizing both purity and thickness.

Keywords: Electrodeposition, Copper sulfate solution, Cathode, Stainless steel, Copper



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La electrodeposición de cobre es un proceso ampliamente estudiado en el campo de la metalurgia, utilizado para recuperar cobre puro a partir de soluciones acuosas. Este método se ha implementado tanto en la industria como en entornos académicos debido a su eficiencia para obtener cobre de alta pureza. En la industria metalúrgica, los cátodos de acero inoxidable desempeñan un papel importante en procesos como la electrodeposición, gracias a sus propiedades. Estos cátodos son altamente resistentes a la corrosión, lo que prolonga su vida útil, y poseen una excelente conductividad eléctrica, lo que los convierte en una opción eficiente y confiable para la recuperación de metales como el cobre. Además, su capacidad para mantener superficies limpias y uniformes durante el proceso asegura la calidad del material depositado. Sin embargo, uno de los principales desafíos asociados a este proceso es el elevado costo de los cátodos de acero inoxidable, los cuales son esenciales para el proceso de electrodeposición, pero resultan costosos y difíciles de obtener en el mercado local. Esta situación afecta tanto a las industrias metalúrgicas como a las instituciones académicas, que requieren de estos materiales para realizar investigaciones y experimentos de manera eficiente.

Sin embargo, en el contexto de las universidades públicas en países en desarrollo, la implementación de procesos industriales con tecnología moderna enfrenta desafíos significativos. La falta de recursos financieros limita la adquisición de equipos atractivos y materias primas de alta calidad, lo que obliga a buscar soluciones creativas y accesibles para realizar investigaciones que estén a la altura de las necesidades de la industria.

En la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional del Altiplano, la falta de tecnología y equipos adecuados ha limitado la capacidad de



llevar a cabo investigaciones practicas sobre procesos de electrodeposición. Dada esta situación, se plantea la necesidad de desarrollar una alternativa más económica y accesible para la fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre. Esta alternativa debe no solo reducir los costos asociados al proceso, si no también mejorar la disponibilidad de recursos tecnológicos en el laboratorio de la escuela a menor costo y con resultados eficientes.

El presente trabajo de investigación estudio la influencia de factores clave, como la densidad de corriente y el tiempo de deposición, en la fabricación de estas láminas de arranque. Se realizaron pruebas experimentales en el laboratorio de la escuela, utilizando una solución de sulfato de cobre en celdas de electrodeposición con ánodo y cátodo de acero inoxidable.

Este estudio no solo pretendió reducir los costos asociados al uso de cátodos de acero inoxidable, sino también promover la investigación y la implementación de tecnologías accesibles que puedan beneficiar tanto al ámbito académico como a la industria metalúrgica local. Asimismo, se espera que la investigación incentive la creación de más plantas de electrodeposición, generando nuevas oportunidades de empleo en el país.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La electrodeposición de cobre ha sido ampliamente estudiada, y diversos autores han propuesto varias alternativas para mejorar significativamente el desempeño de este proceso. Sin embargo, a pesar de las mejoras en el rendimiento energético, pocas de estas alternativas han sido implementadas a escala industrial debido a ciertas limitaciones prácticas que aún no se han superado.



La idea básica de la presente investigación es el estudio de la fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre y llevar a cabo pruebas experimentales en una celda de electrodeposición, utilizando una solución de sulfato de cobre. La electrodeposición es un procedimiento relativamente sencillo para recuperar metales como el cobre (Cu) en forma pura y selectiva, separándolos de las impurezas existentes en la solución. Una característica importante de este proceso es que el metal ya está en solución y solo necesita ser depositado en el cátodo, utilizando un ánodo esencialmente insoluble.

Actualmente, uno de los desafíos más significativos es el alto costo de los cátodos de acero inoxidable, lo cual limita su uso en aplicaciones industriales y académicas. Además, en el mercado local existe una carencia de estos cátodos debido a sus elevados costos. La escuela profesional de ingeniería metalúrgica de la universidad Nacional del Altiplano también enfrenta dificultades debido a la falta de tecnología adecuada para realizar investigaciones y experimentos de manera eficiente.

Por lo tanto, se plantea la necesidad de desarrollar una alternativa más económica y accesible para la fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre. Esta alternativa debe no solo reducir los costos asociados al proceso, sino también mejorar la disponibilidad de recursos tecnológicos en el laboratorio de la escuela.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

¿Será posible fabricar láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – Puno?



1.2.2 Problemas específicas

¿Cuál es el efecto de la densidad de corriente en la fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre?

¿Qué efecto tiene el tiempo de fabricación óptimo identificado en la fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre?

1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Hipótesis general

La experimentación permitirá la fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre en el laboratorio de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica UNA – Puno.

1.3.2 Hipótesis específicas

La densidad de corriente determina en la fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre.

El tiempo determina la fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación, fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición se justifica, que las láminas de cobre son más económicas que el cátodo de acero inoxidable, lo cual a su vez permitirá utilizar láminas de cobre para cátodos, en el proceso de electrodeposición de cobre más accesible y asequible y abre nuevas posibilidades para la optimización del proceso y la mejora de la calidad del producto



Como tecnología para estudiantes de pregrado investigadores relacionados con la electrodeposición de cobre, resultara un apoyo económico por que se encontrara la tecnología adecuada y con la implementación de esta tecnología beneficiara directamente a las industrias locales al ofrecer una alternativa más factible para los cátodos de electrodeposición de cobre, al tener esa tecnología se incentiva a que en nuestro país se tenga más plantas de electrodeposición que permitan crear mayores puestos de trabajo.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo general

Fabricar láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre en el laboratorio de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica UNA-Puno.

1.5.2 Objetivos específicos

Determinar la influencia de la densidad de corriente en la fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre.

Determinar el tiempo de fabricación optimo identificado en la fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de cobre.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Antecedentes internacionales

Arriagada (2006) en su tesis, efectuó electrodeposiciones de cobre por tiempos prolongados y bajo distintas condiciones. En cada una de ellas se observó el efecto de diversos parámetros operacionales sobre la eficiencia de corriente, la tensión de celda y el consumo específico de energía. De entre ellos, los más relevantes fueron temperatura de los electrolitos, densidad de corriente de celda, concentración inicial de Cu^{2+} en catolito, velocidad de circulación de electrolito y velocidad de rotación de las paletas de agitación de cátodo particulado. Se concluye que mediante la celda con cátodo particulado móvil es posible efectuar la electrodeposición de cobre a densidades de corriente elevadas (1071 A/m^2) con un menor consumo específico de energía y una mayor eficiencia de corriente que las celdas convencionales de electroobtención de Cu.

Ruiz & Juárez (2022) en su tesis de investigación, presenta los perfiles de concentración de cobre en la celda de electrolisis y el porcentaje de cobre recuperado en forma metálica en el cátodo. Como se puede observar, la densidad de corriente igual a 142 A/m^2 después de 6 horas, las condiciones electrolíticas permiten recuperar el 60 % de cobre presente en la solución rica en cobre (obtenida en el despojo). Además, la eficiencia de corriente para el proceso de electrodeposición fue de 86%.



Páez (2017) en su tesis, aprecia el comportamiento de la temperatura del electrolito a lo largo de todo el proceso, con un promedio de 40°C, un valor que está por debajo de lo que está demostrado científicamente, sin embargo, se pueden obtener algunos resultados interesantes. Se observa que, si la temperatura aumenta, el voltaje disminuye, el caso que más hace notar esto es para el minuto 180 donde se alcanza la temperatura más alta de la experiencia (49°C), se tiene un voltaje de 2,13V, esta es el voltaje más bajo obtenida a lo largo de todo el experimento. Ahora bien, en el otro extremo, analizando la temperatura más baja obtenida(34°C), se obtiene el valor más elevado de voltaje en la celda (2,21).

Sánchez et al., (2017) en su trabajo, estudió la recuperación de cobre a partir de placas de circuitos impresos desechadas. El primer paso inicia con la recolección de las placas, continuando con la reducción de tamaño del material y su clasificación, lo que permite obtener cuatro diferentes granulometrías. Posteriormente se realiza la etapa de lixiviación con ácido sulfúrico y peróxido de hidrogeno a temperatura controlada, registrándose concentraciones de cobre en solución para tamaño de los tamices 6 y 10 que corresponden a valores de: 9705 y 12157 mg/L, respectivamente. Para separar el cobre de la solución se utiliza la extracción liquido-liquido con un agente extractante. Finalmente, se efectúa la electrodeposición para la obtención de cobre metálico con excelentes valores de eficiencia de extracción.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Escobar (2018) en su investigación, menciona que se evalúa uno de los parámetros más importante en la electroobtención del cobre como la densidad de corriente, la cual se aplicó 278,3 A/m² como rango óptimo. Asimismo, evalúa el



voltaje en función de la distancia entre electrodos, indicando que al incrementar el voltaje de celda no varía la calidad del cobre catódico. Se obtuvo una pureza en el cátodo a partir de 45g/l Cu de 98.5% de Cu a nivel de laboratorio.

chamorro & Jimenez (2011) menciona que los parámetros operativos óptimos para la purificación (temperatura y pH) y electrodeposición (densidad de corriente y tiempo de operación), llega a una conclusión en la electrodeposición se trabajó con 1 litro del electrolito 11 de pH para mejorar la conductividad eléctrica y a un voltaje constante de 2,5 v, variando el número de cátodos y ánodos para encontrar una mejor densidad catódica.

Aredo & Villanueva (2007) en su tesis, menciona de acuerdo con el análisis de varianza se determinó que la temperatura, la concentración de sulfato de cobre y de ácido sulfúrico tiene un efecto significativo sobre la electrodeposición de cobre, además de su pureza y calidad física y química; siendo la concentración de sulfato de cobre en el electrolito, la que muestra un mayor efecto. El mayor peso de cobre depositado y de buenas propiedades químicas y físicas, se obtiene con una concentración de 80 g/L de sulfato de cobre, 100g/L de ácido sulfúrico a una temperatura de 40°C.

Lizzetti (2021) en su tesis, menciona la solución de sulfato de cobre empleada tiene una ley de 8,1509g/L de Cu, los resultados que se obtuvieron en la primera corrida es de recuperación de Cu es de 1,0669g 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 1,0829g manteniendo las mismas condiciones que la primera corrida.



Ramirez (2019) en su tesis, demostró que una de las mejores y más prácticas formas de mejorar la transferencia de masa era vía convección forzada de cobre, provocada por la inyección directa de aire a la celda electrolítica. Con esto se logra provocar movimiento de los iones cobre, disminuir el espesor de la capa límite y mejorar el depósito de cobre. En el tercer diseño experimental, se corrieron pruebas teniendo como factores a la concentración de cobre, la inyección de aire y la densidad de corriente. Los resultados de estas pruebas muestran que la calidad del cátodo producido se mejoró enormemente, para 414 A/m^2 , y se logró obtener cátodos, en calidad química, con menos de 1ppm de plomo y azufre por debajo de 6 ppm., y en calidad física con menos de 3 % de área de rugosidad y grano de cobre depositado por debajo de 5 mm de diámetro. Este trabajo demostró que se puede obtener cátodos de calidad grado AA o High grade, operado a más de 400 A/m^2 , mejorando la transferencia de masa de cobre, vía convección forzada provocada por inyección de aire.

Aguilar (2021) en su tesis, se comenzó a determinar las dimensiones de la cuba de electrodeposición cuyas dimensiones fueron de 10 cm x 12 cm x 15 cm, los cuales son adecuados para colocar los electrodos, referente a los electrodos se emplearon como cátodo el acero y ánodo el plomo, las dimensiones de ambos fueron de 5 cm x 0.1 cm x 10 cm, los cuales fueron conectados de manera directa a una fuente de poder la cual llevaba un amperaje de 1.2 amperios y un voltaje de 1.9 volts, durante tiempos de 40, 80 y 120 minutos, los resultados obtenidos posterior a la electrodeposición indicaron que la cuba presenta un rendimiento del 72% en función a la obtención de cobre.



2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Cobre

El cobre en el mundo se obtiene de los minerales presentes como los minerales oxidados son la cuprita, tenorita, malaquita, azurita, crisocola y brocantita y los sulfuros así: la calcocita, covelita, calcopirita, bornita y enargita. El grado del mineral empleado en la producción de cobre ha ido disminuyendo regularmente, conforme se han agotado los minerales más ricos y ha crecido la demanda de cobre. Hay grandes cantidades de cobre en la tierra para uso futuro si se utilizan los minerales de los grados más bajos, y no hay probabilidad de que se agoten durante un largo periodo. (Almiron, 2016)

El bajo potencial de ionización del electrón del cobre da por resultado una remoción fácil del mismo del mismo para obtener cobre (I), o ion cuproso, Cu^+ , y el cobre (II), o ion cúprico, Cu^{2+} , se forma sin dificultad por remoción de un electrón de la capa 3d. el peso atómico de cobre es 63.546. tiene dos isótopos naturales estables ^{63}Cu y ^{65}Cu . El cobre se caracteriza por su baja actividad química. Se combina químicamente en alguno de sus posibles estados de valencia. La valencia más común es la de 2^+ (cúprico), pero 1^+ (cuproso) es también frecuente; la valencia 3^+ ocurre solo en unos cuantos compuestos inestables. (Almirón, 2016)

Un metal comparativamente pesado, el cobre sólido puro, tiene una densidad de 8.96 g/cm^3 a 20°C , mientras que el del tipo comercial varía con el método de manufactura, oscilando entre 8.90 y 8.94. El punto de fusión del cobre es de 1083.0°C . su punto de ebullición normal es de 2595°C . El cobre no es magnético; o más exactamente, es un poco paramagnético. Su conductividad



térmica y eléctrica son muy altas. Es uno de los metales que puede tenerse en estado más puro, es moderadamente duro, es tenaz en extremo y resistente al desgaste. La fuerza del cobre está acompañada de una alta ductibilidad. Las propiedades mecánicas y eléctricas de un metal dependen en gran medida de las condiciones físicas, temperatura y tamaño de grano del metal. (Soto, 2012)

2.2.1.1 Características

Es un elemento natural del cual aún se tienen bastos yacimientos aun sin extraer, tiene una infinidad de usos y aun se le siguen encontrando nuevas aplicaciones, es de los mejores conductores de calor y de corriente eléctrica, se utiliza mucho en ornamentos artísticos por los diferentes colores y acabados que puede tomar así como por su gran resistencia, tiene la cualidad de ser antimicrobiano, es fácil de unir por diferentes procesos de soldadura, es un elemento versátil, maleable, dúctil que también se utiliza para la elaboración de instrumentos musicales, además es un metal duradero, ya que se puede reciclar un número casi ilimitado de veces sin que pierda sus propiedades mecánicas. (López, 2014)

2.2.1.2 Propiedades físicas y químicas

El cobre es uno de los metales más explotados en la tierra y esto se debe a sus propiedades, la utilidad que tiene el cobre es debido a la unión de sus propiedades, físicas y mecánicas.

2.2.1.2.1 Propiedades químicas

El cobre es un elemento químico de símbolo Cu, con número atómico 29, es uno de los metales de transición no ferrosos que

mayormente es utilizado en el mundo debido a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas. (Morales, 2022)

Tabla 1

Propiedades químicas.

Propiedades	Cobre
Distribución electrónica	[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹
Radio atómico (pm)	128
Volumen atómico (cm ³ /mol)	7,1
Radio covalente	1,38
Radio iónico	0,69
Estructura cristalina	Cara cubica centrada
Afinidad electrónica (kJ/mol)	118,5
Valencia	1,2
Equivalente electroquímico (g/amp-hr)	1.1855
Primer potencial de ionización	7.726
Estado de oxidación	2
Electronegatividad	1.9

Nota: Villanueva et al., (2020)

2.2.1.2.2 Propiedades físicas

A temperatura ambiente se presenta sólido y su masa atómica relativa es de 63.54g/mol. El cobre tiene 25 isotopos radiactivos además de dos isotopos naturales estables: Cu-63 y Cu-65, siendo el Cu-63 el más abundante (69.17%).

Tabla 2

Propiedades físicas.

Propiedades	Cobre
Punto de ebullición (°C)	2595
Punto de fusión	1083
Coefficiente de dilatación térmica lineal	1.7×10^{-5}
Conductividad eléctrica (S/m)	5.96×10^7
Conductividad térmica (W/m.K)	400
Densidad a 20°C (g/cm ³)	8.96



Propiedades	Cobre
Descripción	Metal de transición naranja rojizo
Molar volumen (cm ³ /mol)	7.09
Calor específico (cal/g°C)	0.093

Nota: Villanueva et al., (2020)

2.2.1.2.3 Propiedades mecánicas

El cobre es un material fácil de trabajar, ya que puede tenerse en un estado muy puro, es moderadamente duro, maleable, muy resistente al desgaste y extremadamente tenaz, es decir, muy difícil de romper. A su vez, es un metal muy dúctil ya que es muy fácil obtener hilos con él. También debemos saber que el cobre tiene una alta conductividad térmica eléctrica. (Villanueva et al., 2020)

2.2.1.3 Usos de interés

En las siguientes aplicaciones.

- En la industria de las comunicaciones y manufacturas: Es empleado en la fabricación de tubos, por su gran ductibilidad, su gran conductividad térmica y relativa resistencia a la corrosión. Tiene gran demanda en la fabricación de cables y alambres eléctricos, por su alta conductividad eléctrica. En forma de óxido de cobre se emplea como pigmento en la fabricación de pinturas. En artesanía se tiene una antigua tradición.
- En la agricultura e industria de la construcción: El sulfato de cobre se produce a partir de chatarra o mineral oxidado de cobre con la adición de ácido sulfúrico para la formación de sulfato de cobre en solución, el cual es purificado, saturado y luego precipitado para



formar cristales, usado en agricultura, minería y medicina. El oxiclورو, es empleado como desinfectante, y el óxido cuproso es base de pinturas.

- Aleaciones: los latones. Son aleaciones de cobre con zinc, se utilizan para cartuchos de municiones, en los radiadores, accesorios para plomería, joyería de fantasía, intercambiadores de calor, estuches para lápiz labial, polveras etc. Los bronce. Son aleaciones de cobre con otros metales (Zn, Al, etc.) excepto. El zinc. Se usa en la fabricación de discos de embrague, resortes, fuelles, recipientes y conductos hidráulicos a presión engranajes, ejes motrices, piezas de bombas, resortes y contactos en equipo para teléfonos, equipo quirúrgico y dental, etc. (Almiron, 2016)

2.3 FUNDAMENTO TEORICO DE LA ELECTROLISIS

2.3.1 ELECTROQUIMICA

Es la rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química. Los procesos electroquímicos son reacciones redox (oxidación-reducción) en donde la energía liberada por una reacción espontánea se convierte en electricidad o la energía eléctrica se aprovecha para inducir una reacción química. En las reacciones redox se transfieren electrones de una sustancia a otra. La pérdida de electrones durante la oxidación de un elemento se distingue por un aumento en su número de oxidación. La reducción de un elemento implica una disminución en su número de oxidación debida a la ganancia de electrones. (Chang, 2002)



2.3.2 Electrodeposición

La electrodeposición es una rama de la electrometalurgia. Se define como el arte de depositar metales mediante el uso de la corriente eléctrica. Esto involucra usualmente la reducción de un compuesto metálico disuelto en agua, y a la deposición del metal resultante sobre una superficie conductora, químicamente limpia. (Panchi, 2009)

La electrodeposición implica la reducción (disminución del estado de oxidación; ganancia de electrones) de un compuesto metálico disuelto en agua y una deposición del metal resultante sobre una superficie conductora. Probablemente esta técnica es uno de los procesos más complejos conocidos, debido a que hay un gran número de fenómenos y variables que intervienen en el proceso total, mismos que son llevados a cabo en la superficie de los materiales involucrados. (Del Castillo, 2008)

En el caso de la deposición de metales de electrolito, es generalmente una solución acuosa de sales metálicas, que, con la adición de otros metales para incrementar su conductividad, modifican la textura del depósito y/o actúan como estabilizadores.

La solución se somete a cambios electroquímicos o electrolisis cuando se aplica una corriente eléctrica a través de los electrodos negativos o cátodos, mientras que las barras, laminas u hojas del metal a ser depositado se denominan ánodos. Tanto cátodo como ánodo deben ser metálicos.

Los cambios químicos se hacen notar en forma inmediata, la actividad creada se evidencia por la deposición del metal, y a menudo por el



desprendimiento gas en forma de pequeñas burbujas. Este efecto es el resultado del movimiento iónico, inducido por la corriente eléctrica aplicada.

La corriente aplicada a los electrodos es suministrada por una fuente de corriente eléctrica continua.

La diferencia de potencial sobre los electrodos del baño, o voltaje, expresado en voltios, es importante para que se produzca en el electrolito una circulación de corriente, expresada en Amperes. (Panchi, 2009)

2.3.3 Proceso de electroobtención

La precipitación por reducción eléctrica comúnmente conocida como electro-obtención (EW), es actualmente uno de los procedimientos más sencillos. Su característica principal radica en que el metal ya está en la solución y solamente se trata de recuperarlo depositándolo en cátodos, mientras el ánodo es esencialmente insoluble. Una celda de electrodeposición está constituida por:(Chamorro & Jimenez, 2011)

2.3.3.1 Celdas electroquímicas

Una celda es un dispositivo en el cual se producen reacciones químicas de oxidación y reducción. El aparato se integra de las siguientes partes: sustancia que contiene iones (electrolito), dos electrodos (cátodo y ánodo) y una conexión eléctrica entre ambos electrodos.

Existen dos tipos de celdas: las eléctricas, que requieren un voltaje externo (fuente de poder) y las electroquímicas o galvánicas que solamente necesitan un instrumento para registrar voltaje.



2.3.3.1.1 Celda galvánica

Una celda galvánica es aquella en la cual la energía química es convertida en energía eléctrica por medio de una reacción química espontánea. Esto se debe a que un metal es más activo y otro más noble, ánodo y cátodo respectivamente, según la serie galvánica; por lo que al ser conectados eléctricamente producen un flujo de electrones desde el cátodo al ánodo. Dicho flujo genera un potencial eléctrico que puede ser medido experimentalmente. (Campo, 2015)

Tabla 3

Serie galvánica.

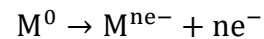
EXTREMO ANODICO (Mas susceptible a la corrosión)	
Grupo I	1. Magnesio y sus elecciones
	2. Zinc
	3. Acero galvanizado
	4. Aluminio 2S
	5. Cadmio
Grupo II	6. Aluminio 17ST
	7. Acero
	8. Hierro
	9. Acero inoxidable
	10. Pb/Sn para soldar
	11. Plomo
	12. Estaño
Grupo III	13. Níquel
	14. Latón
	15. Cobre
	16. Bronce
	17. Aleación Cu-Ni
	18. Monel
Grupo IV	19. Plata para soldar
	20. Níquel (Pasivado por inmersión en una solución altamente ácida)
	21. Plata
	22. Grafito
Grupo V	23. Oro
	24. Platino
EXTREMO CATODICO (Menos susceptible a la corrosión)	

Nota: Campo (2015).

Los requisitos para que se produzca un proceso de corrosión en una pila galvánica son los siguientes:

Dos superficies con distinto potencial eléctrico:

- Una de ellas, constituye al ánodo de la reacción, al ceder electrones sufrirá la corrosión. Es decir, aquí se lleva a cabo la reacción de oxidación. Es el polo negativo.



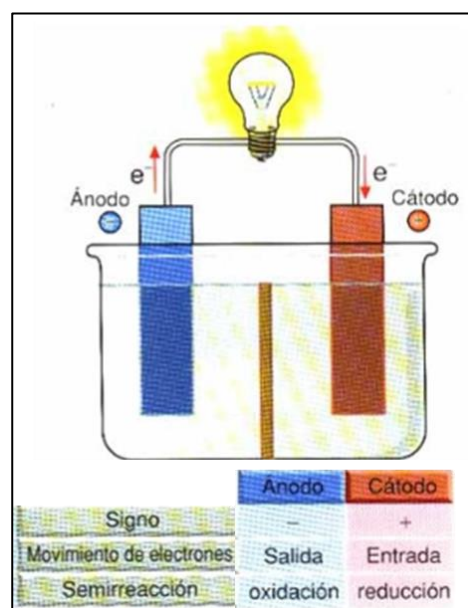
- La otra, que constituye el cátodo, ganara los electrones cedidos por el ánodo. En esta zona ocurrirá la reacción de reducción. Es el polo positivo.



- Un electrolito, conductor iónico que contiene los elementos característicos del medio corrosivo. Es justo aquí, en el seno de la solución, donde ocurre el transporte de materia.
- Una conexión eléctricamente conductora entre el ánodo y el cátodo, para que sea posible el transporte de carga. (Campo, 2015)

Figura 1

Celda galvánica.



Nota: Campo (2015)



2.3.3.1.2 Celda electrolítica

Las celdas electrolíticas no son espontáneas, por lo que debe aplicarse externamente un potencial eléctrico para que funcionen. Al proveer dicha energía, se fuerza a que una corriente eléctrica pase por la celda con el fin de generar reacciones químicas de óxido-reducción en la superficie de los electrodos de dicha celda. Uno de los procesos más conocidos es el electrodeposito de metales como cobre, níquel o zinc. Es importante puntualizar que aquí, el ánodo estará cargado positivamente y el cátodo negativamente, contrario a lo sucedido en las celdas galvánicas. (Campo, 2015)

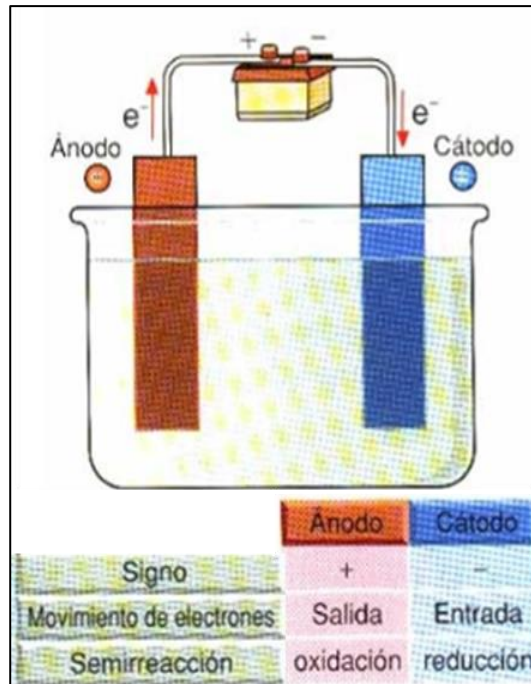
Las partes que conforman a la celda electrolítica son las siguientes:

- a) **Solución electrolítica:** Es una solución líquida que tiene la propiedad de permitir pasar la corriente eléctrica, en este tipo de plantas la solución electrolítica es una mezcla de agua, ácido sulfúrico y sulfato de cobre.
- b) **Electrodos:** Son las placas metálicas que se usan para hacer pasar la corriente eléctrica por el electrolito, el cátodo inicial es una placa de acero inoxidable 316L y el ánodo es una placa de aleación de plomo, calcio y estaño, el ánodo está conectado al polo positivo de la fuente de energía y el cátodo al polo negativo. (Flores, 2016)
- c) **Fuente de energía:** Es quien aplica la energía necesaria para poder invertir el sentido natural de la corriente, dando lugar a una

reacción química opuesta a la que se produce espontáneamente en la pila.(Campo, 2015)

Figura 2

Celda electrolítica.



Nota: Campo (2015)

2.3.3.2 Características de diseño de los electrodos

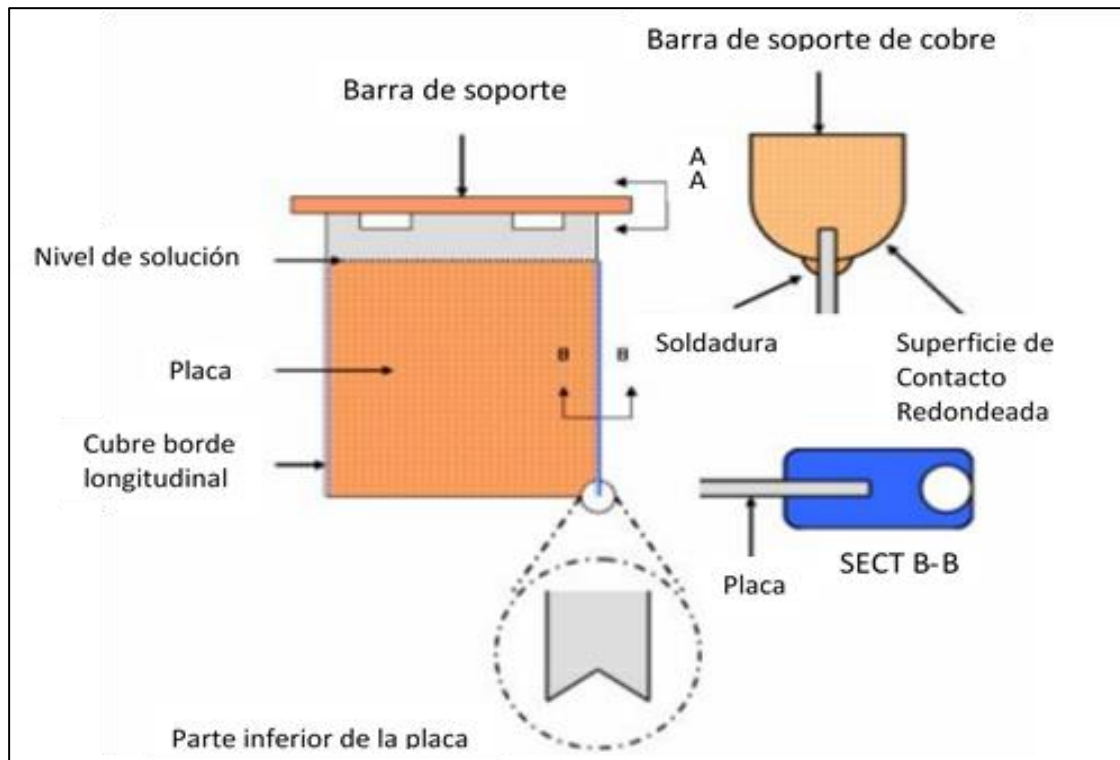
Los electrodos, catódico y ánodos se componen de la plancha, la barra de suspensión y las franjas protectoras de los costados, una de sus características es la simetría, estos electrodos se colocan en una celda y la cantidad varía según el diseño de la planta, líneas abajo se presenta una breve descripción de los cátodos y ánodos. (Flores, 2016)

Cátodos

- a) La plancha madre: en la figura 3 se puede apreciar una plancha madre típica usada en el proceso de electrodeposición.

Figura 3

Plancha madre de acero inoxidable.



Nota: Flores (2016)

La actual tecnología utiliza una placa de acero inoxidable 316L, con terminación superficial tipo 2B, esta placa es de espesor de 1/8 de pulgada, la barra de suspensión es hueca de acero inoxidable revestida con cobre que además cubre la parte de la soldadura entre la placa y la barra, consta de dos ventanas para permitir su izaje por el marco de la grúa y sus dos bordes laterales están cubiertos por plástico, y el borde inferior con cera removible para facilitar el despegue de las planchas de cobre, la propiedad principal de la superficie de la plancha de acero inoxidable es la presencia de una película fina de óxido de cromo, transparente y adhesiva, que permite un fácil deslaminado del cobre depositado. (Flores, 2016)

b) La barra de suspensión

La barra de soporte es una barra rectangular hueca en ambos extremos, de acero inoxidable tipo 304L, el contenido de carbono es bajo, menor a 0.03 %, para minimizar



la formación de carburo de cromo en las soldaduras, tiene una superficie curva de contacto con la que se consigue:

- Garantizar el contacto de alta presión y alta conductividad con la barra de alimentación intermedia.
- Garantizar la verticalidad de los electrodos.
- Reducir la corrosión de la barra de suspensión y de la barra de alimentación intermedia.

Para obtener la conductividad eléctrica necesaria, la barra de suspensión tiene una capa de 2.5 mm de espesor de cobre de alta conductividad, con ello se consigue:

- Un paso de baja resistencia entre la plancha y la barra de suspensión, es decir la corriente viaja por el cobre y no toca la soldadura.
- Reducir al mínimo el paso de mayor resistencia a través de la plancha de acero inoxidable desde el borde del enchapado de cobre hasta el nivel del electrolito.
- Proteger las soldaduras contra la corrosión.

c) Protección de los bordes

Las figuras 4 y 5 ilustran la franja protectora del costado que consiste en dura extrusión de CPVC para impedir que el cobre penetre debajo de la franja, la vida útil de la franja es de 2 años, las franjas se sujetan a la plancha con chavetas que se cementan con resina.

Figura 4

Protectores de bordes de los cátodos.



Nota: Flores (2016)

Figura 5

Bordes colocados en la plancha madre.



Nota: Flores (2016)

El objetivo principal de estos bordes es evitar que el cobre depositado se deposite en los bordes laterales de las planchas madre, evitando que se encamisen alrededor de la plancha madre facilitando su retiro.(Flores, 2016)

El borde inferior no se puede colocar esta franja por tenderse a romperse durante el manipuleo en la maquina deslaminadora, en cambio, está protegido por una cera micro cristalina que tiene un alto punto de fusión. (Flores, 2016)

Ánodos

Los ánodos como se ve en la figura 2.6 son de una aleación de plomo, calcio, estaño forjados en frio, estos presentan las siguientes ventajas:

Figura 6

Ánodo de plomo, calcio y estaño.



Nota: Flores (2016)

- Los ánodos forjados en frio son dimensionalmente más estables especialmente en densidades de corriente altas.
- La corrosión es delgada y uniforme y permite el uso total del espesor del ánodo, lo que prolonga la vida del ánodo.
- La soldadura entre la barra de suspensión y la plancha ofrece una diferencia de potencial menor y ahorra electricidad. (Flores, 2016)

En la actualidad tiene una gran importancia económica, al permitir el beneficio de recursos lixiviables, tanto de oro, como de cobre, plata, etc., cuyo tratamiento por otras vías resultaría económicamente inviable, se presenta una lista de los metales que se recuperen comercialmente por EW, junto a las características del electrolito y del cátodo usado en cada caso.

Tabla 4

Materiales que se recuperan por precipitación electrolítica reductiva.

Metal	Electrolito	Cátodo	Comentarios
Antimonio	Soda y sulfuro de sodio	Acero	*
Cadmio	Solución de sulfato	Aluminio	Sub-producto de la recuperación
Cromo	Solución de sulfato	Hastelloy	*
Cobalto	Solución de sulfato	Acero inoxidable	Producido junto al cobre en el congo
Cobre	Solución de sulfato	Cobre o acero inoxidable	Solución de lixiviación de alta ley o bien después de SX
Galio	Solución de soda (NaOH)	Acero inoxidable	*
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	*
Teluro	Solución de soda (NaOH)	Acero inoxidable	*
Zinc	Solución de sulfato	Aluminio	*
	Solución de soda (NaOH)	Acero inoxidable	Producción de zinc en polvo

Nota: Domic (2001)

2.3.4 Proceso de electro-refinación (ER)

La refinación electrolítica (ER) constituye un paso obligatorio de refinación para proceder a la comercialización final de numerosos metales. Su



característica principal radica en que el metal llega como ánodo (soluble) y se disuelve electrolíticamente, mientras que en el cátodo se deposita el metal refinado en forma simultánea. Las impurezas quedan disueltas en el electrolito y también precipitan en los residuos o barros anódicos. Sin duda que el caso del cobre es más notable, ya que prácticamente todo el cobre mundial que se utiliza industrialmente en la actualidad requiere del grado de impureza establecido por los estándares del cobre electrolítico. (Domic, 2001)

2.3.4.1 Principios electroquímicos

2.3.4.1.1 Electrolitos

Todos los solutos que se disuelven en agua se agrupan en dos categorías: electrolitos y no electrolitos. Un electrolito es una sustancia que, cuando se disuelve en agua, forma una disolución capaz de conducir la electricidad. Un no metálico, por lo tanto, no conduce la corriente eléctrica cuando se disuelve en agua.

2.3.4.1.2 Tipos de electrolitos

Los electrolitos se clasifican en fuertes y débiles. Los primeros son sustancias que están casi completamente disociadas en la solución, e incluyen sólidos iónicos y ácidos fuertes. Los últimos, poseen enlaces tan fuertes que muy difícilmente se ionizan en solución permaneciendo la mayor parte en forma de moléculas; las cuales no tienen la capacidad de transportar carga eléctrica como lo hacen los iones. Es importante mencionar, que los electrolitos por buenos conductores de la electricidad

que pueden ser, siempre tendrán menor capacidad para conducir la electricidad que los materiales sólidos. (Atkins & Jones, 2006)

Tabla 5

Ejemplo de electrolitos y no electrolitos.

Electrolitos fuertes	Electrolitos débiles	No electrolitos
Ácido clorhídrico. HCl	Ácido acético. CH ₃ COOH	Metanol. CH ₃ OH
Ácido nítrico. HNO ₃	Ácido fluorhídrico. HF	Etanol. CH ₃ CH ₂ OH
Hidróxido de sodio. NaOH	Amoniaco. NH ₃	Glucosa. C ₆ H ₁₂ O ₆
Cloruro de sodio. NaCl	Agua. H ₂ O	Sucrosa. C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁

Nota: Atkins & Jones (2006)

2.3.4.1.3 Naturaleza del electrolito

Los procesos electrolíticos de la metalurgia extractiva se pueden clasificar en dos categorías principales, de acuerdo a la naturaleza del electrolito utilizado:

- Los que usan electrolitos acuosos, que se lleva acabo a temperatura que rara vez exceden los 60°C, como es el caso del proceso de EW y de ER de cobre, zinc, níquel, cobalto, oro y plata.
- Los que se realizan con electrolitos de sales fundidas (en medios no acuosos), que se desarrollan a temperaturas bastante más altas como es el caso de la recuperación de aluminio, magnesio, litio y otros metales similares. (Domic, 2001)

2.3.4.2 Ley de Faraday

La electroquímica consiste en determinar la velocidad a la que ocurre la reacción óxido-reducción, se observa que esta reacción se lleva a cabo en la interface electrodo-electrolito, a este tipo de reacciones en cinética química se llama reacciones heterogéneas, es decir, la reacción es entre dos fases. Por lo tanto, la velocidad de reacción de un proceso electroquímico quedara determinada por las características superficiales del electrodo y las interacciones del electrolito en dicha superficie. Las características superficiales del electrodo son entre otras, el área, la rugosidad de la superficie; en electrodos metálicos su micro estructura, tamaño de grano, etc. En el electrolito pueden ser el tipo de electrolito (débil o fuerte), tipo de iones presentes, otro tipo de reacciones en él, etc. Todos estos factores afectan directamente la velocidad de la reacción óxido-reducción, pero para determinar la velocidad de un proceso electroquímico cuyo proceso controlante sea la transferencia de carga se utilizan las leyes de Faraday. (Talavera, 2009)

2.3.4.2.1 Primera ley de Faraday

La masa de un elemento depositado o consumido en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución del electrolito:(Terrazas, 2012)

$$m = \zeta \cdot Q$$

$$\zeta = \frac{Eq}{F}$$

$$Q = I \cdot t$$

m = Masa depositada o consumida (g)



ζ = Equivalente electroquímico

Q = Cantidad de electricidad que cruza el electrolito (C)

I = Corriente (A)

t = Tiempo (s)

F = Constante de Faraday (96.500 C)

2.3.4.2.2 Segunda ley de Faraday

La masa de los elementos que se depositan en los electrodos son proporcionales a los equivalentes químicos. Para depositar o consumir un equivalente químico se requiere una cantidad de carga equivalente a un mol de electrones, o un Faraday (F). (Terrazas, 2012)

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{Eq_1}{Eq_2}$$

$$Eq = \frac{Pa}{n}$$

Eq = Peso equivalente, o equivalente químico.

Pa = Peso atómico del elemento depositado o consumido.

n = Electrones que intervienen en la reacción de oxidación

De las leyes de Faraday obtenemos la ecuación de Faraday:

$$m = \frac{I \cdot t \cdot Pa}{n \cdot F}$$

2.3.4.3 Eficiencia de corriente

La eficiencia de corriente se detiene como la cantidad real de una sustancia depositada o disuelta, dividida por la cantidad teóricamente



liberada de acuerdo a la ley de Faraday. La corriente no puede exceder la demanda de la ley de Faraday, pero parte del metal depositado se pierde por algún factor o parte de la acción electrolítica de la corriente se gasta en la disposición o disolución de una sustancia diferente al del proceso. Existen pocos casos donde la eficiencia de corriente en el cátodo se aproxima al 100 % es decir que se usa toda la corriente para depositar al metal: (Aredo & Villanueva, 2016)

$$\eta_I = \frac{m'}{m} \times 100$$

Donde:

m' = Masa real del depósito catódico.

m = Masa teórica del depósito catódico, según la ley de Faraday.

2.3.4.3.1 Las causas que provocan este rendimiento son:

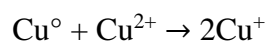
Reacción de electrodo simultanea: por ejemplo, en la deposición eléctrica del níquel que es un metal más electronegativo que el hidrogeno en la serie electroquímica de los metales, se produce la reacción simultanea de desprendimiento de gas hidrógeno, que también consumen corriente y que no se usa en níquel eléctrico. (Domic, 2001)

Interacción de productos anódicos y catódicos: desde el momento que se realiza una electrolisis, en el ánodo se han producido reacciones del tipo reductor y en cátodo otro tipo de oxidante. Si por alguna razón existe interacción entre los productos de electrodos, obviamente que entre ellos reaccionara químicamente, disminuyendo la eficiencia del proceso.(Domic, 2001)

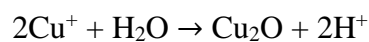


Reversible eléctrica del proceso de electrodo: si el producto de un electrodo en una celda difunde hacia el otro electrodo, puede ser parcial o total retornado a su condición original. Es decir, un producto anódico oxidado, si alcanza a llegar al cátodo, será inmediatamente reducido y viceversa.

Interacción del producto con el electrolito: por ejemplo, en la deposición del cobre desde un electrolito acidulado de CuSO_4 se ha visto que el ion cúprico lentamente disuelve químicamente el cobre metálico depositado.



A su vez si la solución fuese neutra, el ion cuproso formado se hidrolizaría:



A si el óxido cuproso contamina el cobre catódico depositado y se produce una aparente pérdida de eficiencia. (Domic, 2001)

Interacción de componentes del ánodo con el electrolito: los ánodos de cobre usados para refinación (ER) suelen contener pequeñas porciones de Cu_2O . este oxido se disuelve químicamente en el electrolito, y luego se deposita eléctricamente en el cátodo, llevando la eficiencia de corriente por encima de 100 %. (Domic, 2001)

2.3.4.4 Sistema de unidades eléctricas

La intensidad de flujo de electricidad se expresa en amperes. Un ampere es la corriente que permite depositar 0.001118 gramos de plata en un segundo desde una solución de iones de nitrato de plata. La diferencia de potencial, o fuerza electromotriz, se mide en volts. Un volt es la diferencia de potencial necesaria para hacer pasar un ampere a través de una resistencia de un Ohm. La cantidad de corriente, I , que pasa por la resistencia, R , es directamente proporcional al potencial, E . Este enunciado se conoce como la ley de Ohm, según la cual la resistencia del circuito corresponde a la constante de proporcionalidad que relaciona al potencial y a la corriente. (Domic, 2001)

Tabla 6

Resumen de relaciones básicas de electricidad, relevantes para el estudio de la electrometalurgia.

Cantidad que se mide	Unidades	Símbolo y definición	Relación con otras unidades
Energía	_____	_____	Energía = $Wt = EQ$
Carga	Coulomb	$Q = 6.25 \cdot 10^{18}$ electrones	_____
Diferencia de potencial	Volt	$E = 1 \cdot 10^{17}$ ergs / coulomb	$W = EI$; $E = IR$
Corriente (intensidad de flujo de carga)	Ampere	$I = \frac{Q \text{ (coulombs)}}{t \text{ (segundos)}}$	$Q = I t$; $W = \text{energía} / t$
Potencia (energía por Segundo)	Watt	$W = \frac{Q \text{ (coulombs)} * E \text{ (volts)}}{t \text{ (segundos)}}$	$W = EI$; $W = \text{energía} / t$
Resistencia	Ohm	$R = \frac{E \text{ (volts)}}{I \text{ (amperes)}}$	_____

Nota: Domic (2001)

2.3.4.5 Requerimientos energéticos

Los requerimientos de energía para una operación de EW son importantes. (Domic, 2001)

$$Energia = \frac{1}{n} * \frac{(amperaje * segundo) * voltios}{3600 segundos} = (Wh)$$

(Domic, 2001)

Voltaje de descomposición

para que una reacción electroquímica proceda bastaría con aplicar una fuerza electromotriz, FEM, equivalente a la suma de los voltajes requeridos por los ánodos y cátodos, respectivamente.

Este voltaje está relacionado con el voltaje de la celda o voltaje teórico mínimo necesario para realizar un electrolito dado.

En principio, tan pronto se alcanza este voltaje entre un ánodo y un cátodo tiene lugar la electrolisis. (Chamorro & Jimenez, 2011)

2.3.4.5.1 Medidores eléctricos

- Amperímetro (A): se emplea para medir la intensidad de corriente que pasa a través de un conductor o una resistencia. El amperímetro es conectado en serie y por ello se diseña con la menor resistencia posible. Cuando se dice que el amperímetro es ideal se considera que la resistencia interna es cero. La lectura del amperímetro es la intensidad (I). (Calloapaza, 2020)



- Voltímetro (V): se emplea para medir la diferencia de potenciales entre dos bordes del circuito y de una resistencia. Se conecta en paralelo y por ello se diseña con la mayor resistencia posible.

Voltímetros ideales: es aquella cuya resistencia interna es considerada infinita tal que por el voltímetro no pasa corriente.

Voltímetro real: es aquella cuya resistencia interna no es infinita, pero si es grande tal que por el voltímetro la corriente circulante es muy pequeña. (Calloapaza, 2020)

2.3.4.6 Reacción química

Una reacción química es un proceso mediante el cual una o más sustancias (elementos o compuestos) denominados reactivos, sufren una transformación para dar lugar a sustancias diferentes denominadas productos.

Las reacciones químicas conllevan generalmente la ruptura de los enlaces químicos de los reactivos y la formación de nuevos enlaces para obtener los productos. La ruptura de enlaces precisa generalmente la aportación de una cierta cantidad de energía, mientras que la formación de enlaces la libera; el resultado neto de dichos intercambios de energía puede ser positivo en cuyo caso la reacción es exotérmica (desprende calor) o negativo cuando la reacción es endotérmica (precisa la aportación de calor para producirse).

En algunos casos, para que la reacción comience, es necesaria la aportación de una cierta energía inicial que se denomina energía de



activación, cuando ello no es necesario, y la reacción entre los productos comienza por si sola a temperatura y presión al ambiente, la reacción se denomina espontánea. Estos intercambios de calor son objeto de estudio de la termodinámica. (Calloapaza, 2020)

2.3.4.6.1 Reacción catódica

La reacción en el cátodo en la separación por electrolisis es la deposición de cobre en la lámina de acero inoxidable, esta viene dada por:

La reducción del ion cúprico:



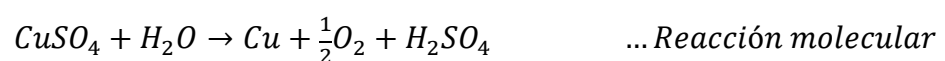
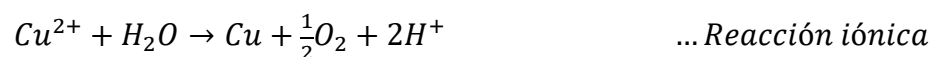
2.3.4.6.2 Reacciones anódicas

En electroobtención de cobre, el ánodo es una aleación inerte que no participa en la reacción, pero que actúa solamente como soporte electrónico; de tal modo que la reacción principal es la descomposición de solvente según:

La reacción del agua:



2.3.4.6.3 Reacción redox total



Para realizar la electrolisis es necesario aplicar entre los electrodos una diferencia de potencial mayor que la diferencia de potencial mínima de electrolisis. Para la obtención en condiciones estándar esta diferencia de potencial mínima.(Aredo & Villanueva, 2016)

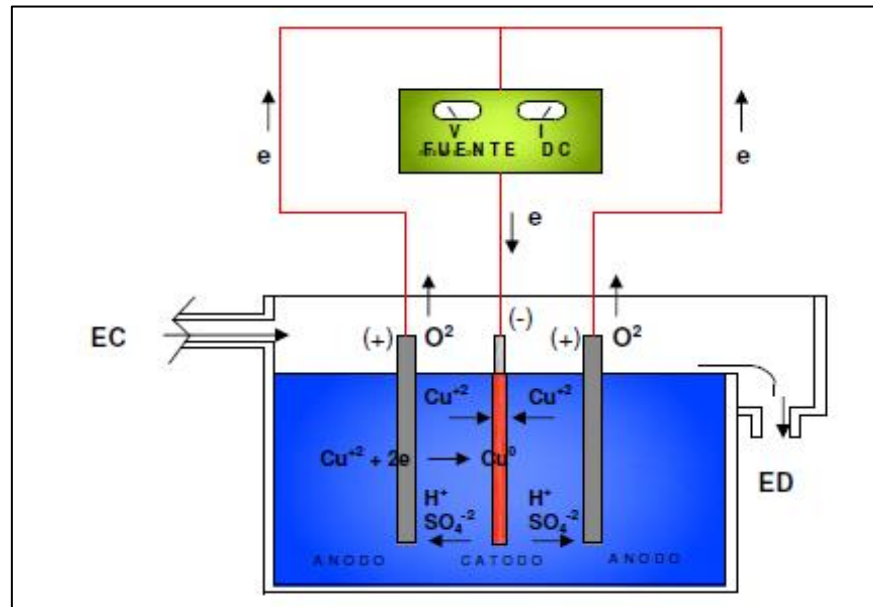
$$E_r^0 = E_c^0 - E_a^0$$

$$E_r^0 = 0.34 - 1.23v$$

$$E_r^0 = -0.89v$$

Figura 7

Proceso de electrodeposición de cobre.



Nota: Soto (2012)

2.3.4.7 Reacción electroquímica

Una reacción electroquímica la podemos definir como una reacción redox en la que el intercambio de electrones tiene lugar en un electrodo. El cambio químico es producido por el intercambio de electrones realizado entre un electrodo y un aceptor o donador de electrones en una disolución.



Se diferencia de una reacción química redox en que el donador o aceptor de electrones, es el electrodo (al que se comunica un potencial eléctrico) donde se realiza la transferencia electroquímica, cambiando de un medio homogéneo (reacción química) a un medio heterogéneo (reacción electroquímica). (Calloapaza, 2020)

2.3.4.7.1 Beneficio, purificación y electrodeposición

- Es un proceso más rápido se realiza en horas
- El producto que se obtiene es de mejor calidad alcanzando el 99,599% de pureza del cobre en los ánodos.
- En el proceso se requiere menor mano de obra.
- Es un proceso más limpio, ya que la solución acida que se produce después del proceso se puede llegar a recircular. (Calloapaza, 2020)

2.3.4.8 Las variables aplicadas en el proceso de electrodeposición

El proceso de electrodeposición es utilizado para depositar una capa de material metálico electrolíticamente. Las variables principales que se deben de controlar durante el proceso de electrodeposición son:

2.3.4.8.1 Tiempo de deposición

Es un factor crucial que afecta el grosor y la calidad del recubrimiento de cobre obtenido. Este tiempo depende de la intensidad de corriente.

2.3.4.8.2 La densidad de corriente



Es una medida de la intensidad de aplicación de energía eléctrica por unidad de área y esta expresada en A/m^2 (A/ft^2). Se calcula dividiendo los amperios que influyen a través de una celda, entre el área de la superficie de deposición catódica en la celda. Un incremento en la densidad de corriente operativa en electrodeposición produce cátodos inaceptables por su rugosidad, porosidad y contaminación, para DC bajas el depósito catódico es adherente y de grano fino. El valor de la densidad de corriente a partir de la cual estas condiciones ocurren ha sido denominado “densidad de corriente límite”. Además de la tensión de descomposición deben vencerse la resistencia del electrolito, resistencia de los conductores eléctricos y contactos, y aplicar una sobretensión anódica y catódica para hacer posible el proceso. (Escobar, 2018)

Por tanto, es necesario encontrar un equilibrio entre el ratio de partículas depositadas y el tiempo empleado en la electrodeposición. En el caso de los recubrimientos de cobre y níquel, la densidad de corriente aplicada es de $2 A/dm^2$ para el cobre y en el níquel puro $5 A/dm^2$. (Aredo & Villanueva, 2016)

$$i_c = \frac{I}{NS} \text{ [Amp/m}^2\text{]}$$

Donde:

i_c = Densidad de corriente catódica (Amp/m^2)

I = Intensidad de corriente (Amperios)

N = Número de cátodos en la celda



$S = \text{Área de la superficie del cátodo en contacto con el electrolito,}$
 m^2

2.3.4.8.3 Temperatura

La temperatura es la medida de la energía cinética “promedio” que posee cada molécula del cuerpo. Por consiguiente, un objeto de mayor temperatura que otro, tiene mayor energía cinética promedio por molécula. A mayor temperatura, mayor movimiento molecular, generalmente la densidad disminuye con la temperatura.(Custodio, 2005)

Aumentando la temperatura se aumenta la velocidad de difusión y la tasa de crecimiento de los cristales. Ambos factores favorecen la formación de un depósito más grueso. De esta manera, el aumentar la temperatura permitirá formar un depósito más coherente y grueso. (Domic, 2001)

2.3.4.8.4 Deposición del metal

La cinética de deposición de metales, de acuerdo a las leyes a Faraday, depende solamente de la corriente aplicada y no de otros factores tales como temperatura, concentración, u otros. Sin embargo, la calidad del depósito del metal está relacionada directamente con estos factores. Los depósitos eléctricos de metales son siempre cristalinos, pero pueden variar desde un depósito adherente, grueso, de granos grandes, hasta un depósito pulvulento, de granos finos y poco adheridos. La forma del depósito depende de muchos factores. (Domic, 2001)

2.3.4.8.5 Voltaje de celda



El proceso de electroobtención comprende el cambio de las especies iónicas a las especies atómicas de tal manera que se requieren una energía definida y un voltaje de descomposición. (el sobre voltaje anódico depende de la densidad de corriente, de la temperatura y de la naturaleza del ánodo) este sobre voltaje se aplica para proveer la energía de activación que provoca la combinación de los átomos de oxígeno absorbidos y la formación del gas oxígeno (O_2). El voltaje total de celda para electrodeposición está en el rango de 2 a 2,5 V, comparando a solamente 0,2 – 0,25 V para la refinación del cobre. (Escobar, 2018)

2.3.4.8.6 pH

El pH de una disolución se puede medir experimentalmente usando indicadores coloreados o bien mediante un medidor electrónico (pH-metro) que proporciona una medida más precisa. En esta práctica vamos a usar dos indicadores, uno que cambia de color en la zona acida (naranja de metilo) y otro que lo hace en la alcalina (fenolftaleína). La zona de cambio de color o zona de viaje depende del valor de la constante de acidez del indicador. Con un pH-metro mediremos de forma más exacta la concentración de protones de las soluciones. (Peinado & Meléndez, 2017)

2.3.4.8.7 Rectificador de corriente

Transforma la corriente alterna a corriente continua y normalmente se compone de:



- a) Un transformador principal de corriente, que transforma la corriente eléctrica alterna de 110, 220 o 380 voltios de tensión en corriente alterna de baja tensión, 4, 6, 8, 12, ... voltios.
- b) Células rectificadoras, que tienen por misión transformar la corriente alterna a baja tensión regulada, en corriente continua a baja tensión regulada. La calidad de la corriente continua dependerá del diseño del rectificador.
- c) Los parámetros de medida: amperímetro y voltímetro. Es importante que estos elementos tengan una amplia escala de lectura, y una precisión tal que nos de seguridad de los datos obtenidos.
- d) Los dispositivos de mando y protección.

El mando se efectuará por medio de un botón pulsador de mando, que por intermedio de un fusible permita a la corriente eléctrica llegar al transformador.

- e) Las pletinas y cableado.

Todos estos elementos deben estar correctamente aislados y conectados. (Panchi, 2009)



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo en el laboratorio de Electrometalurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional del Altiplano, ubicada en la ciudad de Puno, en la región altiplánica del sur de Perú, a orillas del lago Titicaca y a una altitud de 3,827 msnm.

3.2 PROCEDENCIA DEL MATERIAL ESTUDIADO

Equipos:

- Balanza
- Balanza analítica
- Termómetro c/alcohol escala Ext. -20 a + 110°C Boeco
- Multímetros (gold power DT830L)
- Cronómetro
- Rectificador de corriente
- Celda de electrodeposición
- Cátodos
- Ánodos
- Vernier caliper

Materiales

- Vaso de vidrio (Beaker), 1000 ml
- Vaso de vidrio (Beaker), 250ml
- Pipeta serológica 1/10 "A" de 10 ml.



- Bombilla propipeta
- Agua acidulada
- Agua destilada
- Cable flexible de 0.3mm diámetro
- Sulfato de cobre 5-hidratado 99%
- Guantes y equipo de protección personal (EPP)
- Cuchara de plástico
- Cucharon de plástico
- Lapiceros
- Cuaderno de apuntes

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO

La población considerada es la solución de sulfato de cobre, denominada electrolito, compuesta por sulfato de cobre pentahidratado y agua acidulada. Para los experimentos, se utiliza una muestra de esta solución para evaluar los efectos de la densidad de corriente y el tiempo en el proceso de electrodeposición en una celda electrolítica.

- **Población**

12 litros de solución de sulfato de cobre, formulada con sulfato de cobre pentahidratado disuelto en agua acidulada.

- **Muestra**

Los 700 ml de solución sulfato de cobre, propuestos como muestra, fueron seleccionados para asegurar un equilibrio entre la capacidad de la celda, la cantidad de



electrolito necesaria para realizar las pruebas de electrodeposición, y la eficiencia en el uso de los materiales durante los experimentos.

Se calculó en función a las dimensiones de la celda y la distribución de la solución en la celda.

Dimensiones de la celda: 6.3 x 11.07 x 14.4 cm

Área del cátodo: $1 \text{ dm}^2 = 100 \text{ cm}^2$

El volumen de la celda está dado por:

Volumen de la celda = $6.3 \text{ cm} * 11.07 \text{ cm} * 14.4 \text{ cm}$

Determinar el volumen necesario para cubrir el área de 1 dm^2

El volumen de la solución necesaria para cubrir el área del cátodo se ha calculado un volumen necesario para cubrir el área de 100 cm^2 (el cátodo) con una altura h de solución. La celda tiene un largo de 11.07 cm y un ancho de 6.3 cm.

volumen de solución necesario = Área * Altura de solución

volumen de solución necesario = $100 \text{ cm}^2 * h$

El volumen disponible de la celda es: 1004 ml

$1004 \text{ ml} = 100 \text{ cm}^2 * h$

$h = 10.04 \text{ cm}$

por lo tanto, una altura de 10.04 cm de solución cubrirá todo el cátodo (1 dm^2) con el volumen total de la celda.

Determinar la cantidad de solución que se utiliza en la práctica.



Volumen de solución necesario = 6.3 cm * 11.07 cm * 10.04 cm

Volumen de solución necesario = 700 ml

3.4 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

3.4.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es cuantitativa y experimental, ya que permite evaluar el efecto de cada una de las variables independientes y en determinar las condiciones óptimas para la fabricación de láminas de arranque.

3.4.2 Diseño experimental

En este trabajo se desarrollará el diseño factorial 2^2 , es decir, con dos factores y dos niveles. El factor A corresponde a la densidad de corriente y el factor B al tiempo.

3.4.2.1 Matriz de diseño

La siguiente tabla presenta los experimentos realizados de acuerdo con los niveles de los factores.

Tabla 7

Matriz de diseño

Variable		Contribución de tratamientos	Descripción	Anexo
A	B			
-	-	2.5 A/dm ² , 24 min	Baja densidad, corto tiempo.	Anexo 7
+	-	3.5 A/dm ² , 24 min	Alta densidad, corto tiempo.	Anexo 8
-	+	2.5 A/dm ² , 60 min	Baja densidad, largo tiempo.	Anexo 14



+ + 3.5 A/dm², 60 min Alta densidad, largo Anexo 15
tiempo.

En la tabla 7 se visualiza la matriz de diseño, considerando los variables mínimos y máximos de la variable densidad y tiempo, cuyas fotos están en los anexos que se indica.

Se menciona el experimento que conforma intensidad mínima (2.5 A/dm²) y tiempo máximo (60 min) se tiene el resultado más óptimo con 99.87 % refinado según el análisis del anexo 18.

3.4.3 Variables independientes para la electrodeposición son:

- Densidad de corriente catódica, medida en A/dm²
- Tiempo de deposición de cobre, medido en minutos.

3.5 PROCEDIMIENTO

Antes de comenzar los experimentos, es fundamental utilizar los equipos de protección personal (EPP) para evitar accidentes, especialmente debido al manejo de sustancias químicas peligrosas.

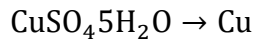
3.5.1 Masa molecular del sulfato de cobre pentahidratado CuSO₄ · 5H₂O

La masa molar de CuSO₄ · 5H₂O es 249.72 g/mol

La masa molar de (Cu) es 63.55 g/mol

3.5.2 Calculo de la cantidad de sulfato de cobre (CuSO₄ · 5H₂O) necesaria para obtener 50 g/L de cobre (Cu²⁺)

Para obtener 50 g/L de cobre (Cu²⁺), usamos una regla de tres para relacionar la cantidad de CuSO₄ · 5H₂O con cantidad de cobre.



$$x \rightarrow 50 \text{ g/L}$$

$$249.72 \text{ g/mol CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow 63.55 \text{ g/mol de Cu}$$

$$x \rightarrow 50 \text{ g/L Cu}$$

$$x = \frac{249.72 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} * 50 \frac{\text{g}}{\text{L}}}{63.55 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}$$

$$x = 196.47 \text{ g CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O por L} * 12 \text{ L} = 2357.64 \text{ g CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$$

Para preparar 12 L de una solución con una concentración de 50 g/L de cobre, se necesitan aproximadamente 2357.64 g de sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

- a) Preparación del electrolito: Se preparó una solución de sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) en agua acidulada, con una concentración de 50g/L de cobre. La solución se agito manualmente durante 30 minutos para garantizar una mezcla homogénea. En la Figura 13 se observa el aspecto de la solución preparada.

Figura 8

Solución de sulfato de cobre



- b) Instalación de la celda: se utilizó una celda de PVC con dimensiones de 6.3 x 11.07 x 14.4 cm y una capacidad de 700 ml. Equipadas con barras conductoras de platino de cobre de 1" de ancho y 1/32" de espesor. La figura 14 muestra la celda instalada.

Figura 9

Celda instalada



- c) Dimensiones de los electrodos: Se utilizaron 01 ánodo y 01 cátodo de acero inoxidable ASTM 304, ambos con dimensiones de 10 x 18 cm y un espesor de 1/32". Los electrodos fueron ajustados para trabajar con un área efectiva de 100 cm² (equivalente a 1dm²). Antes de la instalación, se pesó el cátodo para registrar su masa inicial. posteriormente se colocaron cubrepuntas de cable de 2 mm de diámetro alrededor de los bordes del cátodo, asegurando un sellado completo. En la Figura 15 se muestra el cátodo con los cubrepuntas instalados.

Figura 10

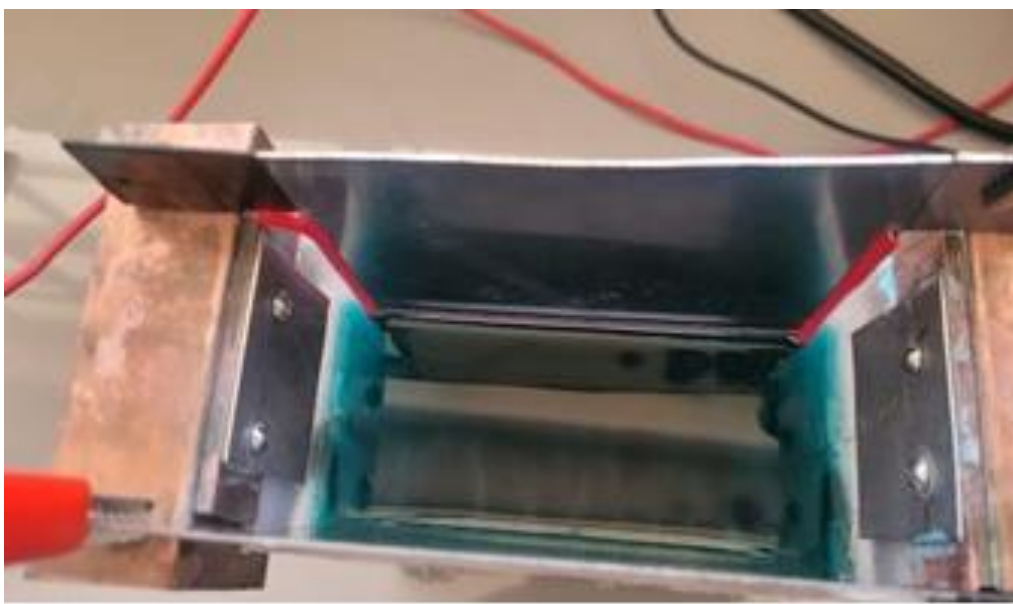
Cátodo de acero inoxidable



- d) Montaje de la celda: se ensambla la celda electrolítica, agregando la solución previamente preparada y colocando los electrodos en su posición. El área del cátodo sumergida era de 1dm^2 , y la distancia entre el ánodo y cátodo se fijó en 5.6 cm. La Figura 16 presenta el montaje final de la celda.

Figura 11

Montaje de celda.



- e) Conexión del sistema: se utilizó un rectificador de corriente de 10 A con un voltaje ajustable en el rango de 0 y 12 V. la conexión eléctrica se realizó mediante cables conductores de 2 mm de diámetro, conectando la fuente de alimentación a los terminales del ánodo y el cátodo. Esta configuración asegura la eficiente transmisión de corriente a través de los electrodos, lo que permite el correcto funcionamiento del proceso de la electrodeposición. La Figura 17 muestra el sistema conectado.

Figura 12

Conexión del sistema



- f) Cátodo de arranque: como resultado del proceso de electrodeposición, se obtuvo una lámina de cobre con un espesor de 0.5 mm, con un peso de 16.81 g y una pureza de 99.87%. La Figura 18 presenta el cátodo de arranque obtenido.

Figura 13

Cátodo de arranque



3.5.3 Metodología experimental para evaluar la influencia de la densidad de corriente.

Se utilizaron 700 ml de solución en cada experimento medidos en un vaso precipitado de 1000 ml. Se realizaron 05 experimentos variando las densidades de corriente y manteniendo un tiempo constante de 20 minutos para cada corrida.

Tabla 8

Experimentos variando la densidad de corriente con un tiempo de 20 minutos.

Nro. de experimentos	DC (A/dm ²)
Prueba 01	0,50
Prueba 02	1,50
Prueba 03	2,50
Prueba 04	3,50
Prueba 05	4,50



3.5.4 Metodología experimental para evaluar la influencia del tiempo.

Se tomaron nuevamente 700 ml de solución para cada experimento, medidos en un vaso precipitado de 1000 ml. Manteniendo una densidad de corriente constante de 2,50 A/dm². Se realizaron 05 experimentos variando los tiempos de deposición en minutos

Tabla 9

Experimentos variando el tiempo en minutos con una densidad de corriente 2,50 A/dm²

Nro. de experimentos	Tiempo (minutos)
Prueba 06	12
Prueba 07	24
Prueba 08	36
Prueba 09	48
Prueba 10	60



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados de los experimentos de electrodeposición de cobre, orientados a la obtención de láminas de arranque. Los experimentos se realizaron variando dos parámetros clave: La densidad de corriente y el tiempo de la operación. Para determinar la masa teórica de cobre depositado durante las pruebas, se realizó la ley de Faraday, la cual permite calcular este valor en función de los parámetros operacionales establecidos. Tras cada prueba, se pesaron las láminas en una balanza electrónica y, mediante una operación de resta, se obtuvo la masa de cobre depositada en el cátodo de acero inoxidable.

Además, el análisis de pureza de las láminas de cobre fue certificado por el laboratorio metalúrgico de CEPROMET, Minera Provenir SAC.

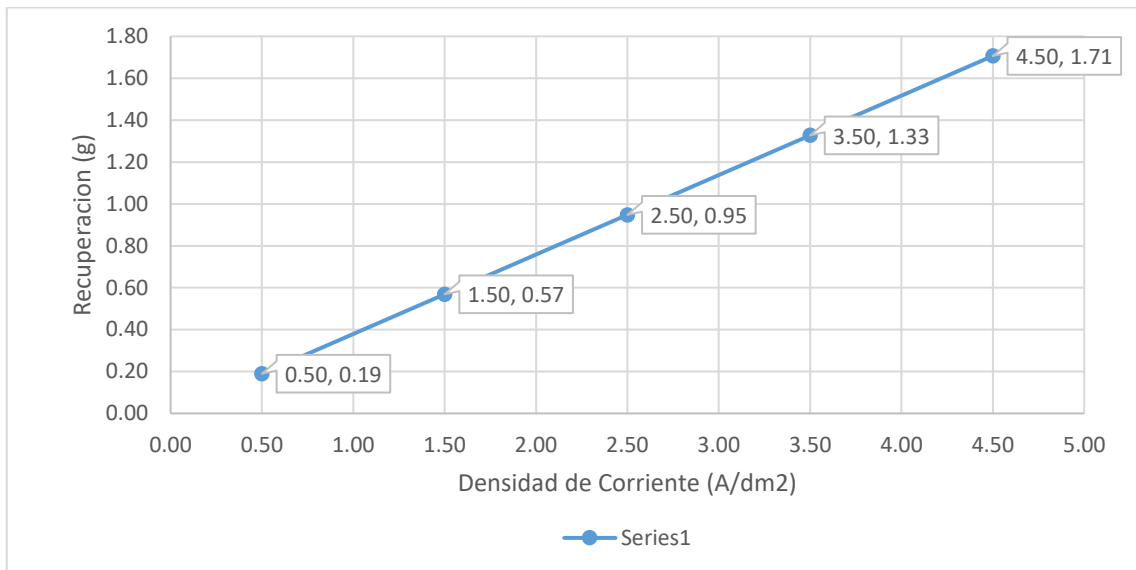
Tabla 10

Depósito de cobre con variación de la densidad de corriente a un tiempo constante de 20 minutos.

Nro experimento	Densidad de corriente (A/dm ²)	Producción recuperada (g)	Porcentaje de recuperación (%)
Prueba 01	0.50	0.19	81.00
Prueba 02	1.50	0.57	89.44
Prueba 03	2.50	0.95	96.19
Prueba 04	3.50	1.33	96.91
Prueba 05	4.50	1.71	97.31

Figura 14

Recuperación de cobre con variación de la densidad de corriente.

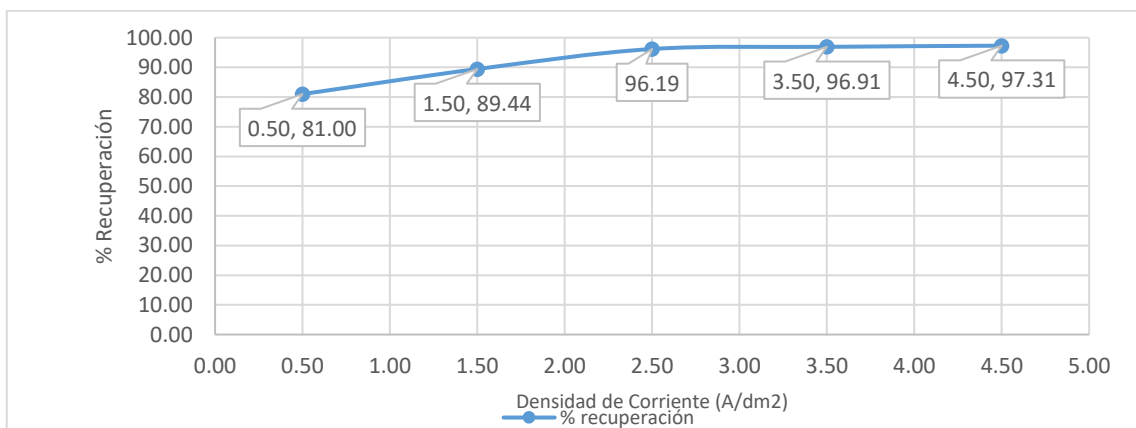


- **Interpretación**

En la tabla 10 y figura 14 muestran los resultados de la recuperación de cobre con la variación de la densidad de corriente, manteniendo un tiempo constante de 20 minutos. Se observa una clara tendencia: a medida que la densidad de corriente aumenta, también lo hace la cantidad de cobre recuperada. Al trabajar con una densidad de 0.50 A/dm², la recuperación es de solo 0.19 g. de cobre, mientras que a 4.50 A/dm², la recuperación fue de 1.71 g. Esto indica que una mayor densidad de corriente favorece la electrodeposición de cobre.

Figura 15

Porcentaje de recuperación de cobre con variación de la densidad de corriente.



- **Interpretación**

En la tabla 10 y figura 15 muestran que una mayor densidad de corriente favorece la electrodeposición de cobre, con porcentajes de recuperación que alcanzan el 97% a partir de 2.50 A/dm^2 , lo que refleja una alta eficiencia del proceso. Esto sugiere que, dentro de este rango de densidad de corriente, el proceso de electrodeposición es altamente eficiente, maximizando el uso del sulfato de cobre.

Ruiz & Juárez (2022) menciona la densidad de corriente igual a 142 A/m^2 después de 6 horas, las condiciones electrolíticas permiten recuperar el 60 % de cobre presenta en la solución rica en cobre (obtenida en el despojo). Además, la eficiencia de corriente para el proceso de electrodeposición fue de 86 %.

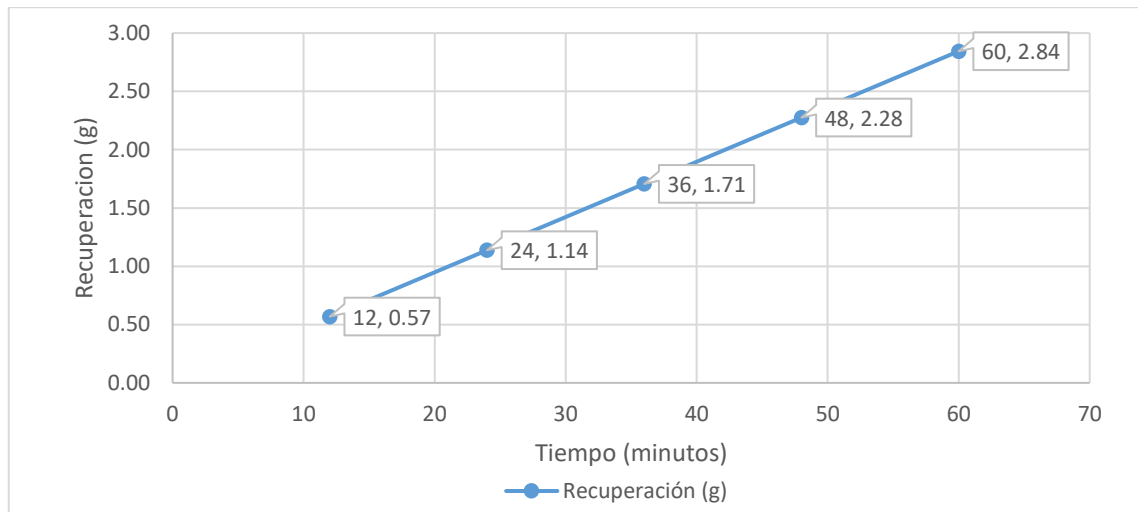
Tabla 11

Depósito de cobre con variación del tiempo a una densidad de corriente constante de 2.50 A/dm^2

Nro experimento	Tiempo (minutos)	Producción recuperada (g)	Porcentaje de recuperación (%)
Prueba 06	12	0.57	96.19
Prueba 07	24	1.14	96.19
Prueba 08	36	1.71	96.47
Prueba 09	48	2.28	96.52
Prueba 10	60	2.84	96.52

Figura 16

Depósito del cobre con variación del tiempo.



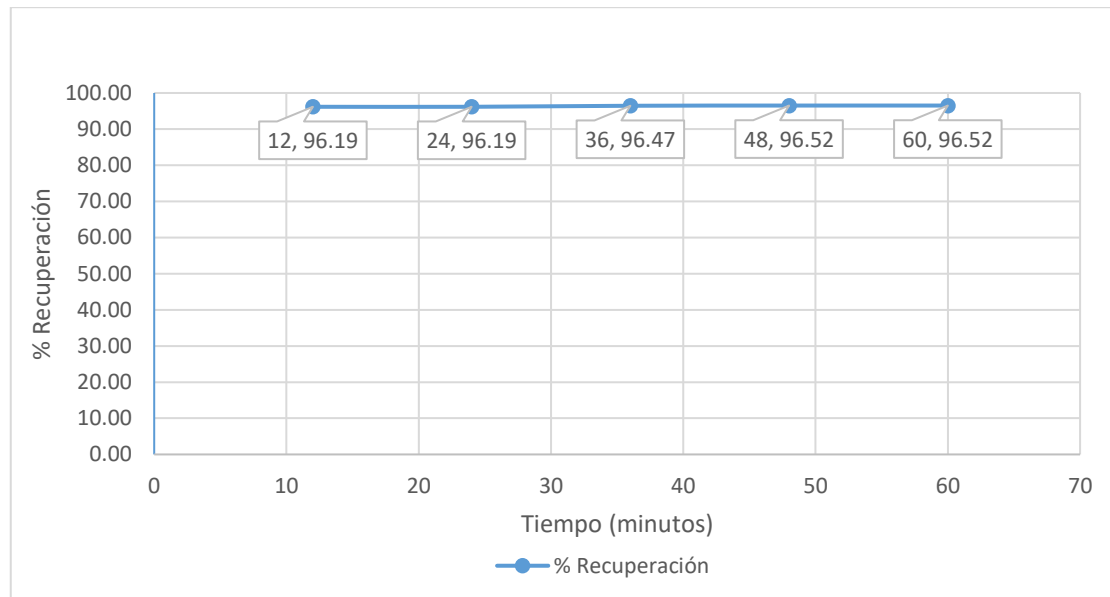
- **Interpretación**

En la tabla 11 y figura 16, presentan los resultados obtenidos, al evaluar la influencia del tiempo en la recuperación de cobre, manteniendo una densidad de corriente constante de 2.50 A/dm^2 . Se observa que el tiempo de deposición tiene un efecto significativo en la cantidad de cobre recuperado: en 12 minutos se recuperaron 0.57 g, mientras que en 60 minutos se alcanzó una recuperación de 2.84 g. esto confirma que un tiempo de prolongación permite que más cobre se deposite en el cátodo, en concordancia con la teoría de que la cantidad sustancias depositada proporcional al tiempo de aplicación de la corriente.

Escobar (2018) identificó una densidad de corriente optima de 278.3 A/m^2 y también notó que un incremento en el voltaje no afectaba la calidad del cobre depositado. (Lizzetti Diaz, 2021) Menciona 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 1,0829g manteniendo la misma condición de la corrida.

Figura 17

Porcentaje de recuperación de cobre con variación del tiempo.



- **Interpretación**

En la tabla 11 y figura 17, muestran que los porcentajes de recuperación permanecen relativamente constantes, entre 96.19% y 96,52%. Esto sugiere que, aunque el tiempo de deposición aumenta la masa de cobre recuperada. Esto sugiere que la eficiencia del proceso se estabiliza, alcanzando un equilibrio en la cantidad de cobre que puede recuperarse bajo estas condiciones. obtención de lámina de cobre

4.2 OBTENCIÓN DE LÁMINA DE COBRE

La obtención de la lámina de cobre obtenida a través del proceso de electrodeposición de una solución de sulfato de cobre fue evaluada en el laboratorio metalúrgico de CEPROMET, Minera Provenir S.A.C.

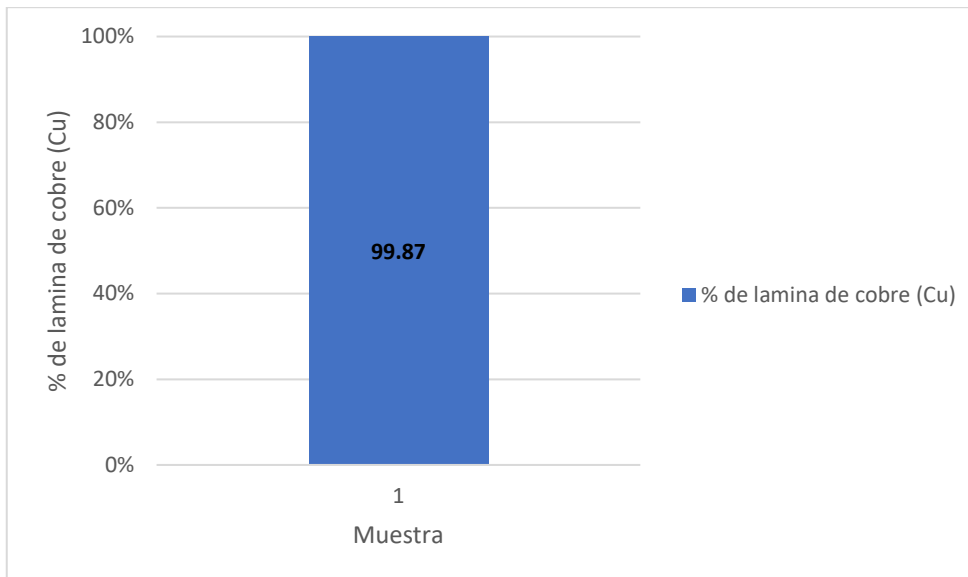
Tabla 12

Pureza de la lámina de cobre obtenida.

ITEM	Código	% de lámina de cobre (Cu)
1	HC	99.87

Figura 18

Lamina de arranque



- **Interpretación**

En la tabla 11 y figura 12 se presenta los resultados de la obtención de lámina de cobre a partir de la electrodeposición de solución de sulfato de cobre en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – Puno, se obtuvo una lámina de cobre con una pureza de 99.87 %, con una estructura uniforme color rojizo brillante y sin defectos visibles. Estos resultados fueron corroborados en el laboratorio de la empresa CEPROMET, Minera Provenir SAC. Y demuestran que un proceso optimizado de la electrodeposición permite obtener láminas de cobre de alta calidad.



V. CONCLUSIONES

La investigación realizada sobre la fabricación de láminas de arranque para cátodos de cobre en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNA - Puno, ha logrado resultados significativos en cuanto a pureza y eficiencia, del proceso de electrodeposición de cobre, cumpliendo con los objetivos propuestos. Estos resultados respaldan la relevancia de ajustar adecuadamente los parámetros en la electrodeposición para obtener productos de alta pureza y contribuir a la viabilidad económica del proceso en la industria metalúrgica.

Respecto a la densidad de corriente, en cinco pruebas experimentales realizadas con densidades de corriente de 0.50 A/dm^2 , 1.50 A/dm^2 , 2.50 A/dm^2 , 3.50 A/dm^2 , 4.50 A/dm^2 , y un tiempo de 20 minutos, se calcula que la densidad de corriente de 2.50 A/dm^2 alcanzó el mayor porcentaje de recuperación de cobre (96.19 %), destacándose como la más eficiente en las condiciones experimentales planteadas.

En relación con el efecto del tiempo de electrodeposición, en cinco pruebas experimentales con tiempos de 12, 24, 36, 48 y 60 minutos, utilizando una densidad de corriente constante de 2.50 A/dm^2 , se obtuvo el mayor porcentaje de recuperación 96.52 % con un tiempo de 60 minutos, evidenciando que este tiempo es el más adecuado para maximizar la recuperación de cobre. Este resultado evidencia que dicho tiempo es el más adecuado para maximizar la recuperación de cobre y obtener láminas de arranque con espesores óptimos 01 mm.

Además, una réplica de la prueba de electrodeposición durante 6 horas, con la misma densidad de corriente de 2.50 A/dm^2 , permitió obtener una lámina de arranque de cobre con un espesor de 0.5 mm, un peso de 19.81 g y una pureza de 99.87 %. Estos hallazgos subrayan que una manipulación precisa de los parámetros de densidad de



corriente y tiempo no solo mejora la eficiencia de recuperación de cobre, sino también el grosor y la calidad de la lámina obtenida, aspectos esenciales para la fabricación de cátodos de alta pureza.



VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar experimentando con densidades de corrientes superiores a $2,50 \text{ A/dm}^2$ y tiempos de deposición más largas, dado que ambos factores han demostrado incrementar la cantidad de cobre depositado. Esta optimización permitirá mejorar la eficiencia del proceso de electrodeposición y obtener mejores resultados en cuanto a la recuperación de cobre.

Dado el éxito del proceso en escala de laboratorio, se sugiere llevar a cabo pruebas en escalas mayores para determinar la viabilidad y eficiencia del proceso en aplicaciones industriales. Esto facilitara a la industria metalúrgica local.

Implementar estos estudios en entornos académicos no solo permitirá un aprendizaje practico para los estudiantes, sino que también podría reducir los costos en la investigación relacionadas con la electrodeposición.

Para las investigaciones futuras sería beneficioso incorporar variables adicionales, como la temperatura del electrolito y la composición de la solución, para investigar su influencia en el proceso. Esto puede agregar información adicional para optimizar aún más la recuperación de cobre y mejorar la pureza del producto final.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Romero, R. A. (2021). *Diseño de una celda para la electrodeposición de cobre a nivel de laboratorio*. (Tesis). Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.
- Almiron Velasquez, M. L. (2016). *Investigación para la obtención de cobre electrolítico a partir de calcinas de cobre* [(Tesis). Universidad Nacional de San Agustín, Facultad de Ingeniería de Procesos, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/1900>
- Aredo Chinga, V. A., & Villanueva Murga, A. A. (2016). *Efecto de la temperatura, la concentración de sulfato de cobre y ácido sulfúrico en el electrolito, sobre la electrodeposición de cobre en cátodos de acero inoxidable 316L*. (Tesis). Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería de Minas y Metalúrgica, Escuela de Ingeniería Metalúrgica.
- Arriagada Hernández, P. A. (2006). *UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS ESCUELA DE POSTGRADO DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE ELECTRO OBTENCIÓN DE COBRE CON CÁTODO PARTICULADO MÓVIL BASADA EN ELECTRO DIÁLISIS*.
- Atkins Peter, W., & Jones Loretta, L. (2006). *Principios de Química Los caminos del descubrimiento* (3ra Ed). Argentina: Médica Panamericana S. A. <https://libreria.tirant.com/es/libro/principios-de-quimica-9789500601672>
- Calloapaza Canaza, J. (2020). *Obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional Ingeniería Metalúrgica UNA Puno 2018*. (Tesis). Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.
- Campo García, G. A. (2015). *“Evaluación física y química del efecto de un campo magnético en la electrodeposición de Ni en acero bajo carbono.”* (Tesis). Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Química.



- Chamorro Camasca, G., & Jimenez Ygnacio, 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*. (Tesis). Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Química.
- Chang, R. (2002). *Química General* (7Th Ed). México: Mc Graw - Hill. Interamericana.
<http://en.scientificcommons.org/48774967>
- Custodio, G. (2005). Elemental física 7. In "IMPERIO": Lima -Perú (Ed.), 1.
<https://pap.es/articulo/13186/febre-sin-foco>
- Del Castillo Rodríguez, F. D. (2008). Principio de electrodeposición. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencia y Nanotecnología*, 9(16), 96.
<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2016.16.56904>
- Domic Mihovilovic, E. (2001). *Hidrometalurgia: Fundamentos, procesos y aplicaciones* (sn).
https://bibliotecadigital.uchile.cl/permalink/56UDC_INST/25canv/alma991002260239703936
- Escobar Aroquipa, A. (2018). *Estudio de la densidad de corriente en la electroobtención del cobre* [(Tesis). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales].
<http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
<http://fiskal.kemenkeu.go.id/ejournal>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055>
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006>
<https://doi.org/10.1>
- Flores Tejada, J. L. (2016). *Rediseño de una cámara de lavado de cátodos de cobre electrodepositado para plantas de lixiviación de la industria minera*. (Tesis). Universidad Católica de Santa María, Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.
- Lizzetti Diaz, I. A. (2021). *Recuperación de cobre a partir de soluciones lixiviadas mediante electrodeposición*. (Tesis). Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.



- López González, L. A. (2014). *Estudio del fenómeno de desgaste en aleaciones de cobre para consumibles de proceso de arco sometido a diferentes ciclos*. (Tesis de posgrado). Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, División de Estudios de Posgrado.
- Morales Ramírez, A. (2022). *Estudio termodinámico del proceso de lixiviación con tiourea de un concentrado de calcopirita* [Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería]. https://www.mendeley.com/catalogue/65bbcebc-e070-3fa0-ac08-92aaabe9d044/?utm_source=desktop&utm_medium=1.19.8&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7Ba1306d0a-c1d8-4119-8486-abf714b043bc%7D
- Páez Collao, C. matías. (2017). *Diseño, construcción y puesta en marcha de una planta piloto de laboratorio de extracción por solventes y electro obtención de cobre*. (Tesis). Universidad Andres Bello, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ciencias de la Tierra.
- Panchi Villavicencio, V. F. (2009). *Estudio del proceso de electrodeposición de metales sobre una base polimérica* [(Tesis). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica]. https://www.mendeley.com/catalogue/1b8db3bd-6953-3292-95c7-14d535116db8/?utm_source=desktop&utm_medium=1.19.8&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B839b5336-6682-43c6-bb8d-560a6af2e707%7D
- Peinado Peinado, J., & Meléndez-valdés, F. T. (2017). Medida del pH: Disoluciones reguladoras. Precipitación isoeléctrica de la caseína. *Departamento de Bioquímica y Biología Molecular, Campus Universitario de Rabanales, Edificio Severo Ochoa, 14071-Córdoba*, 1–6. [https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/07MEDIDA pH.pdf](https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/07MEDIDA%20pH.pdf)
- Ramirez Flores, D. F. (2019). *Optimización de la calidad de cátodos de cobre obtenidos a altas densidades de corriente*. (Tesis). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Escuela de Posgrado, Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de Procesos.
- Ruiz-Sánchez, Á., & Juárez-Tapia, J. C. (2022). Obtención de cobre metálico a partir de la lixiviación de jales mineros originarios del estado de Zacatecas. *Pädi Boletín*



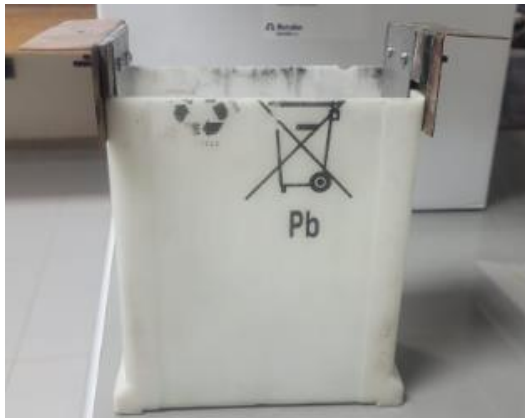
- Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 10(Especial 7), 1–9.
<https://doi.org/10.29057/icbi.v10iespecial7.9826>
- Sánchez González, J. Del, Carmen, & Gamiño Arroyo, Z. (2017). Estudio para la electrodeposición de cobre a partir de residuos electrónicos. *Jovenes En La Ciencia*, 3(2), 2402–2406.
<https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1994/1489>
- Soto Barinotto, J. R. (2012). Caracterización y optimización de parámetros de S_x/e_w para la obtención de cobre electrolítico a nivel laboratorio [Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, E.A.P. de Ingeniería Metalúrgica]. In *Repositorio UNMSM*.
<https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/2636>
- Talavera Rosales, M. Antonio. (2009). *Evaluación electroquímica de ánodos de sacrificio Al-Zn-Mg*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química.
- Terrazas Guzmán, M. (2012). *Protección catódica con ánodos de sacrificio en un prototipo de intercambiador de calor*. (tesis de magister). Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
- Villanueva Arredondo, W. A., Arce Coaquira, D. M., Sivincha Oviedo, H. D., Ñaupá Mamani, R. M., Quispe Collque, J., Molina Apfata, D. A., Huisa Alderez, P., & Roque Suasaca, Y. M. (2020). *Monografía “El cobre”* (Vol. 1).

ANEXOS

Anexo 1. Solución de sulfato de cobre



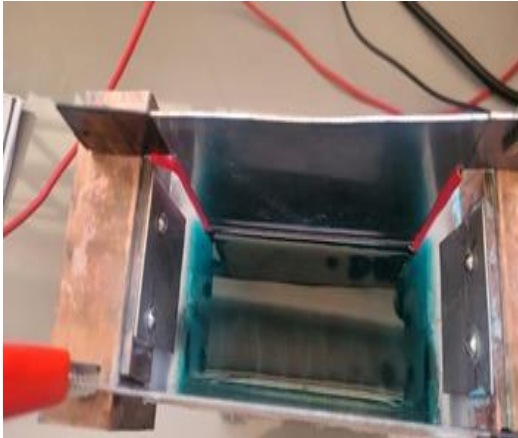
Anexo 2. Celda instalada



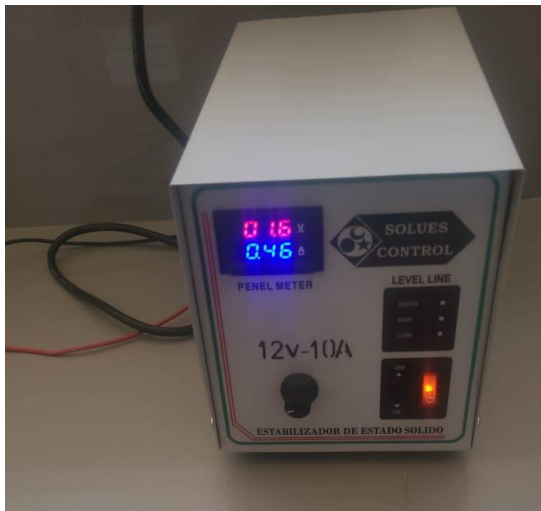
Anexo 3. Cátodo de acero inoxidable



Anexo 4 electrodos ubicados en la cuba electrolítica



Anexo 5. Equipo de rectificador de corriente



Anexo 6. Celda de electrodeposición lista para utilizar



Anexo 7. Cátodo experimental con una densidad de 0.50 A/dm^2 en un tiempo de 20 minutos.



Anexo 8. Cátodo experimental con una densidad de 1.50 A/dm^2 en un tiempo de 20 minutos.



Anexo 9. Cátodo experimental con una densidad de 2.50 A/dm^2 en un tiempo de 24 minutos.



Anexo 10. Cátodo experimental con una densidad de 3.50 A/dm² en un tiempo de 24 minutos.



Anexo 11. Cátodo experimental con una densidad de 0.50 A/dm² en un tiempo de 20 minutos.



Anexo 12. Cátodo experimental a una densidad de 2.50 A/dm² con un tiempo de 12 minutos.



Anexo 13. Cátodo experimental a una densidad de 2.50 A/dm² con un tiempo de 24 minutos.



Anexo 14. Cátodo experimental a una densidad de 2.50 A/dm² con un tiempo de 36 minutos.



Anexo 15. Cátodo experimental a una densidad de 2.50 A/dm² con un tiempo de 48 minutos.



Anexo 16. Cátodo experimental a una densidad de 2.50 A/dm² con un tiempo de 60 minutos.



Anexo 18. Cátodo experimental a una densidad de 3.50 A/dm² con un tiempo de 60 minutos.



Anexo 19. Muestra tomada después del realizar las pruebas experimentales.





Anexo 20. Cátodo de cobre.



Anexo 21. Resultados del laboratorio

CEPROMET Minera Porvenir S. A. C.

APIPA Sector IX Mz. H Lote 4 Yura Arequipa

RUC: 20455230714



LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO Informe de ensayo N° CPM-A-2024-002

Fecha : 12/09/2024
Para : Universidad Nacional Del Altiplano - Puno
Requerimiento : Análisis De Ley De Cu

Muestra

Procedencia : Puno
Tipo De Muestras : Lamina De Cobre

Resultados:

ANALISIS DE COBRE

MUESTRA	CÓDIGO	LEY Cu %
LAMINA Cu	HC	99.87 %

CEPROMET MINERA PORVENIR S.A.C.

"Comprometidos con la educación y el medio ambiente"

Anexo 22. Determinación de la masa teórica de cobre depositado en pruebas experimentales.

A partir de la ley de Faraday se puede determinar este valor. Fijando previamente los parámetros de operación definidos:

$$m = \frac{I \cdot t \cdot Pa}{n \cdot F}$$

Depósito con la variación de intensidad de corriente durante un tiempo de fijo de 20 minutos.

Prueba 1.

$$m = \frac{0,50A * 1200seg * 63,54 \frac{g}{mol}}{2 * 96500 \frac{A * seg}{mol}}$$

$$m = 0,20g$$

Prueba 2.

$$m = \frac{1,50A * 1200seg * 63,54 \frac{g}{mol}}{2 * 96500 \frac{A * seg}{mol}}$$

$$m = 0,59g$$

Prueba 3.

$$m = \frac{2,50A * 1200seg * 63,54 \frac{g}{mol}}{2 * 96500 \frac{A * seg}{mol}}$$

$$m = 0,99g$$

Prueba 4.

$$m = \frac{3,50A * 1200seg * 63,54 \frac{g}{mol}}{2 * 96500 \frac{A * seg}{mol}}$$

$$m = 1,38g$$

Prueba 5.

$$m = \frac{4,50A * 1200seg * 63,54 \frac{g}{mol}}{2 * 96500 \frac{A * seg}{mol}}$$

$$m = 1,78g$$

Depósito con la variación del tiempo utilizando una intensidad de corriente constante de 2.50 A/dm²

Prueba 6.

$$m = \frac{2,50A * 720seg * 63,54 \frac{g}{mol}}{2 * 96500 \frac{A * seg}{mol}}$$

$$m = 0,59g$$

Prueba 7.

$$m = \frac{2,50A * 1440seg * 63,54 \frac{g}{mol}}{2 * 96500 \frac{A * seg}{mol}}$$

$$m = 1,18g$$

Prueba 8.



$$m = \frac{2,50A * 2160seg * 63,54 \frac{g}{mol}}{2 * 96500 \frac{A * seg}{mol}}$$

$$m = 1,78g$$

Prueba 9.

$$m = \frac{2,50A * 2880seg * 63,54 \frac{g}{mol}}{2 * 96500 \frac{A * seg}{mol}}$$

$$m = 2,37g$$

Prueba 10.

$$m = \frac{2,50A * 3600seg * 63,54 \frac{g}{mol}}{2 * 96500 \frac{A * seg}{mol}}$$

$$m = 2,96g$$

Determinación de la eficiencia de corriente

$$\eta_I = \frac{m'}{m} \times 100$$

Peso teórico está dado por la ley de Faraday.

$$\eta_I = \frac{2,86 \text{ gr}}{2,96 \text{ gr}} \times 100$$

$$\eta_I = 96\%$$



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Georgina Yaneth Laura Concapa
identificado con DNI 70760966 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica
informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

"Fabricación de láminas de arranque para cátodos de electrodeposición de
cobre en el laboratorio de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA-PUNO
" Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 05 de diciembre del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Georgina Yaneth Laura Concape
, identificado con DNI 70760966 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

"Fabricación de laminas de arranque para catodos de electrodeposición de cobre en el laboratorio de la escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA-PUNO"

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 05 de diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella