



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

SEDE VALLENAR

FACULTAD TECNOLÓGICA

ÁREA DE GEOMINERÍA

**“OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS PARA CELDA DE  
ELECTROOBTENCIÓN, LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO, SEDE  
VALLENAR, UNIVERSIDAD DE ATACAMA”**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de  
Técnico Universitario en Metalurgia.

Profesora guía: Mg. Carolina Venegas Abarzúa

Marco Felipe Jeraldo Rivera

Carla Gabriela Orquera Godoy

Mayle Taniel Vergara Pizarro

Vallenar, Chile 2021

## **AGRADECIMIENTOS**

Estimados compañeros, estimada Mg. Carolina Venegas, y querida familia, expresó mi mayor gratitud hacia ustedes por este periodo de mucho aprendizaje, en el cual surgieron muchas dificultades, pero siempre optimistas a lograr nuestra meta y objetivo que es ser titulados de Técnico Universitario en Metalurgia.

Quiero darles las gracias sobre todo a nuestra estimada profesora guía por siempre ser una motivación para cada estudiante, ejercer con vocación es amor puro y lo refleja cada día, de todo corazón el recuerdo de ustedes siempre permanecerá en mi mente y en mi corazón, cariños y abrazos afectuosos para todos ustedes.

**Mayle Tahiel Vergara Pizarro.**

Quiero agradecer a mi madre y padre, por el apoyo que siempre me dio, para seguir adelante, agradecer a mis compañeras que fueron de bastante apoyo, y en especial a mi querida profesora guía, Mg. Carolina Venegas Abarzúa, gracias a su compromiso, pudimos cumplir con nuestra meta, la cual era conseguir aprobar el proyecto de titulación.

**Marco Jeraldo Rivera.**

Agradecer a mi hijo y mi madre, por el apoyo que siempre me brindaron, por darme energías cuando había momentos difíciles y seguir adelante, a mi Padre y mi abuelita que aunque no estaban terrenalmente siempre sentí su presencia, a mis compañeros de tesis que durante estos dos años siempre fuimos un gran equipo, especialmente a mi profesora guía Mg. Carolina Venegas Abarzúa por ser una excelente profesora que nos alentaba a seguir adelante, su gran compromiso, vocación y amor fue primordial para cumplir con nuestro propósito. Muchas gracias.

**Carla Gabriela Orquera Godoy.**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> .....                              | <b>2</b>  |
| <b>RESUMEN</b> .....                                      | <b>9</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                     | <b>11</b> |
| <b>CAPÍTULO I: MARCO INTRODUCTORIO</b> .....              | <b>13</b> |
| 1.1. INTRODUCCIÓN .....                                   | 13        |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN .....                                  | 13        |
| 1.3. OBJETIVO GENERAL .....                               | 14        |
| 1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                          | 14        |
| 1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                     | 14        |
| 1.6. ANTECEDENTES.....                                    | 14        |
| 1.7. ALCANCES .....                                       | 15        |
| <b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....                   | <b>16</b> |
| 2.2. HISTORIA DE LA METALURGIA.....                       | 17        |
| 2.3. METALURGIA DEL COBRE.....                            | 18        |
| 2.4. HIDROMETALURGIA .....                                | 19        |
| 2.5. LIXIVIACIÓN.....                                     | 20        |
| 2.5.1. TIPOS DE LIXIVIACIÓN.....                          | 20        |
| A) LIXIVIACIÓN IN SITU – IN PLACE.....                    | 20        |
| B) LIXIVIACIÓN EN BATEAS.....                             | 21        |
| C) LIXIVIACIÓN EN PILAS:.....                             | 21        |
| D) LIXIVIACIÓN EN BOTADEROS:.....                         | 22        |
| E) LIXIVIACIÓN EN COLUMNAS.....                           | 22        |
| 2.5.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....                      | 22        |
| A. PREPARACIÓN DEL MATERIAL .....                         | 23        |
| B. TRANSPORTE DEL MATERIAL A LA ZONA DE LIXIVIACIÓN ..... | 23        |
| C. FORMADO DE PILAS .....                                 | 23        |
| D. BAÑADO O RIEGO.....                                    | 23        |
| 2.6. EXTRACCIÓN POR SOLVENTES .....                       | 24        |
| 2.6.1. MECANISMO DE LA TRANSFERENCIA DE COBRE .....       | 26        |
| 2.6.3. INFLUENCIA DEL PH.....                             | 27        |
| 2.7. ELECTRÓLISIS .....                                   | 28        |
| 2.7.1. APLICACIÓN DE LA ELECTRÓLISIS.....                 | 29        |
| 2.8. ELECTROOBTENCIÓN .....                               | 29        |
| 2.9. LEY DE FARADAY .....                                 | 31        |

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.10. LA ECUACIÓN DE NERNST .....                                     | 32        |
| 2.11. LAS REACCIONES PRESENTES EN LA CELDA DE ELECTRO OBTENCIÓN. .... | 34        |
| 2.11.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE ELECTROOBTENCIÓN.....      | 36        |
| 2.11.2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROCESO DE ELECTRO OBTENCIÓN .....    | 37        |
| 2.11.3. ELECTROLITO.....                                              | 38        |
| 2.11.4. DENSIDAD DE CORRIENTE .....                                   | 38        |
| 2.11.5. ELECTRODOS .....                                              | 38        |
| 2.11.6. CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN .....                               | 39        |
| 2.11.7. TIPOS DE CELDA DE ELECTRO OBTENCIÓN .....                     | 40        |
| A. CELDAS DE LECHOS PARTICULADOS .....                                | 40        |
| B. CELDAS PARA PRODUCCIÓN DIRECTA DE LÁMINAS DE METAL.....            | 40        |
| C. CELDAS PARA PROCESAR SALES FUNDIDAS.....                           | 41        |
| D. CONVENCIONAL PARA ELECTROLISIS EN MEDIO ACUOSO .....               | 42        |
| E. CELDA CILÍNDRICA PARA ELECTROOBTENCIÓN DE ORO .....                | 42        |
| 2.11.8. ENERGÍA EN LAS CELDAS ELECTROLÍTICAS.....                     | 43        |
| A) SALES FUNDIDAS.....                                                | 43        |
| B) SOLUCIONES ACUOSAS .....                                           | 43        |
| 2.11.9. PARTES DE UNA CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN .....                 | 44        |
| <b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....</b>                                 | <b>45</b> |
| 3.1. PARÁMETROS DE ESTUDIO.....                                       | 45        |
| 3.2. PUESTA EN MARCHA DE LA CELDA .....                               | 46        |
| 3.2.1. PROCEDIMIENTO .....                                            | 48        |
| 3.3. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS A TRAVÉS DE PRUEBAS ANALÍTICAS.....     | 50        |
| 3.3.1. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL.....                          | 50        |
| 3.3.2. MEDIDAS DE SEGURIDAD .....                                     | 51        |
| 3.3.3. PROCEDIMIENTO PRUEBAS ANALÍTICAS.....                          | 52        |
| 3.3.4. DETERMINACIÓN DE COBRE POR UV-VIS .....                        | 55        |
| A. PREPARACIÓN DE CURVA DE CALIBRACIÓN .....                          | 55        |
| MATERIALES .....                                                      | 56        |
| PROCEDIMIENTO.....                                                    | 56        |
| B. LECTURA EN EL EQUIPO DE ABSORCIÓN MOLECULAR .....                  | 57        |
| <b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS .....</b>                                  | <b>60</b> |
| 4.1 PARÁMETROS SELECCIONADOS .....                                    | 60        |
| 4.2. CURVA DE CALIBRACIÓN .....                                       | 61        |
| 4.3. PRUEBAS ANALÍTICAS.....                                          | 62        |
| 4.3.1. PRIMERA PRUEBA.....                                            | 62        |

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.2. SEGUNDA PRUEBA.....                          | 65        |
| 4.3.3 TERCERA PRUEBA .....                          | 69        |
| 4.3.4 CUARTA PRUEBA .....                           | 72        |
| 4.3.5 QUINTA PRUEBA .....                           | 75        |
| <b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS .....</b> | <b>78</b> |
| 5.1. CONCLUSIONES .....                             | 78        |
| 5.2. SUGERENCIAS .....                              | 79        |
| <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                           | <b>81</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.1. FOTOGRAFÍA CAMPUS COSTANERA UNIVERSIDAD DE ATACAMA, SEDE VALLENAR .....                                                                  | 17 |
| FIGURA 2.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO HIDROMETALÚRGICOS DEL COBRE. ....                                                                         | 19 |
| FIGURA 2.3. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LIXIVIACIÓN IN SITU. ....                                                                                  | 20 |
| FIGURA 2.4. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LIXIVIACIÓN EN BATEA.....                                                                                  | 21 |
| FIGURA 2.5. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LIXIVIACIÓN EN PILAS .....                                                                                 | 21 |
| FIGURA 2.6. ESQUEMA CÍCLICO (CONCEPTO DE ANILLOS) DEL PROCESO LIXIVIACIÓN - EXTRACCIÓN POR<br>SOLVENTES - ELECTROOBTENCIÓN DE CU .....               | 25 |
| FIGURA 2.7. EFECTO DEL pH EN EXTRACCIÓN DE DIVERSOS METALES A SOLUCIÓN A OBTENER. ....                                                               | 28 |
| FIGURA 2.8. FIGURA ESQUEMÁTICA DE UN MODELO DE CELDA DE LECHO FIJO.....                                                                              | 40 |
| FIGURA 2.9. FIGURA ESQUEMÁTICA DE LAS CELDAS PARA PRODUCCIÓN DIRECTA DE METAL.....                                                                   | 41 |
| FIGURA 2.10. CELDA PARA PROCESAR SALES FUNDIDAS .....                                                                                                | 42 |
| FIGURA 2.11. CELDA PARA EL ELECTRO OBTENCIÓN DE ORO .....                                                                                            | 43 |
| FIGURA 3.1. CELDA DEL DEPARTAMENTO DE METALURGIA UNIVERSIDAD DE ATACAMA, COPIAPÓ.....                                                                | 46 |
| FIGURA 3.2. CELDA LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO, UNIVERSIDAD DE ATACAMA, SEDE<br>VALLENAR, 2019. ....                                              | 47 |
| FIGURA 3.3. CELDA LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO, SEDE VALLENAR, AÑO 2019. ....                                                                     | 48 |
| FIGURA 3.4. CELDA DEPARTAMENTO GEOMINERIA, LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO, UNIVERSIDAD<br>DE ATACAMA, SEDE VALLENAR, AÑO 2021 PUESTA EN MARCHA..... | 50 |
| FIGURA 3.5. ALUMNO USANDO E.P.P EN LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO, UNIVERSIDAD DE<br>ATACAMA, SEDE VALLENAR, AÑO 2021. ....                         | 51 |
| FIGURA 3.6. PESAJE EN BALANZA SEMIANALÍTICA DE SULFATO CÚPRICO PENTAHIDRATADO .....                                                                  | 53 |
| FIGURA 3.7. ESQUEMA DE PREPARACIÓN DE SOLUCIONES.....                                                                                                | 53 |
| FIGURA 3.8. VERTIDO DE LA SOLUCIÓN ELECTROLITO A LA CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN .....                                                                  | 54 |
| FIGURA 3.9. DISPOSICIÓN DE CÁTODOS Y ÁNODOS EN LA CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN .....                                                                    | 55 |
| FIGURA 3.10. ESTÁNDARES PARA CURVA DE CALIBRACIÓN DEL COMPLEJO TETRAAMIN COBRE(II).....                                                              | 57 |
| FIGURA 3.11. EQUIPO ESPECTROFOTÓMETRO UV-VIS LISTO PARA MEDIR LA CURVA. ....                                                                         | 59 |
| FIGURA 4.1. GRÁFICO DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN.....                                                                                                  | 61 |
| FIGURA 4.2. COBRE RECUPERADO EN LA PRIMERA PRUEBA ANALÍTICA .....                                                                                    | 62 |
| FIGURA 4.3. CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN A LAS 23 HORAS DE FUNCIONAMIENTO.....                                                                          | 63 |
| FIGURA 4.4. GRÁFICO QUE MUESTRA LA CINÉTICA DE LA PRIMERA PRUEBA ANALÍTICA .....                                                                     | 64 |
| FIGURA 4.5. COBRE RECUPERADO EN LA SEGUNDA PRUEBA ANALÍTICA. ....                                                                                    | 66 |
| FIGURA 4.6. CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN EN LA SEGUNDA PRUEBA ANALÍTICA .....                                                                           | 66 |
| FIGURA 4.7. GRÁFICO QUE MUESTRA LA CINÉTICA DEL PROCESO DURANTE LA SEGUNDA PRUEBA ANALÍTICA<br>.....                                                 | 68 |
| FIGURA 4.8 COBRE RECUPERADO EN TERCERA PRUEBA ANALÍTICA .....                                                                                        | 69 |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 4.9. CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN EN LA TERCERA PRUEBA ANALÍTICA.....                            | 70 |
| FIGURA 4.10. GRÁFICO QUE MUESTRA LA CINÉTICA DEL PROCESO DURANTE LA TERCERA PRUEBA<br>ANALÍTICA..... | 71 |
| FIGURA 4.11. CÁTODO DE COBRE RECUPERADO EN LA CUARTA PRUEBA .....                                    | 73 |
| FIGURA 4.12. CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN, CUARTA PRUEBA ANALÍTICA .....                                | 73 |
| FIGURA 4.13 GRÁFICA DE LA CINÉTICA, CUARTA PRUEBA ANALÍTICA.....                                     | 74 |
| FIGURA 4.14. CÁTODOS RECUPERADOS EN ÚLTIMA PRUEBA ANALÍTICA.....                                     | 75 |
| FIGURA 4.15. CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN, QUINTA PRUEBA ANALÍTICA.....                                 | 76 |
| FIGURA 4.16. GRÁFICA DE LA CINÉTICA, QUINTA PRUEBA ANALÍTICA.....                                    | 77 |
| FIGURA 5.1. CÁTODO CON HUINCHA AISLANTE.....                                                         | 79 |
| FIGURA 5.2. LAVADO DE ÁNODOS .....                                                                   | 80 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABLA 1.1. DIMENSIONES DE LA CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN.....                                          | 14 |
| TABLA 1.2. CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR.....                                                    | 15 |
| TABLA 2.1 COMPARACIÓN DE TIPOS DE LIXIVIACIÓN. ....                                                  | 22 |
| TABLA 3.1. DIMENSIONES DE LA CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN. (SEDE VALLENAR) .....                        | 47 |
| TABLA 4.1. ABSORBANCIA DE CADA ESTÁNDAR DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN .....                             | 61 |
| TABLA 4.2. PRIMERA PRUEBA ANALÍTICA .....                                                            | 62 |
| TABLA 4.3. CONCENTRACIÓN DE CU G/L DE LAS MUESTRAS TOMADAS A DIFERENTES<br>TIEMPOS (PRUEBA I).....   | 64 |
| TABLA 4.4. SEGUNDA PRUEBA ANALÍTICA .....                                                            | 65 |
| TABLA 4.5. CONCENTRACIÓN DE CU G/L DE LAS MUESTRAS TOMADAS A DIFERENTES<br>TIEMPOS (PRUEBA II) ..... | 67 |
| TABLA 4.6. TERCERA PRUEBA ANALÍTICA.....                                                             | 69 |
| TABLA 4.7 CONCENTRACIÓN DE CU G/L DE LAS MUESTRAS TOMADAS A DIFERENTES<br>TIEMPOS (PRUEBA III).....  | 71 |
| TABLA 4.8. CUARTA PRUEBA ANALÍTICA.....                                                              | 72 |
| TABLA 4.9 CONCENTRACIÓN DE CU G/L DE LAS MUESTRAS TOMADAS A DIFERENTES<br>TIEMPOS (PRUEBA IV).....   | 74 |
| TABLA 4.10. QUINTA PRUEBA ANALÍTICA.....                                                             | 75 |
| TABLA 4.11. CONCENTRACIÓN DE CU G/L DE LAS MUESTRAS TOMADAS A DIFERENTES<br>TIEMPOS (PRUEBA V).....  | 76 |

## RESUMEN

El presente proyecto de especialidad se desarrolla en el laboratorio químico metalúrgico de la Sede Vallenar de la Universidad de Atacama. En estas dependencias se cuenta con una celda de electroobtención a escala de laboratorio, que fue construida por tesistas de la carrera de T.U. en Metalurgia a finales del año 2019. Sin embargo, en la oportunidad se utilizaron ciertos parámetros y se realizaron dos experiencias que permitieron su implementación, pero aún no se logró conocer el valor óptimo de los parámetros que permitiese la obtención de cátodos de cobre de calidad a partir de una solución de concentración de hasta 30 g/L de Cobre (Cu).

El objetivo general es optimizar los parámetros: intensidad de corriente, tiempo de funcionamiento, distancia entre las placas para la misma concentración de Cu antes mencionada.

Es importante conseguir trabajar con valores óptimos de los parámetros que influyen en la electroobtención de cobre, esto para maximizar los recursos que siempre son escasos y para que todos los estudiantes del área de Geominería, puedan acceder a una formación de calidad, conociendo en forma práctica la electrodeposición de cobre a partir de soluciones de sulfato cúprico tal y como se hace en una planta de beneficio.

Los valores óptimos de los parámetros del estudio fueron: intensidad de corriente 5,5 V; distancia entre placas de 3,5 cm, lo cual permite recuperar desde la solución el 75,1% del cobre inicial en cátodos de brillo metálico consistentes y de alta pureza, el tiempo en que se pudo realizar fue de 19 horas, en tanto que la vez que se implementó nunca se pudo bajar de las 27 horas de funcionamiento. Luego de ese tiempo la concentración en la solución es insuficiente para mantener la electrodeposición y comienza la formación de óxido, la que daña además los cátodos formados. Como conclusión se observa que la celda permite la obtención de cátodos de cobre de calidad a partir de soluciones de cobre de una baja a media concentración. Se sugiere seguir probando con una intensidad mayor y a la vez con mayores concentraciones de cobre en solución.

Palabras Claves

**HIDROMETALURGIA – CELDA ELECTROOBTENCIÓN – RECUPERACIÓN  
METALÚRGICA – CINÉTICA DE ELECTROOBTENCIÓN**

## **ABSTRACT**

The present specialty project was developed at the chemical and metallurgical laboratory of the Vallenar head office of the University of Atacama. In these facilities, there is a laboratory-scale electrowinning cell, that was built by thesis students of the University Technical in Metallurgy degree at the end of the year 2019. Nevertheless, in that occasion, certain parameters were used and two experiences were conducted that allow its implementation, but the optimum value of the parameters that permits the extraction of quality copper cathodes by a concentration solution from up to 30 g/L of copper (Cu) has not been known yet.

The overall aim is to optimize the parameters: current intensity, operating time, distance from the plates for the same concentration of copper aforementioned.

It is important to achieve working with optimum values of the parameters that influence the copper electrowinning to maximize the resources that are always scarce and also, to allow all the students from the geo-mining area to have access to a quality training, knowing in a practical way, the copper electroplating from cuprite sulphate solutions as made in a processing plant.

The optimum values of the study parameters were: current intensity 5,5 V; distance from plates of 3,5 centimeters, which allows to recover from the solution the 75,1% of the starting copper in cathodes of solid metallic sheen and high purity, with a completion time of 19 hours, while the time that was implemented it could never be less than 27 hours of running. After that time, the concentration in the solution is inadequate to keep the electroplating and the oxide formation begins, which damages the formed cathodes. To conclude, it is observed that the cell allows the extraction of quality copper cathodes from copper solutions of low to medium concentration. It is suggested to continue testing on a greater intensity with higher copper concentrations in the solution.

Key Words

**HYDROMETALLURGY – ELECTROWINNING CELL – METALLURGICAL  
RECOVERY – ELECTROWINNING KINETIC**

## **CAPÍTULO I: MARCO INTRODUCTORIO**

### **1.1.INTRODUCCIÓN**

Actualmente en Chile los minerales oxidados de cobre son procesados vía hidrometalurgia, el cual tiene de 3 grandes etapas, siendo la electroobtención la tercera etapa.

La celda de electroobtención, dispone alternadamente un ánodo y un cátodo, dentro de la solución electrolítica concentrada. Las placas metálicas conectadas, forman un circuito en que la corriente entra por los ánodos, y viaja a través del electrolito y sale por los cátodos, este proceso lo realizan mediante la aplicación de electricidad de baja intensidad, lo cual provoca que los cationes de Cu sean atraídos por el polo negativo y se posicionan sobre este en forma metálica y de carga cero, con una pureza de 99,99% Cu.

En el año 2019, en el Laboratorio químico metalúrgico de la Sede Vallenar de la Universidad de Atacama, se diseñó y construyó una celda de electroobtención, construida por estudiantes de la especialidad Técnico Universitario en Metalurgia, y actualmente aún está ubicada en las dependencias.

Existen diversos parámetros a considerar en el proceso de obtención de cátodos de cobre, como la concentración inicial del electrolito, el área de las placas, la distancia en que se disponen las placas unas de otras, etc.

Los estudiantes actuales de la especialidad Técnico Universitario en Metalurgia, tienen como propuesta de este trabajo de titulación poder definir aquellos valores específicos de los parámetros del proceso que permiten el funcionamiento de la celda eficientemente.

### **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Dentro de la formación profesional es muy importante conocer en forma práctica cada uno de los procesos y esta celda permite dar a conocer la electroobtención a los estudiantes. Permitirá realizar investigaciones, proyectos de títulos. Y para ello es muy importante conocer los parámetros.

### 1.3.OBJETIVO GENERAL

Optimizar parámetros de funcionamiento de celda de electroobtención del Laboratorio Químico Metalúrgico de la Sede Vallenar, UDA.

### 1.4.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Definir los parámetros relevantes del proceso que se desea optimizar.
- ✓ Realizar pruebas analíticas para los diferentes parámetros definidos.
- ✓ Establecer el valor en el cual los parámetros definidos como relevantes arrojan las mayores recuperaciones en el menor tiempo posible.

### 1.5.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existe una celda de Electroobtención en las dependencias del Laboratorio Químico Metalúrgico de la Sede Vallenar de la Universidad de Atacama, la cual fue diseñada y construida por estudiantes de la especialidad, sin embargo, a la fecha no se tiene claras aquellas condiciones en que la celda presenta mayor eficiencia en la electrodeposición de cobre en cátodos.

### 1.6. ANTECEDENTES

El Laboratorio Químico Metalúrgico de la Sede Vallenar de la Universidad de Atacama, cuenta entre sus equipos con una celda de Electroobtención a escala, la cual fue diseñada y construida por estudiantes del último año de la carrera Técnico Universitario en Metalurgia.

La estructura de la celda es de material de vidrio y tiene las siguientes dimensiones:

**Tabla 1.1. Dimensiones de la celda de electroobtención**

|         |       |
|---------|-------|
| Ancho   | 12 cm |
| Alto    | 14 cm |
| Espesor | 8 mm  |
| Largo   | 25 cm |

Fuente: Elaboración propia

El material conductor son dos placas de cobre.

La fuente de poder es un transformador de corriente con regulador de voltaje y se le soldaron soldadura de estaño a las pinzas.

**Tabla 1.2. Características del transformador**

|                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| Potencia                | 30 W            |
| Intensidad de corriente | 3800 mA         |
| Regulador de voltaje    | De 4,5 V a 16 V |

Fuente: Elaboración propia

Además de 3 ánodos de plomo y 2 cátodos de acero inoxidable, los cuales se cubren con aislante en parte, para obtener una correcta polaridad.

## **1.7. ALCANCES**

Va a apoyar a todos los estudiantes de la carrera Técnico Universitario en Metalurgia para conocer en forma práctica dichos procesos, e incluso a los estudiantes del área de Geominería, ya que les ayudará a trabajar en determinaciones prácticas, a profesores que realizan investigaciones en procesos planta, y a su vez permitirá el desarrollo de nuevas investigaciones.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. UNIVERSIDAD DE ATACAMA.**

El proyecto de optimización de parámetros de la celda de Electroobtención, se desarrolla en la Universidad de Atacama Sede Vallenar, cuyas raíces provienen históricamente de dos instituciones matrices: la Escuela de Minas y la Escuela Normal de Copiapó. La Sede Vallenar fue fundada en la ciudad de Vallenar en el año 1991. Esta prestigiosa Universidad está ubicada en el centro de la ciudad de Vallenar, capital de la provincia del Huasco.

En sus inicios la Universidad de Atacama, sede Vallenar ofreció carreras Programas Temporales Descentralizados de Tecnologías Universitarias, a las cuales se ingresa vía proceso de admisión interno organizado por el Instituto Tecnológico. En el año 1993 se incorporó el Plan Común de Ingeniería en Ciencias de la Ingeniería. A partir del año 1997, se dio inicio a Cursos de extensión y de Capacitación, organizados y ejecutados en el Campus.

En la actualidad la Universidad de Atacama, Sede Vallenar posee solo un Campus ubicado en el sector Costanera de la ciudad, el cual es llamado como su ubicación lo indica, Campus Costanera (Figura 2.1). el cual forma parte de la universidad de Atacama a partir del 2005. EL Año 2019, se inició el proceso de ampliación del campus Costanera para que los estudiantes reciban una mejor calidad de la educación, el proceso de ampliación es finalizado el año 2021.



Fuente. Página web, Universidad de Atacama, Sede Vallenar

**Figura 2.1. Fotografía Campus Costanera Universidad de Atacama, Sede Vallenar**

## **2.2. HISTORIA DE LA METALURGIA**

En la historia de la humanidad frecuentes son las evidencias de los primeros procesos metalúrgicos es así como pirometalurgia es una técnica para la obtención de metales como se referencia a través de la historia y prehistoria en la Edad de los Metales, hacia los años 4000 a 3000 AC. En cambio, la hidrometalurgia solo aparece referenciada bastante después, por lo que puede ubicarse dentro de la historia de la humanidad como reciente.

Un primer reporte de la hidrometalurgia se muestra en el libro escrito por el rey de Huian (Liu-An, perteneciente a la dinastía Han de China) en su libro “Huinancius”, reportado entre los años 100 AC.

Al poner en contacto barras de hierro con sulfato de cobre depositando este en el hierro. (Gordon & Breach, 1980.)

La metalurgia de los metales de cobre se puede realizar por dos grandes procesos como son la pirometalurgia y la hidrometalurgia.

### 2.3. METALURGIA DEL COBRE

En Chile podemos encontrar yacimientos los cuales en su mayoría son de formación pórfidos cupríferos, donde se encuentran minerales de tipo óxidos y sulfuros.

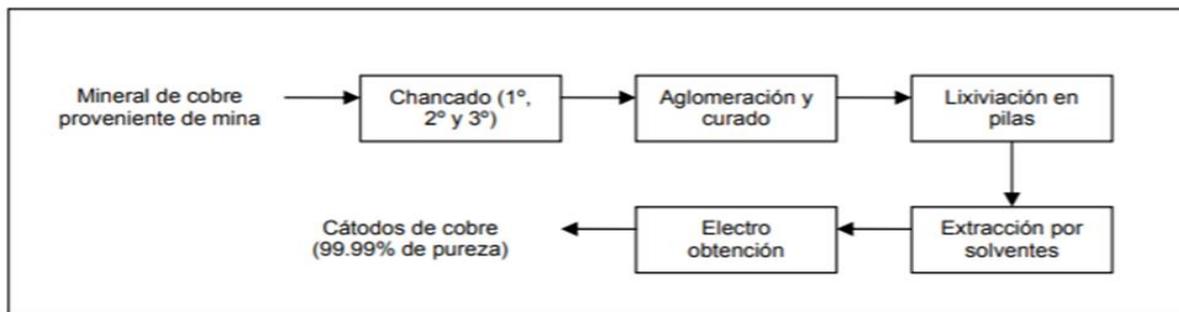
Los minerales de cobre oxidados están formados por el enlace entre metales y oxígeno. En minería, se utiliza este término para referirse a todos los minerales derivados del proceso de oxidación de un yacimiento, es decir, el ataque del mineral por parte del oxígeno proveniente de la atmósfera bajo la forma de fluidos oxidantes (agua, aire). Por esta razón, estos minerales se forman cerca de la superficie.

Entre los minerales oxidados de cobre más comunes son la cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), Malaquita ( $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ), Crisocola ( $\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Por otra parte, los minerales sulfurados están constituidos por el enlace entre el azufre y elementos metálicos, tales como el cobre, hierro, plomo, y zinc, entre otros. Los minerales sulfurados de cobre más comunes son calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelina ( $\text{CuS}$ ) y enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ). Un subproducto importante de estos yacimientos es el molibdeno, que está en la forma de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ).

Los minerales sulfurados de cobre son procesados por etapas de molienda, flotación, espesamiento y filtrado. Una de las más importantes es la flotación, en la que a través de reacciones fisicoquímicas se separan los minerales sulfurados de cobre y otros elementos como el molibdeno, de las especies llamadas gangas, que no tienen valor comercial. El concentrado resultante es secado mediante filtros y llevado al proceso de fundición.

En el caso de los minerales oxidados, son obtenidos a través de procesos hidrometalúrgicos, donde son expuestos a reacciones físicas y químicas, donde se extrae el cobre del resto del mineral chancado, disolviéndose en una solución ácida, etapa de lixiviación, para luego continuar a una etapa de extracción por solventes y luego la etapa de electroobtención, produciendo cátodos de cobre de alta pureza.



Fuente proyecto tesis “Implementación de la celda de electroobtención, el laboratorio químico metalúrgico. Universidad de Atacama, Sede Vallenar

**Figura 2.2 Diagrama de bloques del proceso Hidrometalúrgicos del cobre.**

## 2.4. HIDROMETALURGIA

La primera etapa, lixiviación, corresponde a la disolución selectiva de los metales de interés, contenidos en los minerales hacia el medio acuoso, el agente lixivante encargado de realizar la disolución por reacciones de óxido / reducción.

La etapa de separación sólido/líquido se encarga de recoger adecuadamente, bien sea por decantación, sedimentación y/o filtración, la solución enriquecida con los metales disueltos, mientras que el sólido agotado es enviado para almacenamiento para un posterior tratamiento o desecho, teniendo cuidado de neutralizar la acción de reactivos que puedan afectar el entorno o en un ambiente donde no genere contaminación.

La solución cargada con los metales disueltos pasa a la etapa de recuperación selectiva o precipitación de donde pasa a otros procesos metalúrgicos (pirometalúrgicos o electrometalúrgicos), en donde se recupera el metal como un producto sólido ya refinado o para refinación dependiendo del proceso de extracción.

La solución estéril, es enviada luego de su regeneración, al proceso en la etapa de lixiviación o bien, si su capacidad se ha agotado, es desechada o almacenada previamente neutralizada.

## 2.5. LIXIVIACIÓN

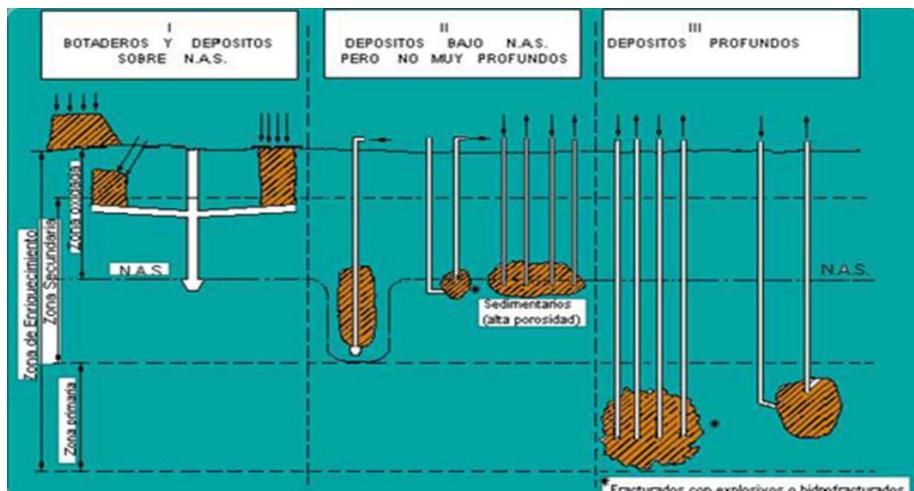
La lixiviación es un proceso en el cual un disolvente líquido pasa a través de una mena mineral con la finalidad de solubilizar un mineral de interés. Esta técnica es la más utilizada en Chile para procesar minerales oxidados de cobre. (Sernageomin, 2016).

### 2.5.1. TIPOS DE LIXIVIACIÓN

Por ser la primera etapa, se han investigado diversas formas en que se puede realizar la lixiviación entre ellas se conocen:

#### A) LIXIVIACIÓN IN SITU – IN PLACE

La lixiviación in place consiste en la lixiviación de residuos fragmentados dejados en minas abandonadas, mientras que la lixiviación in situ se relaciona a la aplicación de soluciones directamente a un cuerpo mineralizado. (Figura 2.3).

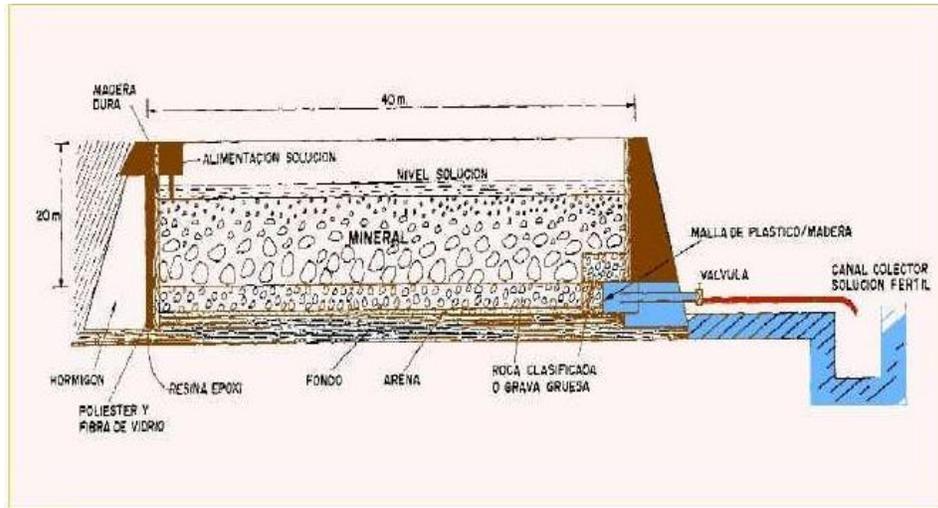


Fuente: <https://pdfslide.net/documents/proceso-de-lixiviacion-.html>

**Figura 2.3. Representación esquemática de lixiviación in situ.**

## B) LIXIVIACIÓN EN BATEAS

Esta técnica consiste en unir un lecho de mineral con una solución acuosa que produce una percolación e inunda la batea o estanque (Figura 2.4)

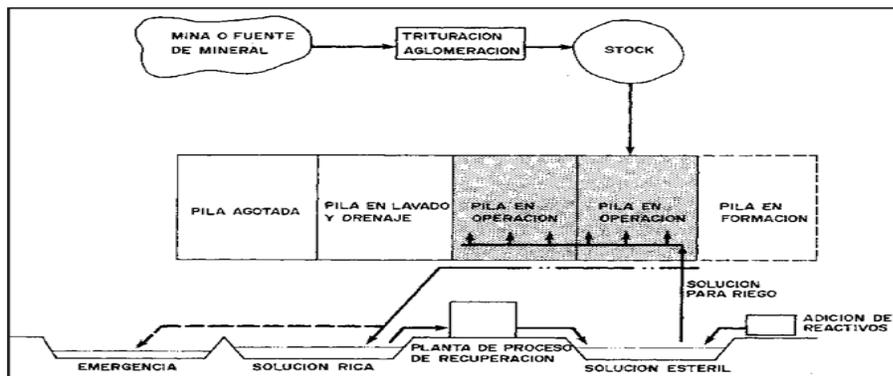


Fuente: <https://www.scribd.com/presentation/319932309/Lixiviacion-en-Bateas-o-Vat-Leaching>.

Figura 2.4. Representación esquemática de lixiviación en batea

## C) LIXIVIACIÓN EN PILAS:

Es un proceso que permite disolver el cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una solución de ácido sulfúrico y agua. (Figura 2.5)



Fuente: <https://www.scribd.com/presentation/319932310/Lixiviacion-en-pilas>

Figura 2.5. Representación esquemática de lixiviación en pilas

#### D) LIXIVIACIÓN EN BOTADEROS:

Esta técnica consiste en lixiviar lastres, desmontes o sobrecarga de minas de tajo abierto, los que debido a sus bajas leyes no pueden ser tratados a través de métodos comunes. (Espinoza, Barra, & Lobos, 2005)

#### E) LIXIVIACIÓN EN COLUMNAS

La columna de lixiviación es la mejor representación de la pila de lixiviación. Este modelo es capaz de representar las mismas condiciones de tratamiento como tasa de riego y concentración de ácido sulfúrico, entregando resultados que también representa los de la pila, como consumo de ácido sulfúrico y recuperación de cobre. Esta técnica es a escala laboratorio para lo cual se utilizan parámetros y condiciones ideales de trabajo de una pila de lixiviación y llevarlos a escala industrial.

**Tabla 2.1 Comparación de tipos de lixiviación.**

| Parámetro                     | Método de Lixiviación      |                           |                                |                          |
|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|
|                               | Botaderos                  | Pilas (capas delgadas)    | Percolación                    | Agitación                |
| Tenor o Ley                   | Muy bajo                   | Bajo a medio              | Medio a alto                   | Alto                     |
| Capacidad (ton/día)           | Gran capacidad             | Flexible                  | No flexible (limitado)         | De acuerdo a la molienda |
| Inversión de Capital          | bajo                       | medio                     | Medio a alto                   | Alta                     |
| Tamaño de partícula           | Tal y como sale de la mina | Requiere trituración fina | Requiere molienda media a fina | Molienda fina            |
| Tiempo de tratamiento         | 1 o más años               | 1 o más meses             | 1 a 2 semanas                  | 6 a 24 horas             |
| [Lixiviado] en solución (g/l) | Diluidas<br>1 a 2          | Diluida a media<br>2 a 7  | Media a concentrada<br>10 a 20 | Medias<br>5 a 15         |
| Recuperación (%)              | 40 a 60                    | 70 a 85                   | 70 a 85                        | 80 a 95                  |

Fuente proyecto tesis “Implementación de la celda de electroobtención, el laboratorio químico metalúrgico. Universidad de Atacama, Sede Vallenar

#### 2.5.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Para la preparación el proceso de lixiviación se prosigue con los siguientes pasos:

## **A. PREPARACIÓN DEL MATERIAL**

El material que se extrae del yacimiento inicia su camino en chancado y molienda en donde se obtienen dimensiones pequeñas de lo que antes eran grandes pedazos de roca, el tamaño final puede ser de 30 micras, esto con el objetivo de que el proceso de separación del mineral sea más eficiente y rápido.

## **B. TRANSPORTE DEL MATERIAL A LA ZONA DE LIXIVIACIÓN**

El material llevado y dispuesto sobre el área de lixiviación, para esta operación son utilizadas retroexcavadoras, pero en algunos casos correas transportadoras.

## **C. FORMADO DE PILAS**

Para el adecuado proceso es necesario que el material molido sea acumulado en pilas de varias toneladas formando columnas ordenadas.

## **D. BAÑADO O RIEGO**

Una vez completadas las pilas la solución se aplica lentamente a modo de riego por goteo o aspersores, la solución de agua y ácido sobre la superficie del material.

La solución líquida tiene la propiedad de disolver el mineral y de esa manera fluir con el líquido hacia el sistema de drenaje. Estos líquidos son transportados mediante tuberías instaladas hacia una poza.

## **E. ALMACENAJE Y RECUPERACIÓN**

La sustancia que se obtiene del proceso de riego es transportada hacia pozas para almacenarlas en tanto se programe su recuperación y concentración.

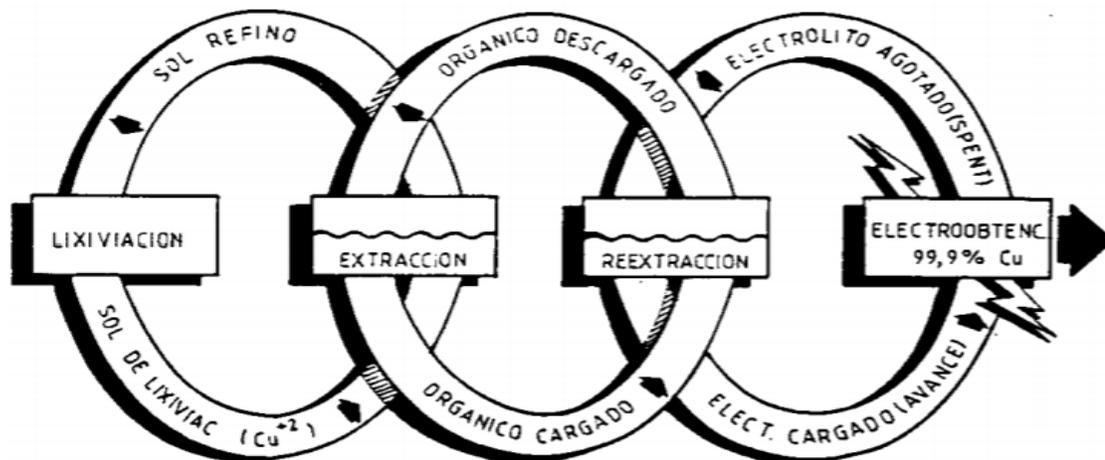
De igual forma, el área donde se realiza la lixiviación es recuperada luego de unos años de uso. Así se procede a restituir la vegetación propia de la zona, cuidando y monitoreando el desempeño. (Espinoza, Barra, & Lobos, 2005)

## **2.6. EXTRACCIÓN POR SOLVENTES.**

El proceso de extracción por solventes, conocido en la hidrometalurgia del cobre también como SX (del inglés Solvent Extraction), consiste en la extracción selectiva del cobre contenido en las soluciones de lixiviación mediante un solvente orgánico.

La planta SX recibe la solución rica generada en la etapa de lixiviación en pilas de minerales de cobre. Esta solución se caracteriza por tener una baja concentración de cobre disuelto, junto con impurezas como el Fe, Cl, Al, Mn, Mg, Na y otros disueltos durante el proceso. El objetivo del proceso SX es extraer selectivamente el cobre contenido en esta solución rica impura, mediante intercambio iónico entre la fase acuosa (solución rica) y el reactivo orgánico. Este reactivo es capaz de descargar el cobre en una etapa posterior del proceso a una solución de alta pureza y concentración de cobre y ácido, formando un electrolito apto para ser electrodepositado en el sector de electro obtención.

El proceso de extracción por solventes se divide en dos etapas denominadas extracción y reextracción o stripping. En la etapa de extracción la solución rica proveniente de las pilas es mezclada con la fase orgánica (orgánico descargado), para extraer selectivamente el cobre obteniendo una solución pobre en cobre, llamada refino, que es reciclada a la etapa de lixiviación en pilas. Se obtiene en esta etapa una fase orgánica cargada, que es avanzada a la siguiente fase del proceso. La etapa consecutiva a la extracción es la etapa de reextracción o stripping en este proceso el orgánico cargado se pone en contacto con electrolito pobre proveniente del proceso de electroobtención, de alta acidez (150-200 g/L  $H_2SO_4$ ). El cobre pasa de la fase orgánica a la fase acuosa, donde se obtiene una fase orgánica descargada que se recicla a la etapa de extracción y un electrolito rico que avanza hacia el electroobtención en la figura 2.6 esquema simplificado del proceso.



Fuente: <https://www.scribd.com/presentation/318932319/esquema-ciclico-proceso-lixiviacion>.

**Figura 2.6. Esquema cíclico (Concepto de anillos) del proceso lixiviación - extracción por solventes - electroobtención de Cu**

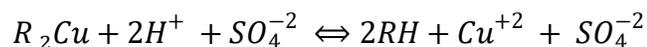
La extracción por solventes es un proceso que implica el paso del cobre, disuelto en forma de iones dentro de una fase acuosa hacia otra fase líquida, inmiscible con ella, conocida como fase orgánica.

Se puede decir que la extracción por solventes tiene por función: Contactar el PLS que contiene  $\text{Cu}^{2+}$  con la fase orgánica de tal manera que el  $\text{Cu}^{2+}$  es extraído de la solución de fase acuosa (PLS) hacia el extractante orgánico. Separar por diferencia de gravedad específica la solución de lixiviación de fase acuosa agotada de cobre (denominada refino), del orgánico cargado de cobre. Recircular el refino a las pilas de lixiviación. Enviar el orgánico cargado para que se contacte con el electrolito pobre de electroobtención, que contiene nominalmente 35 g/L  $\text{Cu}^{2+}$  aprox. Esto re-extrae el  $\text{Cu}^{2+}$  desde el orgánico cargado hacia el electrolito convirtiéndose en electrolito rico. Separar por diferencia de gravedad específica la fase orgánica del electrolito (fase acuosa). Circular el orgánico descargado, para que contacte con la solución rica de lixiviación (PLS). Enviar el electrolito rico hacia la zona de tanques para su limpieza y elevación de temperatura. Recepcionar el electrolito pobre en re-extracción que viene de las celdas de electroobtención para contactarse con la fase orgánica cargada y se enriquezca de  $\text{Cu}^{2+}$ .

### 2.6.1. MECANISMO DE LA TRANSFERENCIA DE COBRE

El proceso de SX se basa en la reacción reversible de intercambio iónico entre las dos fases inmiscibles, controlado químicamente por la acidez o el pH de la fase acuosa. De esta manera se produce un intercambio iónico que mantiene en equilibrio el sistema liberando ácido de acuerdo a la estequiometría del sistema.

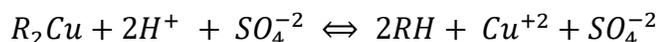
Reacción de extracción El ion cúprico reacciona con el extractante formando un compuesto órgano metálico insoluble en agua (Ecuación química i), totalmente soluble en el solvente orgánico (diluyente) con la cual se produce la extracción del cobre desde la fase acuosa a la orgánica. Mediante este mecanismo, cada ion de cobre se intercambia con dos iones de hidrogeno que pasan a la fase acuosa donde se regenera ácido sulfúrico en una proporción de 1.54 (kg de ácido / kg de cobre).



Orgánico Solución de Orgánico Refino Descargado lixiviación (PLS) cargado Donde RH es el extractante (ya sea aldoxima, cetoxima, o una combinación de ambos).

Reacción de re-extracción Ocorre por efecto del cambio de acidez en la fase acuosa, revertiendo la reacción y generando un electrolito de alta pureza y alta concentración en cobre.

Ecuación general de re-extracción



### 2.6.2. COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN

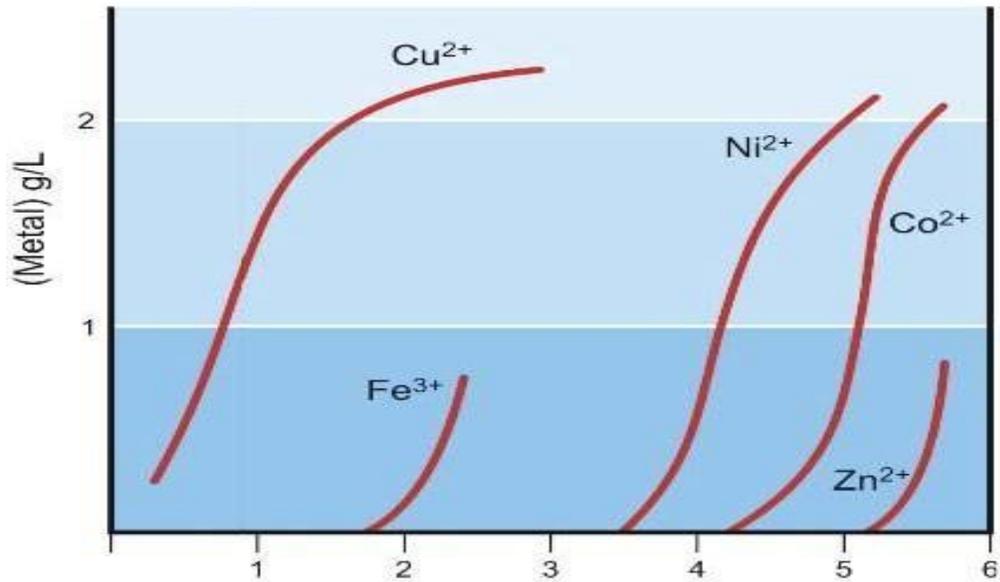
La razón entre la concentración del metal M en la fase orgánica y acuosa, en el equilibrio, define al coeficiente de distribución D o coeficiente de extracción. El coeficiente de

distribución es la variable más importante en el proceso de extracción por solventes, ya que, al variarlo de una manera controlada se podrá obtener la separación deseada de los metales. Así, en las Etapas de Extracción deberá obtenerse la mayor extracción del metal desde la fase acuosa, hacia la fase orgánica. Para ello, el pH de la solución deberá ser moderadamente bajo (pH = 1,5), Por el contrario, en las etapas de re-extracción o stripping y para la re-extracción del metal desde la fase orgánica, será necesario disminuir el coeficiente de distribución del metal. Esto se realiza, contactando la fase orgánica cargada con una solución acuosa de alta acidez, es decir, disminuyendo drásticamente el pH de la solución.

### **2.6.3. INFLUENCIA DEL PH**

El pH es el número que exactamente describe el grado de acidez o basicidad de una solución. La acidez o alcalinidad relativa de una solución se puede expresar en términos de pH en una escala de 1 a 14, donde el pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ). El agua destilada pura tiene un valor de pH de 7 y se considera como neutro (entre ácido y alcalino). Los valores de pH disminuyen de 7 a 0 indicando acidez, y los valores de pH se incrementan de 7 a 14 indicando alcalinidad

Efecto del pH, en la Extracción de Cobre y en la Selectividad, se puede observar este efecto y su importancia para la extracción individual de los elementos como para la separación de varios metales acuosos. Por ejemplo, se aprecia que en la extracción de cobre con una oxima comercial, a pH=2, ni el  $Co^{+2}$  ni el  $Ni^{+2}$  podrían ocasionar problemas de pureza. (Figura 2.7)



Fuente: <https://www.scribd.com/presentation/320932312/efecto-ph-extraccion-metales>.

**Figura 2.7. Efecto del pH en extracción de diversos metales a solución a obtener.**

## 2.7. ELECTRÓLISIS

Fue el científico y filósofo William Whewell, quien junto a Michael Faraday en el año de 1834 estudiaron el fenómeno llamado «*electrólisis*» para definir el proceso de descomposición química de la corriente galvánica. A inicio del siglo XIX, esta palabra fue introducida rápidamente en los campos de química, mineralogía y metalurgia por medio de una serie de experimentos en los cuales, al introducir electricidad en una sustancia, podían surgir diferentes tipos de descomposiciones, permitiendo conocer y entender los elementos de dicha sustancia. En 1850 y 1860 se hicieron experimentos médicos en Norteamérica y Europa utilizando la electrólisis.

La electrólisis consiste en dos reacciones separadas. En el cátodo una reducción (capta electrones) y en ánodo una oxidación (cede electrones).

La corriente eléctrica en el electrolito es conducida por el movimiento de los iones por la difusión y la migración que permite el intercambio continuo de electrones.

La reacción en el ánodo y cátodo resultan en una reacción neta involucrando un cambio de composición en el electrolito (caso del electro obtención), o las reacciones catódicas y anódicas se balancean uno con la otra de modo que no hay variación neta (suponiendo eficiencias del 100% en el cátodo y el ánodo respectivamente) caso del electro refinación.

### **2.7.1. APLICACIÓN DE LA ELECTRÓLISIS**

Cuando se realizan electrólisis de sustancias en disolución acuosa, es más difícil de prever el resultado de la electrólisis, ya que existen reacciones en competencia en ambos electrodos. El que suceda una u otra dependerá de varios factores, uno de ellos la concentración de la sustancia disuelta. Básicamente los procesos que pueden producirse son: Electrodo positivo, hacia el ánodo se dirigirán los iones negativos (aniones) que experimentarán una reacción de oxidación.

El que esta reacción se produzca, o no, dependerá de la facilidad con que se oxide el anión (el elemento central, si el anión es poliatómico). Hay aniones que no son oxidables. Esto ocurre cuando el átomo central está en su estado de oxidación más alto.

En la industria del cobre la electrólisis es usada para purificación electrolítica del cobre soluble, y también es utilizada para el electro refinación de ánodos de cobre obtenidos desde el proceso piro metalúrgico de los sulfuros de cobre y un subproducto de barro anódico que contiene minerales valiosos como el Au y Ag.

### **2.8. ELECTROOBTENCIÓN**

El proceso de electroobtención de cobre consiste en la transformación electroquímica del cobre disuelto en un electrolito rico en cobre metálico depositado en un cátodo, mediante la utilización de energía eléctrica proveniente de una fuente externa.

El cobre iónico ( $\text{Cu}^{2+}$ ) del electrolito es depositado selectivamente sobre la superficie del cátodo (como cobre metálico,  $\text{Cu}^0$ ) y a la vez se descompone agua en oxígeno y ácido sulfúrico en la superficie de ánodos insolubles de plomo.

La EW, como etapa final del proceso Hidrometalúrgico, tiene entre sus objetivos producir cátodos de cobre de alta pureza para maximizar los resultados económicos de venta del producto.

El cátodo “grado A” contiene más de 99,96 % Cu.

En general, los cátodos electro obtenidos producidos por medio de SX/EW presentan bajos niveles de impurezas de baja tolerancia, como son los elementos: As, Se, Bi y Sb.

Las impurezas que más problemas presentan son el Pb, S y Fe.

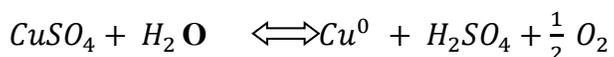
El proceso de EW, se lleva a cabo en una celda electrolítica, donde circula continuamente el electrolito acuoso que contiene disuelto  $\text{CuSO}_4$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y que proviene de la planta SX.

En la celda ocurren reacciones electroquímicas de oxidación – reducción, provocadas por la energía eléctrica.

En el cátodo el ión cúprico es reducido a cobre por los electrones suplidos por la corriente y que vuelven dicho electrodo de polaridad negativa.

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

Reacción de la celda o global  
(Expresada en forma molecular)



La capacidad de determinados compuestos para aceptar y donar electrones hace que puedan participar en las reacciones denominadas de oxidación-reducción. Esta propiedad no la poseen todos los compuestos. Las reacciones de oxidación-reducción (redox) son las reacciones de transferencia de electrones. Esta transferencia se produce entre un conjunto de especies químicas, uno oxidante y uno reductor.

## 2.9. LEY DE FARADAY

*“Un gramo electroquímico equivalente de material reacciona químicamente en cada electrodo por cada 96.500 coulombios de corriente que pasan por la celda electrolítica”.*

**GRAMO ELECTROQUÍMICO EQUIVALENTE:** es el peso atómico en gramos dividido por la valencia.

Ley de Faraday

$$M = \frac{PM \cdot I \cdot t}{n}$$

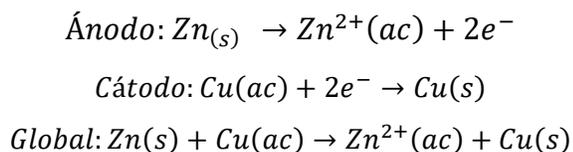
|    |   |                                            |
|----|---|--------------------------------------------|
| M  | = | Material que reacciona (gramos)            |
| PM | = | Peso Molecular de la especie               |
| I  | = | Corriente que circula (Ampere)             |
| T  | = | Tiempo que la corriente circula (segundos) |
| N  | = | Electrones transferidos                    |
| F  | = | Constante de Faraday (96.500 coulombios)   |

## 2.10. LA ECUACIÓN DE NERNST

Se utiliza para calcular el potencial de reducción de un electrodo fuera de las condiciones estándar. Se llama así en honor al científico alemán Walther Nernst que fue quien la formuló en 1889.

Si se sumerge un electrodo de metal en una disolución acuosa conteniendo un catión metálico, se establece un equilibrio. Este equilibrio da lugar a la formación de una carga negativa en el electrodo. Esta configuración de electrodo y disolución se denomina semicelda. Se pueden combinar dos semiceldas para formar una celda electroquímica.

En todos estos procesos se acoplan entre sí dos o más reacciones de transferencia de electrones.



El cátodo es el electrodo es en donde se lleva a cabo la reducción (ganancia de electrones), este posee carga negativa y a él migran las cargas positivas y el ánodo es el electrodo en donde se lleva a cabo la oxidación (pérdida de electrones), este posee carga positiva y a él migran las cargas negativas.

La condición de equilibrio en una celda electroquímica es que el potencial electroquímico de una especie es el mismo en todas las partes de la celda. Se puede cambiar el potencial electroquímico mediante la aplicación de un potencial eléctrico externo a la célula. Esto permite que se invierta la dirección del cambio espontáneo en la celda de reacción. Las células electroquímicas se pueden usar para determinar la constante de equilibrio en la célula de reacción y para determinar el coeficiente de actividad medio de un soluto.

El potencial estándar de cualquier celda electroquímica se puede obtener fácilmente a partir de los potenciales estándar de cada uno de los electrodos, y que la FEM de una celda galvánica está dada por:

$$E^{\circ} = E^{\circ}_{\text{cátodo}} - E^{\circ}_{\text{ánodo}}$$

$$E = E^{\circ} - \frac{2.303 \cdot RT}{nF} \cdot \log Q$$

En dónde  $Q$  es el coeficiente de reacción para una reacción de óxido reducción:

$$Q = \frac{[\text{Red}]}{[\text{Ox}]}$$

$$E = E^{\circ} - \frac{2.303 \cdot RT}{nF} \cdot \log \frac{[\text{Red}]}{[\text{Ox}]}$$

Sustituyendo los valores de  $R$  y  $F$  a una temperatura de 298 K, la ecuación queda como

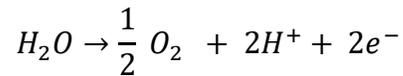
$$E = E^{\circ} - \frac{2.303 \cdot \left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right) 298\text{K}}{n(96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1})} \cdot \log \frac{[\text{Red}]}{[\text{Ox}]}$$

$$E = E^{\circ} - \frac{0.0592 \text{ V}}{n} \cdot \log \frac{[\text{Red}]}{[\text{Ox}]}$$

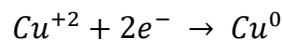
La ecuación de Nernst se utiliza para poder determinar el potencial de celda dentro de un sistema.

## 2.11. LAS REACCIONES PRESENTES EN LA CELDA DE ELECTRO OBTENCIÓN.

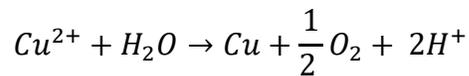
Reacción anódica (Descomposición en agua)



Reacción catódica (Precipitado de cobre)

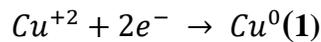


Reacción de celda (En forma iónica)

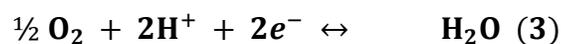
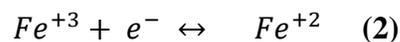


La reacción química global de electrodeposición puede descomponerse en las siguientes reacciones electroquímicas, según los lugares preferenciales donde estas tienen lugar:

Reacciones catódicas:

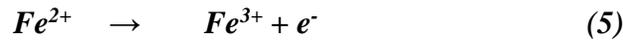


La reacción (1) ocurre en el cátodo y es la de interés para la producción de cátodos de cobre.



Las reacciones (3) y (6) son poco importantes dado que la baja solubilidad del oxígeno en agua hace que sean reacciones de cinética lenta.

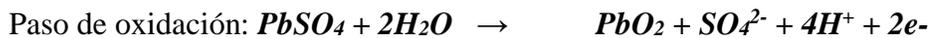
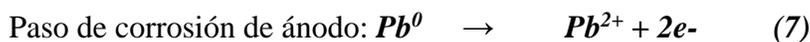
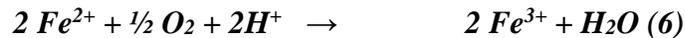
Reacciones anódicas:



Las reacciones (2) y (5) son reacciones cíclicas, es decir, se están desarrollando en el ánodo y en el cátodo simultáneamente, estas reacciones toman importancia cuando los contenidos de hierro en electrolito alcanzan niveles mayores a 2 g/L, es entonces cuando estas reacciones se manifiestan haciendo disminuir la eficiencia de corriente, esto significa aumentar el consumo de energía sin que necesariamente aumente la producción de cobre

La reacción (4) ocurre en el ánodo y es la responsable de la emisión de neblina acida.

Otras reacciones en solución:



El proceso de EW, se lleva a cabo en una celda electrolítica, donde circula continuamente el electrolito acuoso que contiene disuelto  $\text{CuSO}_4$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y que proviene de la planta SX.

En la celda ocurren reacciones electroquímicas de oxidación - reducción provocadas por la energía eléctrica.

En el cátodo el ión cúprico es reducido a cobre por los electrones suplidos por la corriente y que vuelven dicho electrodo de polaridad negativa.

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

Reacción de la celda expresada en forma molecular



La capacidad de determinados compuestos para aceptar y donar electrones hace que puedan participar en las reacciones denominadas de oxidación-reducción. Esta propiedad no la poseen todos los compuestos. Las reacciones de oxidación-reducción (redox) son las reacciones de transferencia de electrones. Esta transferencia se produce entre un conjunto de especies químicas, uno oxidante y uno reductor.

### **2.11.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE ELECTROOBTENCIÓN**

El electroobtención convencional de cobre una corriente continua impuesta circula de ánodo a cátodo a través de una solución ácida de sulfato de cobre proveniente, comúnmente, del procesamiento de minerales oxidados de cobre. El cobre se deposita sobre el cátodo y el agua se descompone sobre el ánodo (reacciones catódica y anódica, respectivamente), dando lugar a desprendimiento de oxígeno. El ánodo, usualmente hecho de una aleación de plomo, calcio y estaño, es insoluble cuando posee su respectiva capa de pasivación (capa de óxidos de Pb generada por el sobre potencial anódico al que ocurre la reacción de descomposición del agua). El cátodo es una lámina inicial de cobre o de acero inoxidable (en la actualidad, el cátodo de acero inoxidable es el estándar), y sobre él se deposita el cobre presente en la solución electrolítica hasta el momento de la

“cosecha”, término usado para definir el momento en que el cátodo es retirado de la celda electrolítica y reemplazado por una nueva lámina inicial.

### **2.11.2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROCESO DE ELECTRO OBTENCIÓN**

Para que ocurran las reacciones anteriores, en la etapa de lixiviación se pueden producir dos tipos de soluciones:

- soluciones fuertes: con contenidos de cobre en solución entre los rangos de 30-50 g/L
- soluciones débiles: con contenidos de cobre menor a 10 g/L.

Las soluciones fuertes son aptas para entrar directamente al proceso de EW, en cambio, las soluciones débiles, deben pasar por una etapa de concentración vía SX-EW o simplemente ser tratadas por cementación.

Como se ha mencionado, en la EW se deposita el cobre sobre una plancha llamada cátodo.

Este cátodo puede ser:

Una hoja de acero inoxidable (tecnología de cátodos permanentes) o una lámina de cobre de alta pureza (lámina de partida, tecnología tradicional).

La principal diferencia entre la lámina de partida respecto de la utilización de la plancha de acero inoxidable, es que esta lámina inicial pasa a formar parte del cátodo de cobre final, mientras que, en el caso del uso de tecnología de cátodos permanentes, este es reutilizado en numerosos ciclos catódicos.

En el proceso de EW, a veces es necesario agregar otras sustancias denominadas aditivos, que permiten mejorar los resultados del proceso, ya que es importante que el depósito crezca y engruese libre de rugosidades, poros y dendritas.

En general existen tres tipos de aditivos:

- Los nivelantes: Redistribuyen el voltaje sobre la superficie catódica.

- Los abrillantadores: Mejoran la presentación del depósito.

- Los reguladores del tamaño de grano: Mejoran las condiciones energéticas, logrando tasas de nucleación y crecimiento específicas.

Los aditivos deben ser evaluados antes de proceder a su incorporación en plantas, dado que pueden afectar los procesos aguas arriba, como la SX. En SX, la presencia de algunos aditivos afecta negativamente la separación de fases y con ello aumentan los arrastres

### **2.11.3. ELECTROLITO**

Referente al electrolito, este es una solución ácida de sulfato de cobre que contiene entre 30 y 50 g/l de  $\text{Cu}^{2+}$  y 130 a 160 g/l de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; la temperatura de trabajo es del orden de  $40^\circ\text{C}$ .

### **2.11.4. DENSIDAD DE CORRIENTE**

En cuanto a la densidad de corriente, esta se mantiene entre 250 y 300  $\text{A}/\text{hm}^2$ , para tener la producción más alta posible compatible con una buena calidad del depósito.

### **2.11.5. ELECTRODOS**

Respecto a los electrodos, no todos los electrodos poseen las mismas características físicas y eléctricas que permiten que un proceso industrial de EW sea económicamente sustentable.

Para el electro obtención de cobre se requiere para una mejor eficiencia utilizar ánodos de Pb-Ca-Sn que son de mayor resistencia a la corrosión del ácido y cátodos de acero inoxidable permanente.

El electro obtención convencional de cobre una corriente continua impuesta circula de ánodo a cátodo a través de una solución ácida de sulfato de cobre proveniente, comúnmente, del procesamiento de minerales oxidados de cobre. El cobre se deposita sobre el cátodo y el agua se descompone sobre el ánodo (reacciones catódica y anódica, respectivamente), dando lugar a desprendimiento de oxígeno. El ánodo, usualmente hecho de una aleación de plomo, calcio y estaño, es insoluble cuando posee su respectiva capa de pasivación (capa de óxidos de Pb generada por el sobre potencial anódico al que ocurre la reacción de descomposición del agua). El cátodo es una lámina inicial de cobre o de acero inoxidable (en la actualidad, el cátodo de acero inoxidable es el estándar), y sobre él se deposita el cobre presente en la solución electrolítica hasta el momento de la “cosecha”, término usado para definir el momento en que el cátodo es retirado de la celda electrolítica y reemplazado por una nueva lámina inicial.

#### **2.11.6. CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN**

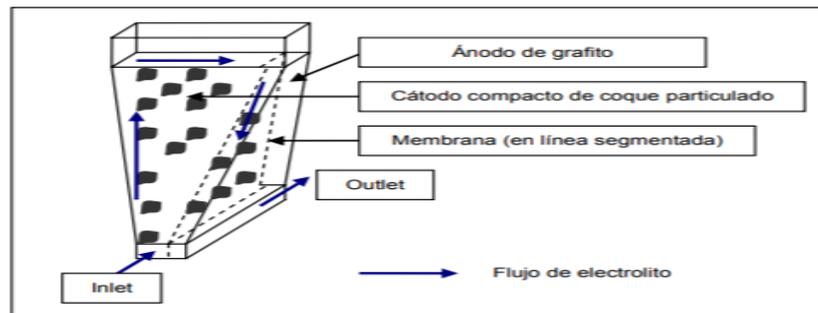
Para realizar el proceso de electro obtención se requiere de instalaciones especializadas llamadas celdas electrolíticas equipadas con sistema de circuitos eléctricos para hacer circular una corriente eléctrica continuas de baja intensidad.

## 2.11.7. TIPOS DE CELDA DE ELECTRO OBTENCIÓN

### A. CELDAS DE LECHOS PARTICULADOS

Se encuentran en los concentrados de sulfuros como lechos particulados, también en recortes de recuperación secundaria de metales, se pueden obtener por lixiviación, purificación o piro metalurgia.

Con estas celdas se logran densidades altas de corrientes, entre 10 a 100 veces como en las de sistemas convencionales. Esto se debe al movimiento y fricción de las partículas. Los tamaños de estas instalaciones son menores por lo que aún están a nivel de piloto, son muy escasas y no son divulgadas con mucha frecuencia. (Figura2.8)

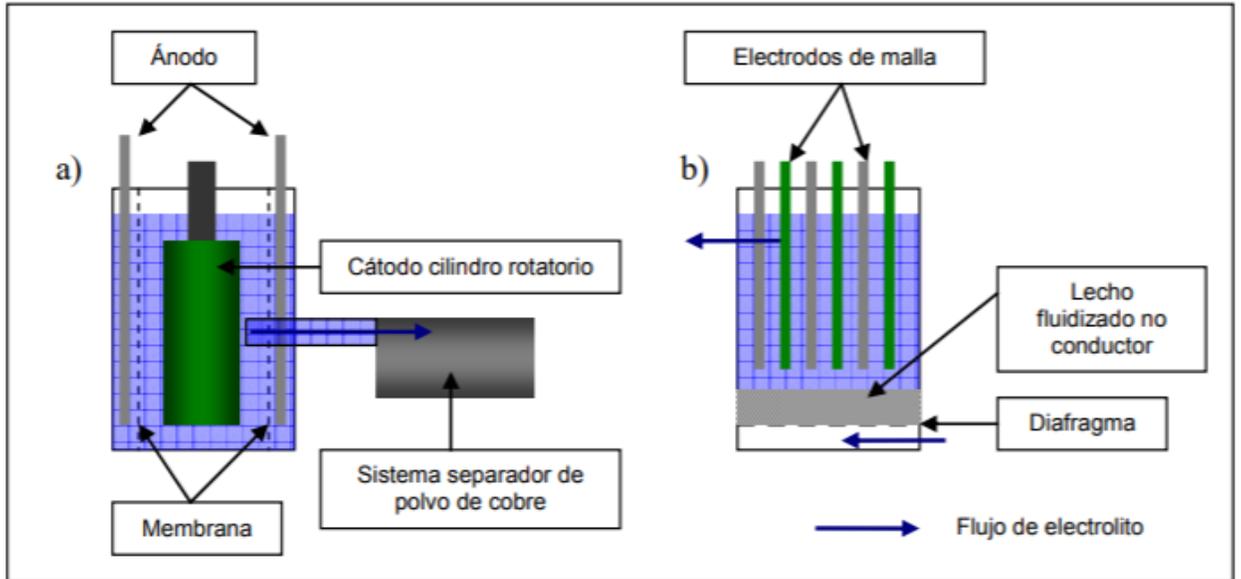


Fuente proyecto tesis "Implementación de la celda de electroobtención, el laboratorio químico metalúrgico. Universidad de Atacama, Sede Vallenar

Figura 2.8. Figura esquemática de un modelo de celda de lecho fijo

### B. CELDAS PARA PRODUCCIÓN DIRECTA DE LÁMINAS DE METAL

En esta se puede lograr una forma directa de obtener una lámina de cobre, esta posee un cátodo en forma de tambor que se sumerge en una solución electrolítica, el tambor gira de acuerdo al grosor de la lámina que se desea obtener. (Figura2.9)

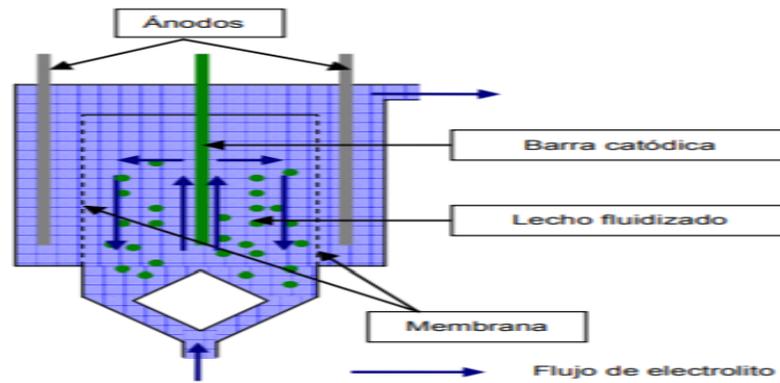


Fuente proyecto tesis “Implementación de la celda de electroobtención, el laboratorio químico metalúrgico. Universidad de Atacama, Sede Vallenar.

**Figura 2.9. Figura esquemática de las celdas para producción directa de metal.**

### C. CELDAS PARA PROCESAR SALES FUNDIDAS

Para las sales se debe considerar si el metal que se quiere depositar es más liviano o pesado que el electrolito. En el caso del aluminio que es una sal fundida, es diferente a otros casos ya que los ánodos se consumen. (Figura 2.10.)



Fuente: Proyecto Tesis “Implementación de la celda de electroobtención, el laboratorio químico metalúrgico. Universidad de Atacama, Sede Vallenar

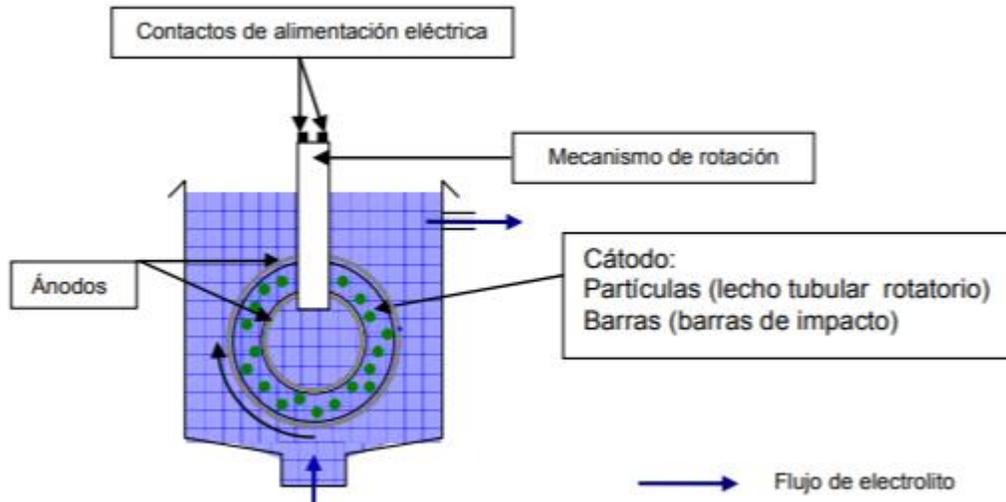
**Figura 2.10. Celda para procesar sales fundidas**

#### **D. CONVENCIONAL PARA ELECTROLISIS EN MEDIO ACUOSO**

Estas están diseñadas para colocar las láminas en paralelo ya que los ánodos y cátodos están colocados en forma vertical uno frente a otro, la diferencia que posee depende del proceso, ya sea para electro obtención que se renueva la solución o electro refinación en donde se renueven las placas para la deposición.

#### **E. CELDA CILÍNDRICA PARA ELECTROOBTENCIÓN DE ORO**

En este caso se utiliza un ánodo inerte de acero y un cátodo, compuesto por un conductor inserto con lana de acero. Este proceso es para la recuperación de oro luego de un proceso de concentración con carbón activado, se usa como electrolito, la solución de elución de carbón. Es importante la agitación del electrolito frente a las placas en el electroobtención, ya que, si se cambia la solución, el metal que se deposita en las placas igual lo hará. (Figura 2.11)



Fuente: Proyecto Tesis “Implementación de la celda de electroobtención, el laboratorio químico metalúrgico. Universidad de Atacama, Sede Vallenar.

**Figura 2.11. Celda para el electro obtención de oro**

### **2.11.8. ENERGÍA EN LAS CELDAS ELECTROLÍTICAS**

Para que se genere la energía que la instalación necesite, es necesaria la presencia de equipos rectificadores de corrientes que la mantiene constante. Generalmente las instalaciones eléctricas de las celdas son sencillas, para disminuir los trayectos de corriente continua desde los rectificadores hasta las celdas. Los rangos de densidad de energía dependen de las soluciones a que esté expuesta la celda, pueden ser soluciones de sales fundidas o soluciones acuosas.

#### **A) SALES FUNDIDAS**

Fácilmente se alcanzan 10 a 15 kA/m<sup>2</sup>, eso se debe a la conductividad y altas temperaturas.

#### **B) SOLUCIONES ACUOSAS**

En este se alcanza 200 y 300 A/m<sup>2</sup>. En los casos de EW y Electro refinación se puede aumentar la densidad entre estos sistemas acuosos, con el uso de electrodos particulados y que se efectúe una electrolisis en un lecho fluidizado.

### **2.11.9. PARTES DE UNA CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN**

Las partes básicas que contiene una celda de electro obtención a escala laboratorio:

- ✓ Pecera de acrílico o vidrio
- ✓ Cátodos de acero inoxidable
- ✓ Ánodo de plomo
- ✓ Pinzas caimán
- ✓ Cable de corriente
- ✓ Láminas de cobre
- ✓ Fuente de poder

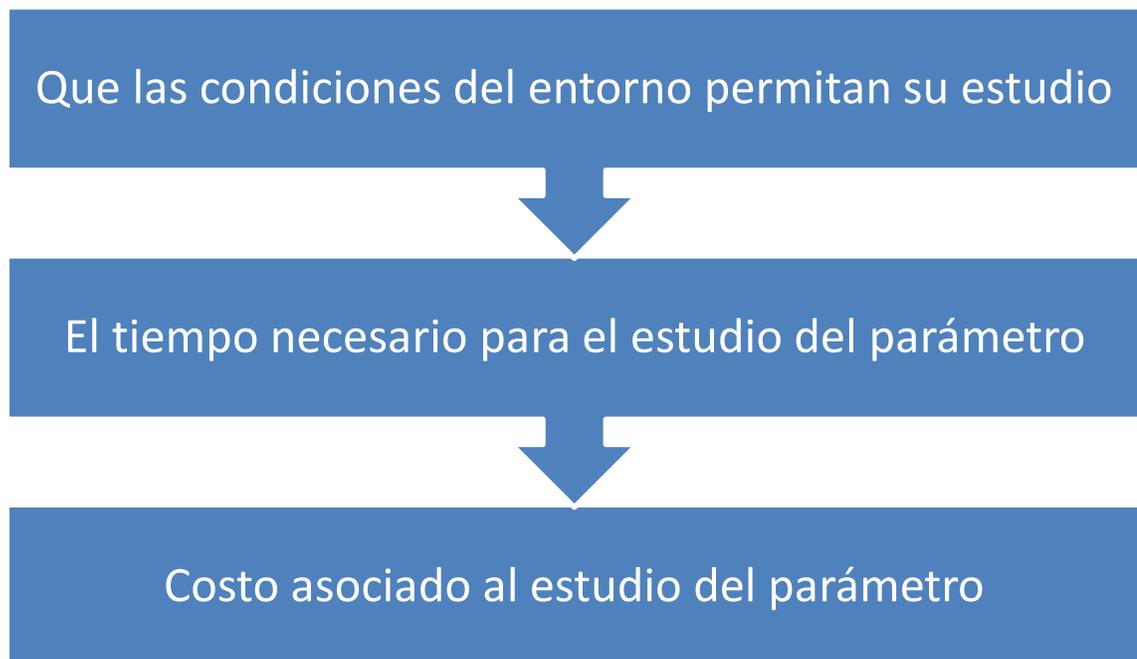
## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

El desarrollo del estudio se define según los objetivos específicos propuestos para el mismo. Se tratará de un estudio cuantitativo, en tanto, se deberán recoger datos y valores que permitirán generar las conclusiones.

### **3.1. PARÁMETROS DE ESTUDIO**

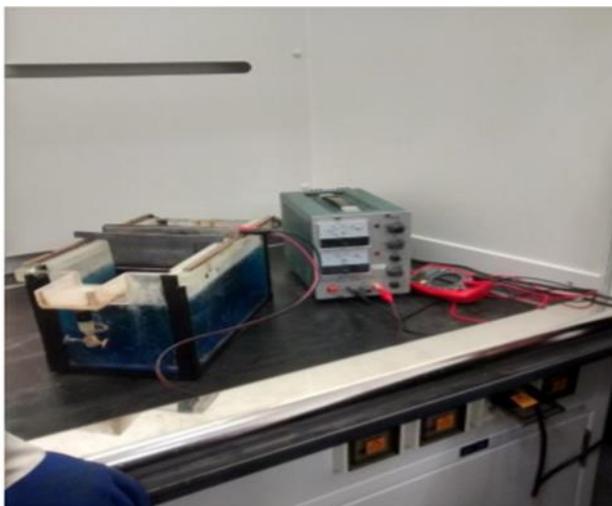
Para definir los parámetros de estudios, se desarrollaron criterios de selección, ya que al tener tiempos acotados de trabajo, 16 semanas como máximo, sumado a que los recursos son escasos, no es posible abarcar en un solo proyecto de especialidad todos los parámetros que influyen.

Los criterios que se siguieron para la selección se enlistan a continuación:



### 3.2. PUESTA EN MARCHA DE LA CELDA

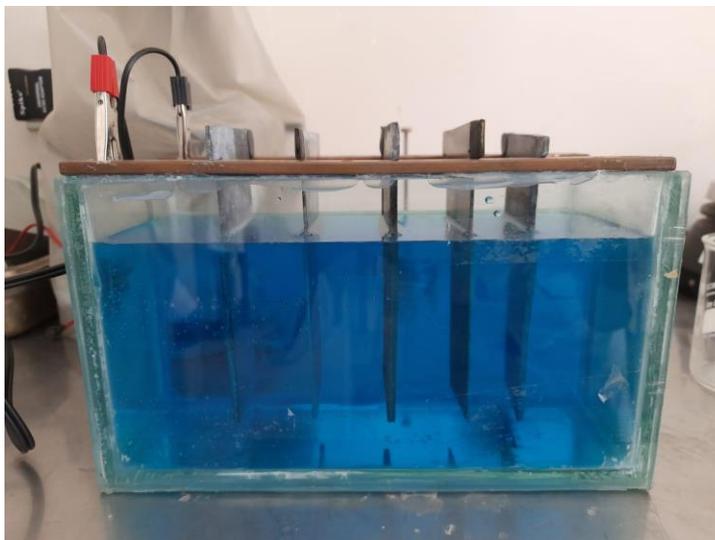
El diseño y confección de la celda con la que cuenta la Sede fue tomado desde un prototipo de Celda para electroobtención con la que se contaba en la Universidad de Atacama Casa Central Copiapó (Figura 3.1), la cual fue adaptada a las necesidades observadas por los alumnos en el año 2001.



Fuente: Imagen capturada por alumno

**Figura 3.1. Celda del Departamento de Metalurgia Universidad de Atacama, Copiapó.**

La universidad de Atacama Sede Vallenar, cuenta con una Celda de electro obtención (Figura 3.2), que fue diseñada y construida por alumnos de la Carrera de Técnico en Metalurgia en el año 2019, a imagen de la que tenían en Casa Central.



Fuente: Imagen capturada por alumno

**Figura 3.2. Celda Laboratorio Químico Metalúrgico, Universidad de Atacama, Sede Vallenar, 2019.**

La celda cuenta con las siguientes dimensiones:

**Tabla 3.1. Dimensiones de la celda de electroobtención. (Sede Vallenar)**

| Dimensiones de la celda |       |
|-------------------------|-------|
| Ancho                   | 12 cm |
| Alto                    | 14 cm |
| Espesor                 | 8 mm  |
| Largo                   | 25 cm |



Fuente: Imagen capturada por alumno

**Figura 3.3. Celda Laboratorio Químico Metalúrgico, Sede Vallenar, año 2019.**

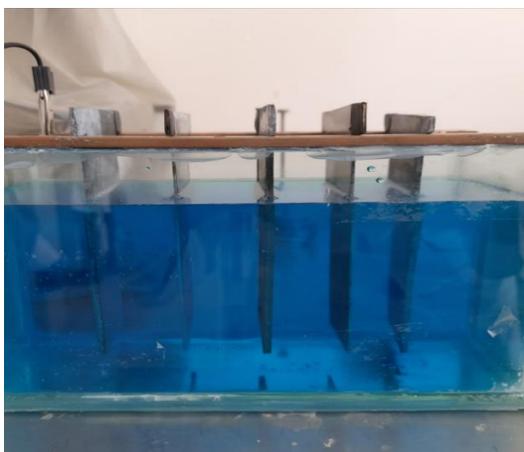
La puesta en marcha como se le denominó al siguiente paso, es para ver si la celda tiene filtraciones, capta corriente, etc. La idea es ver si necesitaba algún tipo de arreglo o mantención. Para ello se siguieron los pasos descritos por los tesisistas que la construyeron el año 2019.

En el laboratorio se encontraba la celda, el adaptador de corriente, las pinzas caimán, los ánodos de plomo y los cátodos de acero inoxidable.

### **3.2.1. Procedimiento**

- ✓ El primer paso fue limpiar todo el material existente.
  
- ✓ Luego se preparó el electrolito, en este caso, 2,5 L de una solución de 30 g/L de Cobre (Cu) a partir del reactivo sulfato cúprico pentahidratado ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )

- ✓ Al verter la solución en la celda se pudo notar que tenía pequeñas filtraciones en sus costados por lo que hubo que volver a colocar la solución en sus botellas, limpiar bien la celda, secar bien y aplicar sellante en todos los costados, para que secase bien y se cerraran correctamente las uniones se deja secar con el sellante aplicado durante 24 horas.
- ✓ Pasadas las 24 horas se vuelve a agregar agua para probar el sellado, se comprueba que ya no filtre, se vacía la celda, y se completa con la solución de electrolito, se colocan los electrodos inmersos en la celda de modo de que la secuencia sea ánodo-cátodo-ánodo-cátodo-ánodo, lo que permite cosechar un total de 4 cátodos por vez que se haga funcionar la celda. La distancia a la que se deben colocar unos de otros es de 4 cm.
- ✓ Luego se deben conectar a la fuente de poder a través de pinzas caimán, se debe recordar que el cátodo representa el polo negativo y el ánodo el polo positivo. Al conectar la corriente se observa que inicia funcionando, pero es en forma intermitente, lo que revela que probablemente un cable interno de las pinzas se encuentre haciendo corte o bien el adaptador de corriente. Para poder arreglar esta situación se debe ir a un lugar de ventas especializado dentro de la ciudad, quienes afortunadamente disponían de los equipos necesarios.
- ✓ Luego se coloca nuevamente en funcionamiento la celda, sin embargo, es posible notar que una de las placas generaba cortocircuito, para solucionar esto se cambia la placa.
- ✓ Una vez se solucionan todos los problemas de funcionamiento de la celda, se observa que es posible la deposición de cobre en los cátodos. Se encuentra en condiciones de realizar las pruebas analíticas.



Fuente: Imagen capturada por alumno.

**Figura 3.4. Celda Departamento Geomineria, Laboratorio Químico Metalúrgico, Universidad de Atacama, Sede Vallenar, año 2021 puesta en marcha.**

### **3.3. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS A TRAVÉS DE PRUEBAS ANALÍTICAS**

Tanto para el desarrollo de estas pruebas como para la puesta en marcha se debe considerar el uso de elementos de protección personal (EPPs) y las medidas de seguridad correspondientes.

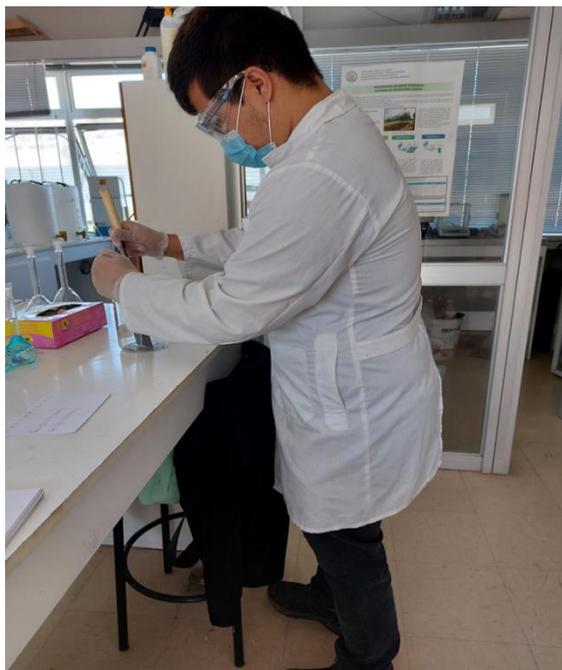
#### **3.3.1. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL**

El uso de los E.P.P, es fundamental para el trabajo que se realiza en el laboratorio, ya que protege de accidentes o cualquier situación que pueda suceder.

Los implementos usados en el Laboratorio:

- Delantal blanco o cotona
- Gafas de seguridad
- Guantes de látex
- Mascarilla (por el COVID), pero al trabajar en una planta se requiere usar una trompa con filtro para ácido ya que el electrolito rico desprende gases ácidos que irritan las vías respiratorias.
- Zapatos de seguridad.

- Pantalón largo, camisa manga larga



Fuente: Imagen capturada por alumno

**Figura 3.5. Alumno usando E.P.P en Laboratorio Químico Metalúrgico, Universidad de Atacama, Sede Vallenar, año 2021.**

### **3.3.2. MEDIDAS DE SEGURIDAD**

- ✓ Tener cuidado al manipular vidrio mojado
- ✓ Tomar el pelo largo en una cola
- ✓ No tomar las placas de plomo con la mano
- ✓ Preparar las soluciones con ácido bajo campana
- ✓ No tocar directamente los reactivos
- ✓ No oler directamente soluciones o reactivos
- ✓ No tocar los cables con las manos húmedas, tampoco el enchufe, ni meter las manos a la celda durante su funcionamiento.

### 3.3.3. PROCEDIMIENTO PRUEBAS ANALÍTICAS

En este punto existe un procedimiento general y uno específico a medida que cambia la variable de estudio. Se partirá indicando el procedimiento general:

- ✓ Para todas y cada una de las pruebas se deben preparar 2,5 L de solución 30 g/L Cu, a partir de sulfato cúprico pentahidratado.
- ✓ Para determinar la masa a pesar se debe aplicar un factor gravimétrico. Como se utilizaron matraces de 500 mL, se debe calcular la masa necesaria de sulfato cúprico pentahidratado para que en solución se encuentren 30 g/L de cobre, el cálculo se muestra a continuación:

$$\frac{30 \text{ g Cu}}{X} = \frac{1000 \text{ mL}}{500 \text{ mL}}$$

$$\text{masa de Cu necesaria para cada matraz} = \frac{30 * 500 \text{ gCu}}{1000} = \mathbf{15 \text{ g Cu}}$$

Luego, la relación gravimétrica que existe entre la masa del sulfato cúprico pentahidratado y la masa del Cobre como elemento está dada por sus masas molares:

$$\frac{MM_{CuSO_4 * 5H_2O}}{MA_{Cu}} = \frac{249,54 \text{ g/mol}}{63,54 \text{ g/mol}}$$

Es decir, si en 249,54 g de sulfato cúprico pentahidratado se encuentran 63,54 g de cobre, entonces qué masa de sulfato deberé pesar para que haya 15 gramos de Cu.

$$\frac{249,54 \text{ g}}{63,54 \text{ g}} = \frac{X}{15 \text{ gCu}}$$

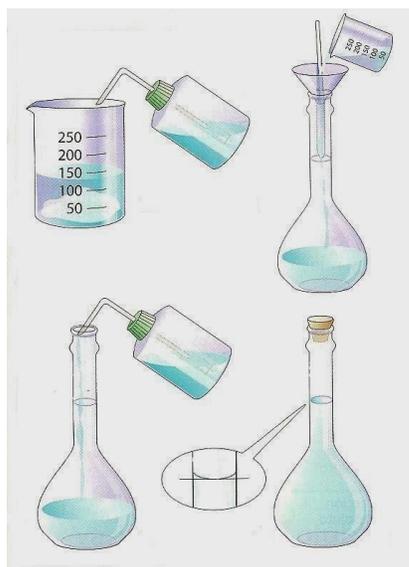
*Masa a pesar de sulfato para cada matraz de 500 mL = 58,9 g*

- ✓ Una vez realizado el cálculo de la masa a pesar, se pesa en balanza analítica sobre un vaso pp de 250 mL 58,9 gramos de sulfato cúprico pentahidratado (Ver Figura 3.6) y luego se disuelve en agua destilada utilizando varilla de agitación, luego se vierte dentro de un matraz de aforo de 500 mL, se limpia el material con agua destilada y se termina de aforar

con la misma, utilizando una pisceta. Se tapa el matraz y se agita fuertemente. Esto se repite para cada prueba 5 veces de modo de completar los 2,5 L. (Ver Figura 3.7)

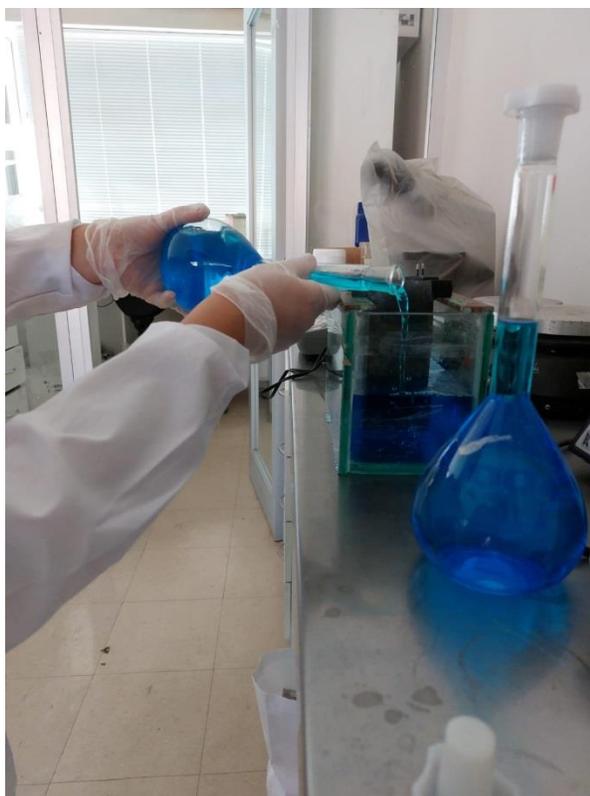


**Figura 3.6. Pesaje en balanza semianalítica de sulfato cúprico pentahidratado**



**Figura 3.7. Esquema de preparación de soluciones**

✓ Una vez preparadas todas las soluciones del electrolito, se vierten a la celda de electroobtención(Ver Figura 3.8)



**Figura 3.8. Vertido de la solución electrolito a la celda de electroobtención**

✓ Enseguida, se disponen las placas como sigue y con la distancia de acuerdo a cada prueba, “ánodo-cátodo-ánodo-cátodo-ánodo”. (Ver Figura 3.9). Luego se conectan las pinzas caimán y se enchufa el adaptador de corriente.



**Figura 3.9. Disposición de cátodos y ánodos en la celda de electroobtención**

✓ Finalmente, se toman muestras al inicio y cada cierto número de horas de acuerdo con la prueba analítica que se esté desarrollando y con un tiempo inicial de duración total de 27 horas de funcionamiento. Las muestras deberán ser diluidas siempre y cuando sea necesario para su lectura de cobre en el espectrofotómetro UV-Vis.

### **3.3.4. DETERMINACIÓN DE COBRE POR UV-VIS**

#### **A. PREPARACIÓN DE CURVA DE CALIBRACIÓN**

Para poder medir la concentración de cobre que va quedando en la solución con el paso de las horas, se decide trabajar con espectroscopía de absorción molecular, esto porque da muy buenos resultados aún cuando la concentración remanente sea muy baja.

Para lograr conocer la concentración de las muestras es necesario primero calibrar el equipo, para lo cual se preparan diferentes concentraciones de cobre a partir de una solución madre de 30 g/L Cu.

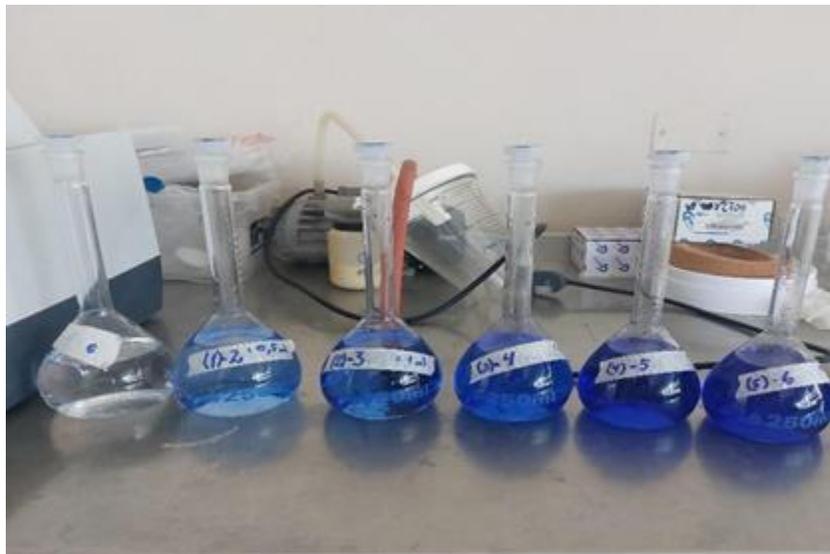
## **MATERIALES**

- ✓ 6 Matraz de aforo de 250 mL
- ✓ Agua destilada en piscetas
- ✓ Soporte universal
- ✓ Pinza mariposa
- ✓ Bureta 25 ó 50 mL
- ✓ Probeta 100 mL
- ✓ Hidróxido de amonio 20% v/v
- ✓ Cubeta de cuarzo
- ✓ Espectrofotómetro UV-Vis Shimadzu (UV Mini 1240)
- ✓ Campana extractora de gases
- ✓ Cinta de papel y plumón permanente
- ✓ Vaso pp 400 mL
- ✓ Balanza semianalítica
- ✓ Matraz de aforo de 100 mL
- ✓ Espátula
- ✓ Vaso pp 100 mL

## **PROCEDIMIENTO**

- ✓ Se procede a preparar la solución madre de 30 g/L para lo cual se masan 11,78 gramos de sulfato cúprico pentahidratado en balanza semianalítica, utilizando una espátula, luego se disuelve en la menor cantidad de agua posible y se trasvasa al matraz de 100 mL, asegurándose de limpiar todo el material que haya estado en contacto con la solución preparada y que cada gota se encuentre dentro del matraz de aforo, se agrega agua destilada hasta la marca de aforo, se tapa y agita 33 veces 30, es decir, se asegura la homogeneización de la solución.
- ✓ Se ambienta la bureta con la solución de 30 g/L de Cu, se elimina la burbuja y se llena hasta la marca 0 mL (la bureta está calibrada por vertido).
- ✓ Se rotulan los 6 matraces de aforo de 250 mL con los números 1 al 6.

- ✓ Al matraz 1 no se le agrega el analito (Cu) pues será nuestro blanco, al matraz 2 se le agregan 0,5 mL de la solución madre que está en la bureta, al matraz 3, 1 mL; al matraz 4, 2 mL; al matraz 5, 4 mL y al matraz 6, 6 mL.
- ✓ Una vez se tienen todos los matraces con la cantidad de analito correspondiente, se procede a llevar bajo campana y agregar 20 mL de hidróxido de amonio al 20%. Luego se aforan con agua destilada, se tapan los matraces y se homogenizan. (Ver Figura 3.10)



**Figura 3.10. Estándares para curva de calibración del complejo tetraamin cobre(II)**

## **B. LECTURA EN EL EQUIPO DE ABSORCIÓN MOLECULAR**

- ✓ Una vez lista los estándares de cobre, se prepara el equipo (Shimadzu UV Mini 1240) de absorción molecular para la lectura, (Ver Figura 3.11) el equipo se debe encender y se esperan unos minutos hasta que realiza un breve check list de todas las funciones.
- ✓ Cuando todo aparece con un ticket se puede ajustar la longitud de onda a la cual se realizará la lectura, para determinar la longitud de onda se debe hacer un barrido espectral a la muestra, generalmente de una concentración intermedia, puede ser con la solución que se encuentra en el matraz 4 por ejemplo, el barrido indica en

qué longitudes de onda se producen los peaks de mayor absorbancia para nuestro compuesto que en este caso es el complejo tetraamin cobre (II) de color azul intenso.

- ✓ Se configura la longitud de onda, para este caso de 602 nm, en el equipo se debe hacer click en la tecla go to WL(ir a longitud de onda) y colocar 602 con el teclado, apretar enter y queda listo para medir
- ✓ Se coloca en 1, medida fotométrica y se comienza por el blanco
- ✓ Para medir se debe tener en cuenta que la cubeta posee dos caras que se encuentran esmeriladas y es de donde se debe manipular, nunca colocar los dedos en la región transparente ya que es por estas caras que entra y sale el haz de luz y cualquier mancha puede interferir en la medida.
- ✓ Se llena la cubeta en sus  $\frac{3}{4}$  partes procurando que el haz de luz pase a través de la solución y no de vacío, pero no se debe permitir que rebalse.
- ✓ Se introduce en el espacio donde se ajusta la cubeta de tal modo de que la cara transparente quede mirando hacia el haz de luz.
- ✓ Se cierra el equipo y como en este caso es el blanco se aprieta el botón autozero, esto para indicar al equipo que la muestra no contiene el analito y entonces restará cualquier señal que pueda provenir de la matriz que en este caso es agua destilada y amoníaco.
- ✓ Se descarta lo que está en la cubeta en un vaso pp de 400 mL, se ambienta con la solución del matraz 2, se descarta en el mismo vaso pp, se llena hasta  $\frac{3}{4}$  de la cubeta con la solución del matraz 2, se coloca en el espectrofotómetro teniendo los mismos cuidados que en la lectura del blanco, se tapa el equipo, se anota la lectura de absorbancia que arroja. Este paso se repite para todas las soluciones de la curva.

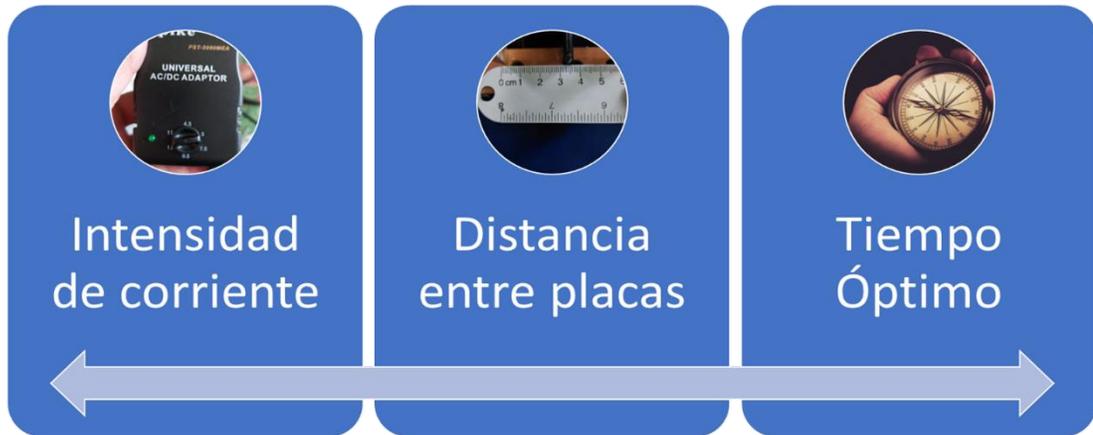


**Figura 3.11. Equipo Espectrofotómetro UV-Vis listo para medir la curva.**

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

### 4.1 PARÁMETROS SELECCIONADOS

Los parámetros seleccionados por cumplir con todos los criterios de selección fueron:



La intensidad de corriente es un parámetro que influye en el tiempo de obtención del cátodo, pero a su vez no puede ser tan elevada ya que la reacción al ser más energética o violenta puede generar un cátodo de mala calidad, ya que el burbujeo intenso puede dañar la superficie. Esto no involucraba ningún gasto asociado ya que el adaptador traía un botón regulador.

Por otra parte, la distancia entre las placas se define porque además de no tener costo asociado, desde un principio se observa en que este parámetro influye por cuanto más distanciadas se encuentren las placas, estas comienzan a dejar de funcionar durante el proceso, permitiendo la generación de óxido en lugar de depositarse el metal en el cátodo.

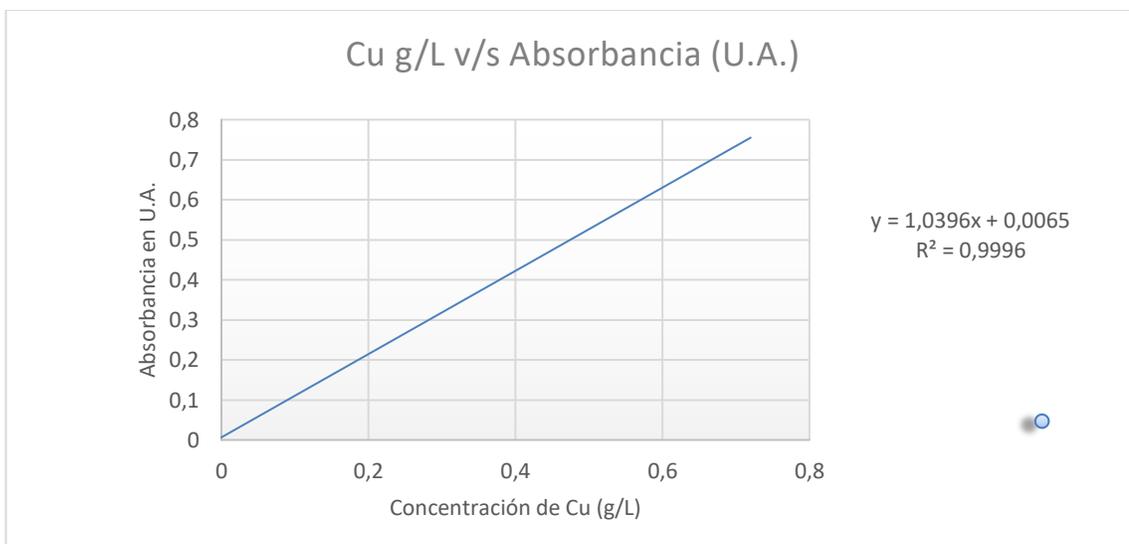
Desde la puesta en marcha de la celda, para observar si funcionaba correctamente, se pudo notar que a cierto tiempo la actividad de deposición metálica cesa y comienza la formación de óxido, saber hasta cuándo trabajar la celda de acuerdo con los parámetros que se mantendrán constantes, será crucial a la hora de buscar la calidad del producto formado de forma eficiente.

## 4.2. CURVA DE CALIBRACIÓN

Las absorbancias obtenidas de los estándares preparados para la calibración del equipo se llevan a una tabla de concentración v/s Absorbancia y esto se lleva a una gráfica (Ver Figura 4.1.), en el programa Excel, de tal manera de obtener la ecuación de la recta. La cual permitirá obtener la concentración de las muestras tomadas en diferentes tiempos de la reacción al conocer su absorbancia.

**Tabla 4.1. Absorbancia de cada estándar de la curva de calibración**

| Muestra | mL Cu 30 g/L | Cu g/L | Absorbancia (U.A.) |
|---------|--------------|--------|--------------------|
| 1       | 0            | 0      | 0                  |
| 2       | 0,5          | 0,06   | 0,067              |
| 3       | 1            | 0,12   | 0,134              |
| 4       | 2            | 0,24   | 0,262              |
| 5       | 4            | 0,48   | 0,511              |
| 6       | 6            | 0,72   | 0,749              |



**Figura 4.1. Gráfico de la Curva de Calibración**

### 4.3. PRUEBAS ANALÍTICAS

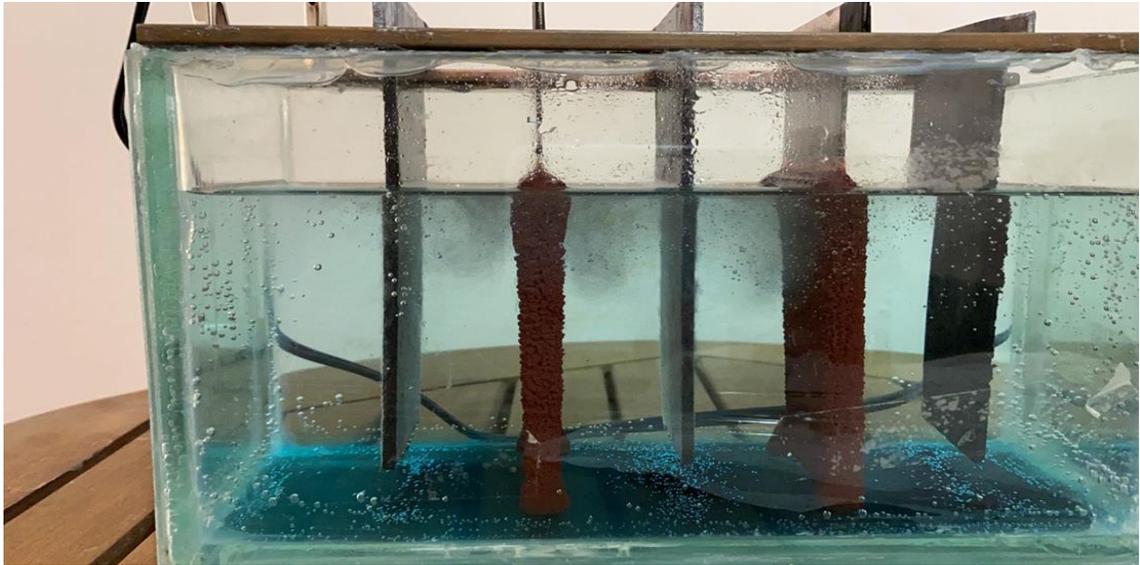
#### 4.3.1. PRIMERA PRUEBA

Tabla 4.2. Primera prueba analítica

| PARÁMETRO                             | VALOR   | RESULTADOS OBTENIDOS                                      | OBSERVACIONES                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Distancia entre placas (cátodo-ánodo) | 4 [cm]  | Masa cátodo 1 = 3,863 g                                   | Al cabo de unos minutos de estar conectado mediante un transformador a la energía eléctrica comienza la electrodeposición de cobre en los cátodos, pasadas las 20 horas se visualiza una gran cantidad de óxido en los cátodos y deja de burbujear el ánodo central. (Figura 4.3) |
| Intensidad corriente                  | 4,5 [A] | Masa cátodo 2 = 5,606 g                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Tiempo de duración                    | 27 h    | Masa total recuperada de Cu: <b>9,469 g</b> (Figura 4.2.) |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Concentración Cobre inicial           | 30 g/L  | Recuperación metalúrgica: <b>12,63%</b>                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Volumen total de la celda             | 2,5 L   |                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Masa de cobre total                   | 75 g    |                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |



Figura 4.2. Cobre recuperado en la primera prueba analítica



Fuente: Imagen capturada por alumno

**Figura 4.3. Celda de electroobtención a las 23 horas de funcionamiento.**

Una vez terminada la experiencia se llevan las muestras con sus respectivas diluciones y después de agregarle hidróxido de amonio para la formación del complejo, a la lectura de la absorbancia en el espectrofotómetro, esto se hará después de realizada cada prueba, sin embargo, como la curva se prepara en un momento diferente a la prueba esta deberá ser leída cada vez que se vayan a leer muestras. En esta oportunidad las lecturas de la curva arrojaron la siguiente ecuación de la recta:

$$y = 0,7283x + 0,001$$

Como se sabe, “y” representa la absorbancia y “x” la concentración, que es lo que se quiere determinar en las muestras tomadas, despejando se tiene:

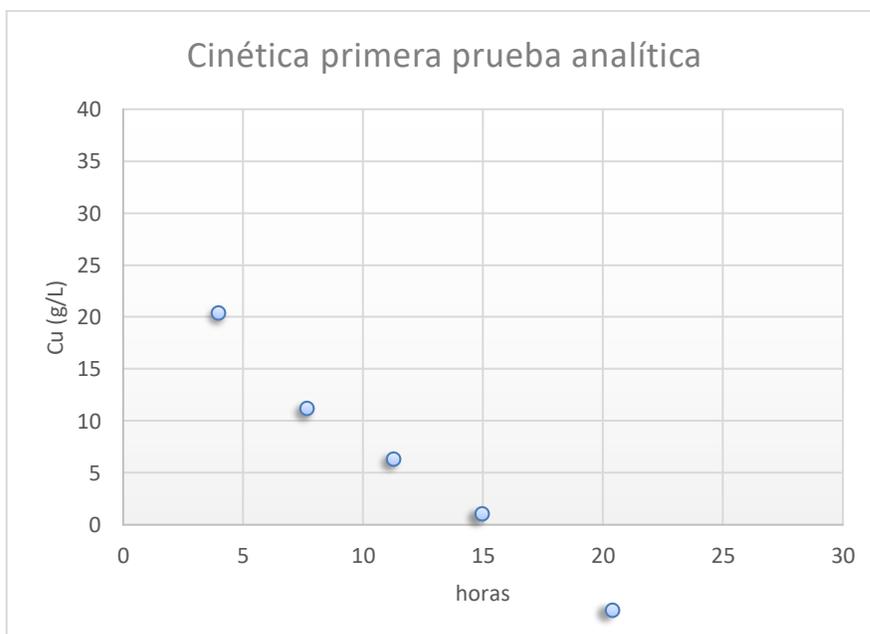
$$x = (y - 0,001)/0,7283$$

Aplicando esta última ecuación a las absorbancias medidas de las diferentes muestras es posible construir la Tabla 4.3., además es necesario aplicar el factor de dilución al valor obtenido en primera instancia para lo cual la concentración se multiplica por dicho factor.

**Tabla 4.3. Concentración de Cu g/L de las muestras tomadas a diferentes tiempos  
(PRUEBA I)**

| Muestra (horas) | Absorbancia (U.A.) | Cu g/L | Fd    | Cu g/L *Fd |
|-----------------|--------------------|--------|-------|------------|
| 0               | 0,245              | 0,335  | 100   | 33,5       |
| 2               | 0,208              | 0,284  | 100   | 28,4       |
| 4               | 0,189              | 0,258  | 100   | 25,8       |
| 6               | 0,334              | 0,457  | 50    | 22,9       |
| 9               | 0,261              | 0,357  | 50    | 17,9       |
| 12              | 0,146              | 0,199  | 62,5  | 12,4       |
| 15              | 0,254              | 0,347  | 20    | 6,95       |
| 18              | 0,222              | 0,303  | 16,67 | 5,06       |
| 21              | 0,11               | 0,150  | 31,25 | 4,68       |
| 24              | 0,175              | 0,239  | 2     | 0,48       |
| 27              | 0,081              | 0,110  | 2     | 0,22       |

Una vez, se tiene la tabla es posible construir una gráfica, la cual representa la cinética de la reacción como se observa en la Figura 4.4.



**Figura 4.4. Gráfico que muestra la cinética de la primera prueba analítica**

Es posible observar que, en esta primera prueba, tanto cualitativamente como cuantitativamente el cobre en la solución disminuye completamente a las 27 horas quedando solo 0,22 g/L en solución, sin embargo, el peso de los cátodos fue de aproximadamente 9,5 gramos, suma de las 4 placas obtenidas. Esto nos muestra que prácticamente el 80% del cobre se depositó en ellos como óxido el cual después se deposita en el fondo de la celda. Esto concuerda con la observación que se hace visualmente del proceso pasadas las 20 horas, además que el ánodo central deja de funcionar. Por esto es necesario encontrar el tiempo exacto en que la celda funciona, y cuándo se empieza a depositar el óxido, lo que posiblemente ocurre porque ya no es suficiente la concentración del electrolito para generar la reacción directa y esta se empieza a devolver.

#### 4.3.2. SEGUNDA PRUEBA

**Tabla 4.4. Segunda prueba analítica**

| PARÁMETRO                             | VALOR   | RESULTADOS OBTENIDOS                                       | OBSERVACIONES                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------|---------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Distancia entre placas (cátodo-ánodo) | 4 [cm]  | Masa cátodo 1 = 13,2943 g                                  | En esta oportunidad se repiten las condiciones, pero se acercan un poco las placas hacia donde se conectan las pinzas caimán. De todas formas, se logra ver una gran cantidad de óxido y que dejan de funcionar el ánodo central y el del extremo lejano a la toma de corriente (Figura 4.6) |
| Intensidad corriente                  | 4,5 [A] | Masa cátodo 2 = 13,8062 g                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Tiempo de duración                    | 27 h    | Masa total recuperada de Cu: <b>27,105 g</b> (Figura 4.5.) |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Concentración Cobre inicial           | 30 g/L  | Recuperación metalúrgica: <b>36,13%</b>                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Volumen total de la celda             | 2,5 L   |                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Masa de cobre total                   | 75 g    |                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |



**Figura 4.5. Cobre recuperado en la segunda prueba analítica.**



Fuente: Imagen capturada por alumno

**Figura 4.6. Celda de electroobtención en la segunda prueba analítica**

Al igual que en la prueba anterior se genera una tabla con las concentraciones calculadas a partir de las absorbancias medidas en el equipo de absorción molecular, utilizando la

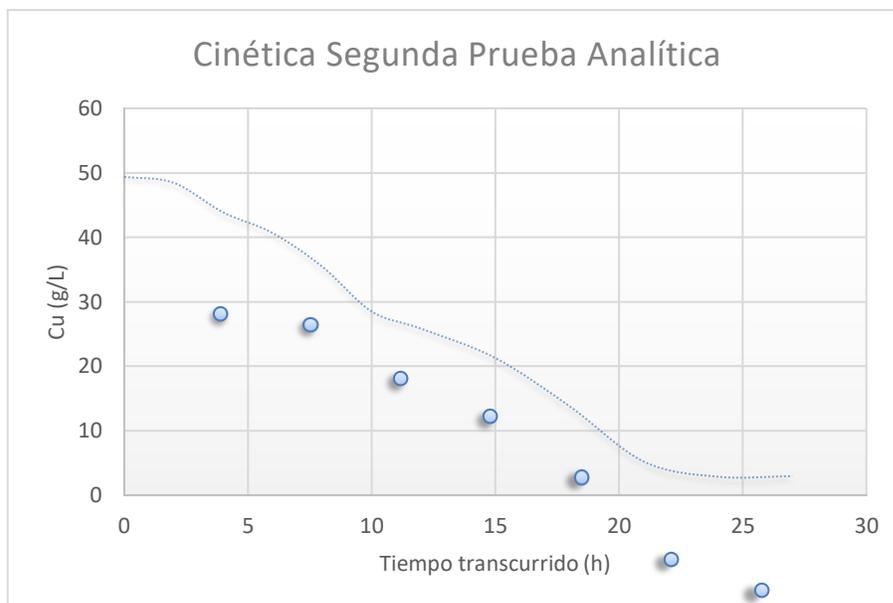
ecuación de la recta que se obtiene a partir de dar lectura en el equipo a la curva de calibración. Ver tabla 4.5.

**Tabla 4.5. Concentración de Cu g/L de las muestras tomadas a diferentes tiempos (PRUEBA II)**

| Muestra (horas) | Absorbancia (U.A.) | Cu g/L | Fd   | Cu g/L* Fd |
|-----------------|--------------------|--------|------|------------|
| 0               | 0,328              | 0,494  | 100  | 49,4       |
| 2               | 0,322              | 0,484  | 100  | 48,4       |
| 4               | 0,292              | 0,439  | 100  | 43,9       |
| 6               | 0,537              | 0,814  | 50   | 40,7       |
| 8               | 0,469              | 0,709  | 50   | 35,5       |
| 10              | 0,378              | 0,570  | 50   | 28,5       |
| 12              | 0,681              | 1,033  | 25   | 25,8       |
| 15              | 0,562              | 0,851  | 25   | 21,3       |
| 18              | 0,276              | 0,414  | 33,3 | 13,8       |
| 21              | 0,176              | 0,261  | 20   | 5,23       |
| 24              | 0,099              | 0,144  | 20   | 2,87       |
| 27              | 0,102              | 0,148  | 20   | 2,97       |

Se comienzan a medir la recuperación de cobre, mediante lecturas de concentración de cobre en solución, aplicando la técnica de espectrofotometría de absorción molecular.

A partir de esta tabla se construye la gráfica de la cinética del proceso. Figura 4.7.



**Figura 4.7. Gráfico que muestra la cinética del proceso durante la segunda prueba analítica**

Tanto la cinética de la segunda como la primera prueba muestran claramente que el cobre en la solución desaparece a medida que transcurren las horas de la electroobtención, sin embargo, esto no solo es atribuible a la depositación del cobre en los cátodos sino también a que en cierto punto comienza a depositarse óxido en los cátodos y en el fondo de la celda. Esto se puede deber además del pH que debiese ser ácido, a la cantidad baja de cobre en solución, pero también a la distancia entre los ánodos y cátodos. Por lo que se debe acercar las placas entre sí además de acercarlas todas al punto de ingreso de corriente.

### 4.3.3 TERCERA PRUEBA

Tabla 4.6. Tercera Prueba Analítica

| PARÁMETRO                             | VALOR    | RESULTADOS OBTENIDOS                                        | OBSERVACIONES                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Distancia entre placas (cátodo-ánodo) | 3,5 [cm] | Masa cátodo 1 = 19,6418 g                                   | Se cambia un parámetro de la celda, es la distancia de los cátodos con los ánodos de 4 cm a 3,5 cm, comienza con una buena electrodeposición de cobre en los cátodos, pasado las 18 horas se visualiza que se comienza a formar óxido en los cátodos. (Figura 4.9) |
| Intensidad corriente                  | 4,5 [A]  | Masa cátodo 2 = 17,1746 g                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Tiempo de duración                    | 27 h     | Masa total recuperada de Cu: <b>37,3624 g</b> (Figura 4.8.) |                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Concentración Cobre inicial           | 30 g/L   | Recuperación metalúrgica: <b>48,82%</b>                     |                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Volumen total de la celda             | 2,5 L    |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Masa de cobre total                   | 75 g     |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                    |

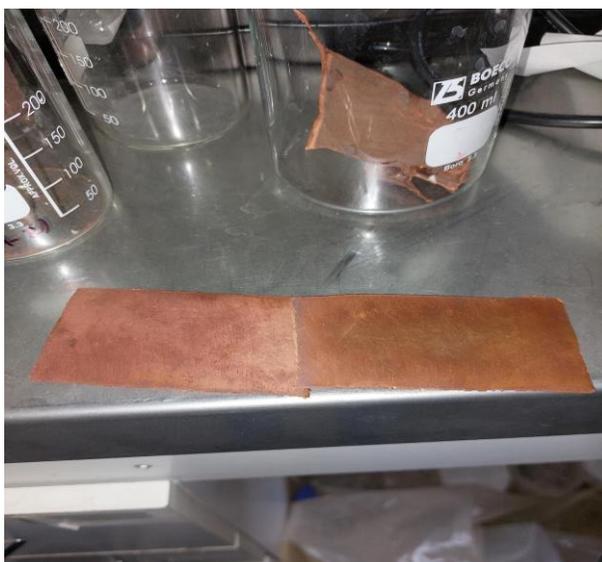
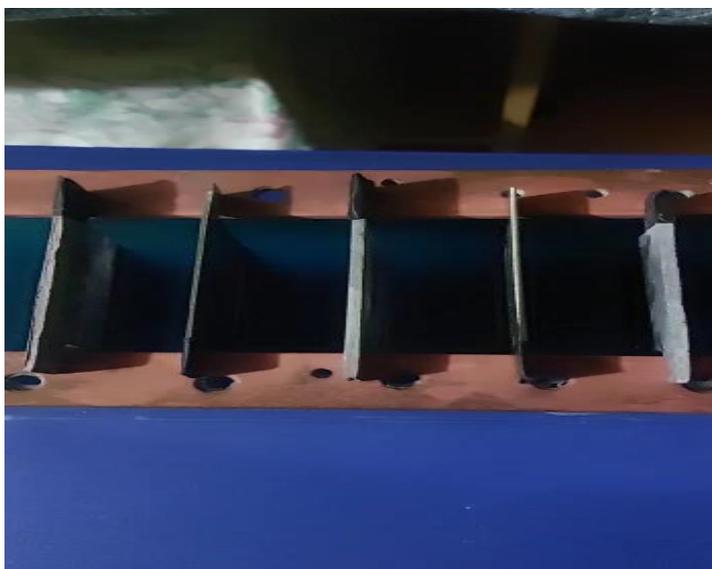


Figura 4.8 Cobre recuperado en Tercera prueba analítica



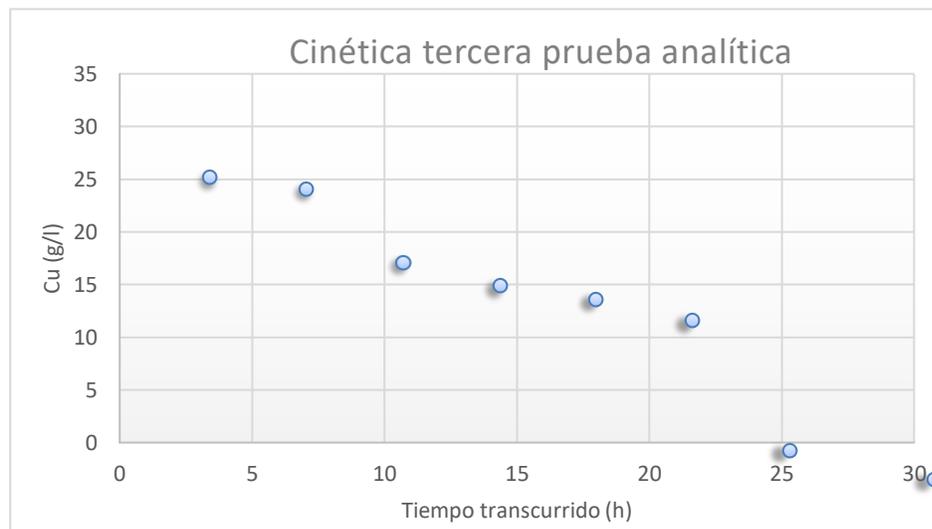
Fuente: Imagen capturada por alumno

**Figura 4.9. Celda de electroobtención en la tercera prueba analítica**

A continuación, se presenta la tabla 4.7. la cual contiene las concentraciones de las muestras tomadas durante la tercera prueba analítica.

**Tabla 4.7 Concentración de Cu g/L de las muestras tomadas a diferentes tiempos  
(PRUEBA III)**

| MUESTRA | ABS   | Cu g/L | Fd2  | Cu g/L* Fd |
|---------|-------|--------|------|------------|
| 0       | 0,217 | 0,324  | 100  | 32,4       |
| 2       | 0,213 | 0,318  | 100  | 31,8       |
| 4       | 0,188 | 0,280  | 100  | 28,0       |
| 6       | 0,355 | 0,535  | 50   | 26,7       |
| 8       | 0,346 | 0,521  | 50   | 26,1       |
| 10      | 0,331 | 0,498  | 50   | 24,9       |
| 12      | 0,481 | 0,727  | 25   | 18,2       |
| 15      | 0,441 | 0,666  | 25   | 16,7       |
| 18      | 0,313 | 0,471  | 33,3 | 15,7       |
| 21      | 0,468 | 0,710  | 20   | 14,2       |
| 24      | 0,308 | 0,463  | 20   | 9,26       |
| 27      | 0,052 | 0,072  | 20   | 1,44       |



**Figura 4.10. Gráfico que muestra la cinética del proceso durante la tercera prueba analítica.**

Esta prueba permite fijar un nuevo tiempo de trabajo para soluciones de concentración inicial de 30 g/L, este nuevo tiempo sería 18 horas, debido a que en este momento es que se observa que empieza la oxidación del material y no la reacción de depositación.

#### 4.3.4 CUARTA PRUEBA

**Tabla 4.8. Cuarta Prueba Analítica**

| PARÁMETRO                             | VALOR    | RESULTADOS OBTENIDOS                                        | OBSERVACIONES                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Distancia entre placas (cátodo-ánodo) | 3,5 [cm] | Masa cátodo 1 = 26,995 g.                                   | Se cambian dos parámetros de la celda, Intensidad de corriente 5 A y tiempo de duración. Comienza con una buena electrodeposición de cobre en los cátodos, ya a 18 horas se visualiza que se comienza a formar óxido en los cátodos. (Figura 4.12.) |
| Intensidad corriente                  | 5 [A]    | Masa cátodo 2 = 24,837 g.                                   |                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Tiempo de duración                    | 18 h     | Masa total recuperada de Cu: <b>51,832 g</b> (Figura 4.11.) |                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Concentración Cobre inicial           | 30 g/L   | Recuperación metalúrgica: <b>69,11%</b>                     |                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Volumen total de la celda             | 2,5 L    |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Masa de cobre total                   | 75 g     |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                     |



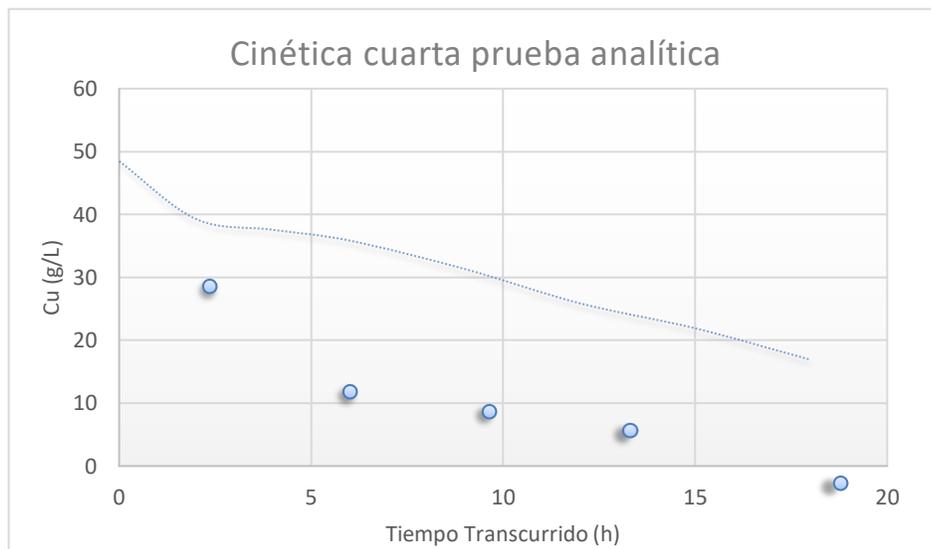
**Figura 4.11. Cátodo de cobre recuperado en la cuarta prueba**



**Figura 4.12. Celda de electroobtención, cuarta prueba analítica**

**Tabla 4.9 Concentración de Cu g/L de las muestras tomadas a diferentes tiempos  
(PRUEBA IV)**

| MUESTRA | ABS   | Cu g/L | Fd2 | Cu g/L*Fd |
|---------|-------|--------|-----|-----------|
| 0       | 0,320 | 0,485  | 100 | 48,5      |
| 2       | 0,261 | 0,393  | 100 | 39,3      |
| 4       | 0,250 | 0,376  | 100 | 37,6      |
| 6       | 0,469 | 0,717  | 50  | 35,8      |
| 9       | 0,411 | 0,627  | 50  | 31,3      |
| 12      | 0,341 | 0,517  | 50  | 25,9      |
| 15      | 0,290 | 0,438  | 50  | 21,9      |
| 18      | 0,226 | 0,338  | 50  | 16,9      |



**Figura 4.13 Gráfica de la Cinética, cuarta prueba analítica.**

En esta prueba es posible observar que mejora mucho la calidad del cátodo obtenido al aumentar la intensidad de corriente y evitar que comience a formarse el óxido, por lo que es un acierto detener la prueba a las 18 horas, aunque quede aun cobre en solución, lo interesante es ver si aumentando más la corriente se logra depositar más cobre en el mismo tiempo de estudio.

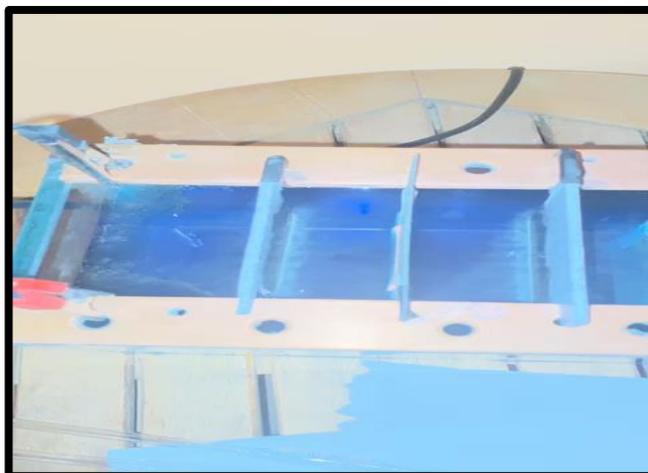
#### 4.3.5 QUINTA PRUEBA

**Tabla 4.10. Quinta Prueba Analítica**

| PARÁMETRO                             | VALOR    | RESULTADOS OBTENIDOS                                        | OBSERVACIONES                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Distancia entre placas (cátodo-ánodo) | 3,5 [cm] | Masa cátodo 1= 33,244 g.                                    | Se cambian dos parámetros de la celda, Intensidad de corriente 5,5 A y tiempo de duración 19 h. Comienza con una buena electrodeposición de cobre en los cátodos, ya a las 19 se observa que la reacción se detiene. (Figura 4.15.) |
| Intensidad corriente                  | 5,5 [A]  | Masa cátodo 2 = 23,074 g.                                   |                                                                                                                                                                                                                                     |
| Tiempo de duración                    | 19 h     | Masa total recuperada de Cu: <b>56,318 g</b> (Figura 4.14.) |                                                                                                                                                                                                                                     |
| Concentración Cobre inicial           | 30 g/L   | Recuperación metalúrgica: <b>75,1 %</b>                     |                                                                                                                                                                                                                                     |
| Volumen total de la celda             | 2,5 L    |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                     |
| Masa de cobre total                   | 75 g     |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                     |



**Figura 4.14. Cátodos recuperados en última prueba analítica.**

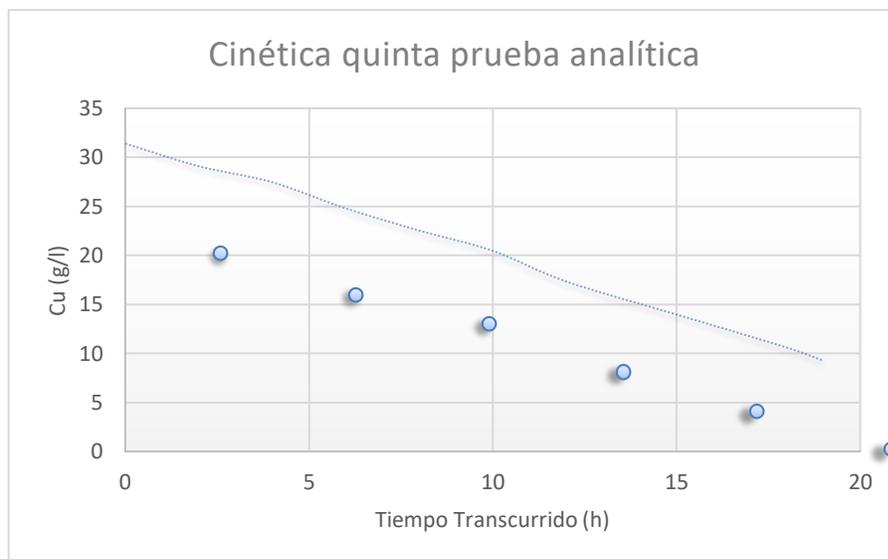


**Figura 4.15. Celda de electroobtención, quinta prueba analítica.**

Del mismo modo a continuación se presentan las concentraciones obtenidas para las muestras recolectadas en la quinta prueba. Ver tabla 4.11

**Tabla 4.11. Concentración de Cu g/L de las muestras tomadas a diferentes tiempos (PRUEBA V)**

| MUESTRA | Absorbancia (U.A.) | Cu g/L | Fd  | Cu g/L* Fd |
|---------|--------------------|--------|-----|------------|
| 0       | 0,333              | 0,314  | 100 | 31,4       |
| 2       | 0,309              | 0,291  | 100 | 29,1       |
| 4       | 0,292              | 0,275  | 100 | 27,5       |
| 6       | 0,522              | 0,496  | 50  | 24,8       |
| 8       | 0,475              | 0,451  | 50  | 22,5       |
| 10      | 0,432              | 0,409  | 50  | 20,5       |
| 12      | 0,367              | 0,347  | 50  | 17,3       |
| 15      | 0,297              | 0,279  | 50  | 14,0       |
| 18      | 0,227              | 0,212  | 50  | 10,6       |
| 19      | 0,199              | 0,185  | 50  | 9,26       |



**Figura 4.16. Gráfica de la cinética, quinta prueba analítica.**

Esta última prueba muestra que al aumentar la intensidad de corriente mejora la recuperación de cobre desde la solución, lo que también se observa desde la cantidad que queda en solución en la última muestra obtenida. Además, cualitativamente hablando los cátodos formados fueron de gran calidad ya que poseen un lindo brillo metálico y se ven compactos y lisos. Cabe la siguiente interrogante, ¿Se obtendrá mejores cátodos y mejor recuperación aumentando la intensidad de corriente a 6 A o más?

Sin embargo, por razones del tiempo necesario para realizar cada prueba, se debe dejar el trabajo hasta aquí, pero se sugiere a grupos de trabajo del proyecto de especialidad que sigue continuar aumentando poco a poco la intensidad de corriente hasta ver que ya no es posible mejorar.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

### 5.1. CONCLUSIONES

- ✓ Se definen los parámetros de estudio, tales como, intensidad de corriente, distancia entre las placas y tiempo de prueba, considerando principalmente las condiciones del laboratorio en las cuales se debe realizar el estudio, el costo asociado y el tiempo en que se desarrolla.
- ✓ Al aumentar la intensidad de corriente a 5,5 A se observa una menor formación de óxido y mayor electrodeposición del cobre desde la solución en los cátodos, llegando a una recuperación del 75,1% en un tiempo de 19 horas de estudio. Recordando que se partió trabajando con tiempos de 27 horas de proceso, lo que significa un mayor consumo de electricidad lo que encarece los costos y con una recuperación en cátodos de 12,63 %
- ✓ La distancia que permite el trabajo constante de todas las placas mientras dura el proceso de electroobtención resultó ser de 3,5 cm de separación entre las mismas.
- ✓ Es necesaria una mantención constante de la celda, evaluando previo a cada inicio de proceso, las posibles filtraciones que pueda tener, para lo cual se sugiere hacer pruebas con agua y utilizar sellante.

## 5.2. SUGERENCIAS

- ✓ Para evitar riesgo por corte al momento de obtener los cátodos, es importante utilizar huincha aislante en los laterales de las placas de tal forma que un cátodo sea independiente del otro para una misma placa.



**Figura 5.1. cátodo con huincha aislante**

- ✓ Ánodos y cátodos se deben limpiar en ácido diluido una vez finalizado cada taller de electroobtención, de tal forma de proteger las placas y sacar el óxido que se forma en el ánodo de plomo



**Figura 5.2. Lavado de Ánodos**

- ✓ Existe un riesgo al exponerse a las placas de plomo, por lo cual se sugiere siempre utilizar guantes y mascarilla durante el uso y funcionamiento de la celda.
- ✓ Por razones del tiempo acotado de estudio para realizar el proyecto de titulación no es posible averiguar en el presente estudio si al subir la intensidad de corriente a 6 A o más, por ejemplo, permitirá seguir mejorando en cuanto a la recuperación y acortando los tiempos de proceso, sin perjudicar la calidad del cátodo, por esta razón se sugiere continuar el estudio a futuras generaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

Aragón J. “Apuntes electroquímica”, Universidad Arturo Prat. 2007.

Bolbarán. M, “Estudio de viabilidad técnica del proyecto de electrodeposición de cobre a partir de soluciones impuras en planta Enami” Tesis Ing. de Ejecución en Metalúrgica Extractiva, Universidad de atacama, 2001.

Cáceres, G. “Hidrometalurgia y electrometalurgia”; Copiapó, Universidad de Atacama, 2000. Pág. 5  
– 12

Codelco Educa. (s.f.). “Proceso de electroobtención”. Recuperado de: <http://www.codelcoeduca.cl>

Domic, E. (2001) “Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones”, Santiago de Chile.

Scribd. (s.f.). “Electroobtención de cobre en laboratorio”. Recuperado de:  
<https://es.scribd.com/document/411149760/Guia-laboratorio-Electro-Obtencion-de-cobre-doc>

Scribd. (s.f.). “Extracción de metales” Recuperado de:  
<https://www.scribd.com/presentation/320932312/efecto-ph-extraccion-metales>.

Fischer, H. (1969). “The nucleation dependent growth layer a structure element in electro crystallization” Plating 56 (1969), 1229-1233 p.

Mantell, L. (1959) “Electrodeposition of Powder Metallurgy”, J. electrochemical. Soc., 106, 70-74.

Segura, J. (2000). “Estudio y Modelación de la morfología de electro depósitos de cobre”, Tesis Ing. Civil Química, Universidad de Chile, Santiago, Chile.