



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

SEDE VALLENAR

FACULTAD TECNOLÓGICA

ÁREA DE GEOMINERÍA

**“IMPLEMENTACIÓN DE REDISEÑO DE CELDA DE FLOTACIÓN TIPO
DENVER, EN EL LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO DE LA
UNIVERSIDAD DE ATACAMA, SEDE VALLENAR”**

Profesora Guía: Mg Carolina Elizabeth Venegas Abarzúa

Agustín Alfonso Contreras Godoy

Yenifer Olgún Contreras

Eliana Leticia Valenzuela Páez

Vallenar, Chile 2022

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la sabiduría y fuerza día a día para seguir adelante con mis metas y propósitos, agradecer en especial a nuestra profesora de corte Mg. Carolina Venegas Abarzúa por su paciencia y comprensión, y además de entregarnos todos sus conocimientos para desarrollarnos en ser mejor personas y excelentes profesionales. Un agradecimiento especial a nuestros compañeros docentes de la universidad en lo general, muchas gracias por dejarme ser partícipe de esta gran institución que nos entregó las herramientas necesarias para finalizar una nueva etapa como profesionales.

En especial dar las gracias a nuestras familias por estar presente en el transcurso y el término de esta etapa universitaria, por el apoyo incondicional que nos brindaron en cada momento, dando ejemplos de superación, humildad y valoración, incitándonos a seguir adelante cada día.

También agradecer de forma muy especial a Laboratorio San Lorenzo, quien nos apoyó de forma gratuita en los análisis de las muestras que realizamos.

A todos quienes estuvieron estos dos años de mucho esfuerzo les dedico este presente informe de tesis.

ÍNDICE

1.1.	INTRODUCCIÓN.....	12
1.2.	OBJETIVO GENERAL.....	13
1.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.4.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.5.	HIPÓTESIS.....	14
1.6.	ANTECEDENTES.....	15
1.7.	JUSTIFICACIÓN.....	16
1.8.	ALCANCE.....	16
2.1.	UNIVERSIDAD DE ATACAMA.....	17
2.1.1.	CAMPUS CASA CENTRAL.....	17
2.1.2.	SEDE VALLENAR.....	18
2.2.	METALURGIA.....	20
2.3.	PROCESOS METALÚRGICOS.....	21
2.4.	OPERACIONES BÁSICAS DE OBTENCIÓN DE METALES.....	21
2.5.	LA METALURGIA EXTRACTIVA.....	22
2.5.1.	CONCENTRACIÓN DE MENAS.....	22
2.5.2.	OBJETIVOS DE LA METALURGIA EXTRACTIVA.....	22
2.5.3.	ETAPAS DE LA METALURGIA EXTRACTIVA.....	22
2.6.	MENA.....	23
2.7.	PROCEDIMIENTO DE LA METALURGIA EXTRACTIVA.....	24
2.8.	HIDROMETALURGIA.....	25
A.	LIXIVIACIÓN.....	27
	OPERACIÓN DEL PROCESO:.....	28
	ETAPAS DE LA LIXIVIACIÓN:.....	29
B.	EXTRACCIÓN POR SOLVENTES.....	29
C.	ELECTROMETALURGIA.....	31
D.	ELECTROREFINACIÓN.....	32
	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO:.....	32
E.	GALVANOPLASTÍA.....	34
F.	ELECTROCONFORMADO.....	35
G.	ELECTROOBTENCIÓN.....	36
2.9.	PIROMETALURGIA.....	37
2.9.1.	SECADO.....	38

2.9.2. CALCINADO O CALCINACIÓN.	39
2.9.3. TOSTACIÓN	40
2.9.4. REFINO	40
2.9.5. VOLATILIZACIÓN	41
VENTAJAS DE LA PIROMETALURGIA.....	41
DESVENTAJAS	42
2.10. FLOTACIÓN	42
2.10.1. REACTIVOS Y COLECTORES DE FLOTACIÓN	44
A. COLECTOR.	44
B. ESPUMANTES.	46
C. MODIFICADORES.....	47
2.10.2. PARTÍCULAS HIDROFÓBICAS.	48
2.10.3. PARTÍCULAS HIDROFÍLICAS.	49
2.10.4. PROCESO DE LA FLOTACIÓN EN LA MINERÍA.....	50
2.10.5 LOS PARÁMETROS DE CONTROL DE LA CELDA DE FLOTACIÓN.....	52
A. NIVELES DE PULPA:.....	52
B. ETAPAS DE LA PRODUCCIÓN DE BURBUJAS:	53
C. FLUJO DE AIRE PARA LA AGITACIÓN:.....	53
D. MEDICIÓN DE pH:	54
2.10.6. FASES DE LA FLOTACIÓN.	55
2.10.7. EQUIPOS DE FLOTACIÓN.....	56
A. LA CELDA MECÁNICA.	59
B. CELDA NEUMÁTICA.	62
2.10.8. CELDAS COLUMNAS DE FLOTACIÓN	65
2.10.9. FLOTACIÓN BULK	68
LAS ETAPAS DE LA FLOTACIÓN.....	69
3.1 REDISEÑO.....	72
3.2. CONSTRUCCIÓN	74
ESTANQUE:	74
AGITADOR:	75
SISTEMA DE AIREACIÓN:.....	75
AGITADOR:	77
SISTEMA DE AIREACIÓN.....	80
MATERIALES	81
3.3. PRUEBAS ANALÍTICAS	83

3.3.1. MATERIALES Y EQUIPOS PARA EL PROCESO:.....	83
3.3.2. EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL A UTILIZAR ANTES DE REALIZAR LA FLOTACIÓN SON:	84
3.3.4.PRUEBAS EN CELDA DE FLOTACIÓN:.....	85
3.3.5. DATOS RECOPIADOS:.....	86
3.3.6. FÓRMULA PARA CALCULAR PESO DEL MINERAL:.....	86
3.4. DETERMINACIÓN DE COBRE TOTAL DE CONCENTRADO POR VOLUMETRÍA.....	94
REACTIVOS:.....	95
3.4.1 PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN DE COBRE.....	96
CAPITULO IV.....	99
4.1. CONFECCIÓN Y RESULTADOS.....	99
4.2. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	103
FORMULA PORCENTAJE DE Cu EN FINO DE ALIMENTACIÓN.....	106
FORMULA PARA RECUPERACIÓN.....	106
GRÁFICO DE MUESTRAS Y SU PORCENTAJE DE COBRE TOTAL	108
CONCLUSIÓN	116
BIBLIOGRAFIA:	118

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. UNIVERSIDAD DE ATACAMA, CASA CENTRAL, COPIAPÓ.....	18
FIGURA 2.2. UNIVERSIDAD DE ATACAMA, SEDE VALLENAR	19
FIGURA 2.3. METALURGIA EXTRACTIVA.....	20
FIGURA 2.4. MUESTRAS DE MENA MINERAL	24
FIGURA 2.5. PILAS DE LIXIVIACIÓN.....	27
FIGURA2.6. ESQUEMA DE LA EXTRACCIÓN POR SOLVENTES.....	31
FIGURA 2.7. LABORATORIO DE ELECTROMETALURGIA.....	32
FIGURA 2.8. ELECTROREFINACIÓN DEL COBRE.....	33
FIGURA 2.9. GALVANOPLASTÍA.....	34
FIGURA 2.10. PIEZAS ELABORADAS POR ELECTROCONFORMADO DE COBRE.....	35
2.11. ELECTROOBTENCIÓN DE COBRE.....	36
2.12. PIROMETALURGIA.....	37
FIGURA 2.13. HORNO ROTATORIO PARA SECADO	38
2.14. HORNO DE CAL.....	40
FIGURA 2.15. REFINO A FUEGO	41

FIGURA 2.16. FLOTACIÓN SOLUBLE DE COBRE.....	43
FIGURA 2.17 COLECTOR.....	45
FIGURA 2.18 ESPUMANTE.....	47
FIGURA 2.19. PARTÍCULA HIDROFÓBICA.....	48
FIGURA 2.20 PARTÍCULA.....	49
FIGURA 2.21 COMPARACIÓN HIDROFÓBICO v/s HIDROFÍLICO.....	50
51	
FIGURA 2.22. PARÁMETROS DE LA FLOTACIÓN.....	51
FIGURA 2.23.FASES DE LA FLOTACIÓN.....	56
FIGURA 2.24 ZONAS DE LA FLOTACIÓN.....	59
FIGURA 2.25. CELDA MECÁNICA.....	61
B. CELDA NEUMÁTICA.....	62
FIGURA 2.24. CELDA DE FLOTACIÓN WEMCO.....	62
FIGURA 2.25. CELDA WEMCO LAGUNA SECA.....	63
63	
FIGURA 2.26. CELDA MECÁNICA.....	63
FIGURA 2.27 CELDA EKOFLOT.....	64
FIGURA 2.28 CELDA NEUMÁTICA DE FLOJO TANGENCIAL.....	64
FIGURA 2.29. CIRCUITO DE COLUMNA DE FLOTACIÓN.....	67
67	
FIGURA 2.30. CIRCUITO DE COLUMNA DE FLOTACIÓN.....	67
FIGURA 2.31. COLUMNA DE FLOTACIÓN.....	68
FIGURA 2.32. CIRCUITO DE LAS ETAPAS DE FLOTACIÓN.....	69
FIGURA 2.33. CIRCUITO DE CELDA SCAVENGUER.....	70
FIGURA 2.34. CIRCUITO CON COLUMNA DE FLOTACIÓN ETAPA CLEANER.....	71
FIGURA 3.1 TANQUE DE ACERO INOXIDABLE.....	73
FIGURA 3.2. TABLA QUE MUESTRA DIMENSIONES DE LA CELDA DENVER D12.....	73
FIGURA 3.3. PLANCHAS DE ACERO INOXIDABLE DE 5 MM DE ESPESOR.....	74
FIGURA3.4. TALADRO DE PROYECTO.....	75
FIGURA3.5. COMPRESOR SISTEMA DE AIREACIÓN.....	76
FIGURA 3.6..ESTANQUE AÑO 2020.....	76
FIGURA 3.7. FABRICACIÓN DE ESTANQUE.....	77
FIGURA3.8. DE ASPA DE AGITADOR AÑO2020.....	77
78	
FIGURA 3.9.ASPA DE AGITADOR AÑO 2022.....	78

FIGURA 3.10.MOTOR DE AGITADOR CON PEDESTAL AÑO 2020	79
FIGURA 3.11. MOTOR DE AGITADOR AÑO 2022	79
FIGURA 3.12.SISTEMA DE AIREACIÓN	80
FIGURA 3.13. LÍNEA DE AIRE AÑO 2022.....	80
FIGURA3.15. SISTEMA DE AIREACIÓN AÑO 2022	81
FIGURA 3.16. TABLA DE PRESUPUESTO	82
FIGURA3.17. PRUEBA CON AIRE.....	82
FIGURA 3.18. PRUEBA CON AGITACIÓN	83
FIGURA 3.19 PESO DEL ESPUMANTE	88
FIGURA 3.20 PESO DEL COLECTOR.....	88
<i>FIGURA 3.21. PESO DEL MINERAL.....</i>	89
<i>FIGURA 3.22. AGUA AGREGADA</i>	89
FIGURA 3.23. ESTANQUE CON REBALSE.....	90
<i>FIGURA 3.24. MODIFICADOR DE PH.....</i>	91
FIGURA 3.25. INDICADOR DE PH.....	91
FIGURA 3.26 FLOTACIÓN DE MINERAL	92
FIGURA 3.27.RECUPERACIÓN DE MINERAL	92
FIGURA 3.28. CONCENTRADO EN EL HORNO DE SECADO	93
<i>FIGURA 3.29. MUESTRA ROTURADA Y PESADA.....</i>	94
3.4. DETERMINACIÓN DE COBRE TOTAL DE CONCENTRADO POR VOLUMETRÍA.....	94
FIGURA 3.30. PESO TIOSULFATO EN LA BALANZA	96
97	
FIGURA 3.31. DILUCIÓN DE TIOSULFATO	97
FIGURA 3.32 PESO DE HIDRÓXIDO DE SODIO.....	98
FIGURA 4.1 TRAZADO DE ESTANQUE	99
FIGURA 4.2 UNIÓN Y ARMADO DE ESTANQUE	100
FIGURA 4.3 PULIDO DE ESTANQUE Y FABRICACIÓN DE LÍNEA DE AIRE	101
<i>FIGURA 4.4 FABRICACIÓN DE PEDESTAL DE MOTOR.....</i>	101
FIGURA 4.5. TERMINACIÓN Y PULIDO.....	102
FIGURA 4.6 PRESENTACIÓN DE CELDA DENVER TERMINADA.....	102
FIGURA 4.7. PRUEBA CON AGUA PARA VERIFICAR FILTRACIONES	103
FIGURA 4.8 RESULTADO DE ANILISIS	104
FIGURA 4.9. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS	105
FIGURA 4.10. TABLA DE DATOS FINALES.....	107
FIGURA 4.11. GRÁFICO PORCENTAJE DE CU	108

RESUMEN

Este proyecto comenzó a través de la evaluación de la celda de flotación tipo Denver, construida por estudiantes de proyecto de titulación de años anteriores, ubicada en el laboratorio químico metalúrgico de la Universidad de Atacama, Sede Vallenar. Este análisis arrojó evidencias de filtraciones, problemas en el sistema de aireación y agitación ya que eran ineficientes e inestables para la recuperación del mineral a flotar, haciendo inviable su uso por más tiempo.

El objetivo del proyecto es implementar un rediseño que permita así, resultados óptimos, modificando principalmente el material con el cual se encuentra construida y generando un soporte de agitación y aireación más eficiente y estable en el tiempo. Para su implementación se necesita desarrollar algunas pruebas que permitan verificar su funcionamiento e ir adecuando las condiciones para que todos puedan saber cómo manejar dicho equipo.

Se ejecutó una investigación sobre los elementos, agitación y sistema de aireación de la celda tipo Denver, a través de la investigación en diversas plataformas en línea, donde pudimos hallar diversos modelos similares, revisando diferentes videos, nos permitió conocer en profundidad y detalladamente el funcionamiento del equipo en cuestión, y pesquisar diversas empresas que comercializan este tipo de equipos, identificando materiales y herramientas con las cuales se pueden confeccionar.

La celda se construyó con planchas de acero inoxidable de 5 mm de espesor. Lo mismo que el soporte del motor que lo proporciona un taladro Bosch modelo GSH450 que alcanza alrededor de 900 rpm, también la vara de agitación es de acero inoxidable de 6 mm de espesor y en la base que se pone en contacto con la pulpa tiene un sistema de aspas, que permite que no se genere un vórtex.

Se realizaron pruebas con calcopirita como mineral, ajustando a pH 12 al inicio, el cálculo del volumen útil de la celda arrojó que la masa de mineral a flotar debía ser de 1275 g y se agrega agua colector y espumante hasta completar una masa de 2296 g. El colector y el espumante se agregaron de acuerdo a la sugerencia de g por tonelada de mineral indicados por el proveedor.

Los resultados muestran que se pudo concentrar, pero no lo esperado ya que faltó tiempo y mineral para poder realizar más pruebas de optimización de parámetros, por lo que se sugiere que las futuras generaciones retomen este trabajo y puedan concretar cuáles son los valores óptimos para cada variable operacional.

Se concluye que fue posible construir una celda de flotación tipo Denver con materiales de calidad y con un sistema de agitación y aireación que permiten dar la continuidad que el proceso necesita. Las pruebas analíticas realizadas en el laboratorio dan cuenta de que es posible concentrar en la celda aunque todavía falta realizar más pruebas que permitan optimizar los parámetros, específicamente cantidad de colector, de espumante e incluso tiempo de residencia.

ABSTRACT

This project starts by the Denver-type flotation cell evaluation, this cell being built by the students on the titulation project of the U.D.A Vallenar campus on previous years.

When it was reviewed, leaks were seen in addition to having an unstable aeration and agitation system making it inefficient for the recovery of the mineral to float, making it non-viable for precise results.

To reach the goal of the project we need to implement a redesign that allows optimum results, mainly modifying the base material and making a more efficient agitation and aeration support. For its implementation its needed to review the functioning of the cell to adapt the conditions for making it more intuitive for using.

An investigation is carried out on the elements, agitation and the aeration system of the cell, where we found many similar models, through the analysis of various videos, we could know in detail its operation and inquire many enterprises that commercialize this type of equipment

The cell was built with stainless steel plates with an 5mm thickness, the same as the motor support provided by a Bosch drill GSH450 reaching 900 RPM, stainless steel stirring rod of 6mm thickness and a base that makes contact with the pulp in a blade system that doesn't allows a vortex.

Tests were made with chalcopyrite, adjusting pH 12 at first, the calculation of the useful volume of the cell pointed that the mass of the mineral to float needed to be 1275g adding water, collector and sparkling till reach 2296g, being these materials added as the provider designated.

The results show that it could concentrer but it didn't end up as expected due to a lack of time and mineral to make more parameter and optimization tests, leading this task to future generations to determine which values are optimum for every operational variable

In conclusion, it was possible to build a type-Denver flotation cell with quality materials with agitation and aeration system that allows the continuity that the process needs.

The analytic tests made on the laboratory pointed out that is possible to concentrate in the cell although more tests still need to be done to optimize the parameters, specifically collector quantity, sparkling and residence time.

CAPÍTULO I: MARCO INTRODUCTORIO

1.1.INTRODUCCIÓN

La flotación es un proceso de separación fisicoquímico previo a la pirometalurgia, la cual, busca recuperar la mayor concentración de los minerales de cobre que, a partir de los minerales de mena y ganga, concentra una especie de mineral valioso por medio de adhesión de burbujas de aire, al estar en contacto con reactivos, colectores, modificadores de pH, activadores y espumantes.

En esta oportunidad, se procesará una muestra de cobre en la que, el mineral de interés será calcopirita entregada por el laboratorio de la universidad de Atacama, sede Vallenar. La calcopirita será inducida a un proceso de Hidrofobicidad, selectivamente en las partículas, y se determinará la cantidad de reactivo que deberá llevar bajo al escenario de flotabilidad, determinado para generar una buena recuperación. La calcopirita flota en condiciones superiores de un pH (8-9) por lo tanto, se deberá regular el pH sobre (9) y se deberá agregar cal en pequeñas cantidades, para lograr mejores resultados y un acondicionamiento más rápido.

El presente estudio, pretende investigar cambios de parámetros de celda de flotación, para así aumentar la eficacia y una buena concentración del mineral procesado modificando el pH.

Dentro de las diversas terminologías a utilizar en este estudio, debemos entender principalmente que la flotación es el proceso de concentración de minerales más utilizado en Chile, el cual, genera mayor recuperación de material valioso en la minería nacional. Esto se refleja en las grandes cantidades de cobre que año a año se extraen con este proceso. Este es un método de concentración de minerales en húmedo, en donde se procura separar las partículas de minerales útiles, es decir, que poseen valor comercial (mena) de otros minerales que no cumplen con estas características (ganga), en la que se aprovechan las propiedades físico-químicas superficiales de las partículas, para efectuar una

separación de materiales desde sus pulpas acuosas por medio de burbujas de gas y en base a sus propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas. (Codelco, 2019)

En Sede Vallenar, específicamente en el laboratorio de metalurgia, desde hace unos años se encuentra disponible una celda de flotación, que presenta múltiples deficiencias que dificulta la obtención de resultados favorables, es por esta razón que se propone como proyecto de título, optimizar los parámetros que permitan las mayores recuperaciones metalúrgicas. Por lo que nuestro principal objetivo es: rediseñar una celda de flotación tipo Denver a escala de laboratorio.

1.2.OBJETIVO GENERAL

Implementar el rediseño de Celda de flotación tipo Denver, en el laboratorio químico metalúrgico de la Universidad de Atacama, Sede Vallenar.

1.3.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Rediseñar celda de flotación tipo Denver, a escala de laboratorio.
- ✓ Construir celda de flotación tipo Denver de acuerdo al rediseño.
- ✓ Realizar pruebas de laboratorio para la implementación de la celda.

1.4.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La celda de flotación tipo Denver, ubicada en el laboratorio químico de la universidad Atacama, sede Vallenar, se encuentra en condiciones desfavorables para la realización de cualquier prueba de flotación. Ésta tiene varias filtraciones de agua y pérdida de mineral, inhibiendo que el resultado de la flotación sea verídico.

El agitador que utiliza esta celda, es un taladro implementado por los estudiantes de metalurgia de la universidad de Atacama, el cual, no permite asegurar la suspensión de todas las partículas, y una adecuada agitación según los RPM (revoluciones por minuto). El taladro no cuenta con un interruptor automático que permita un encendido continuo, por lo que, se debe mantener manualmente presionado el botón, generando mayor tiempo y desgaste físico del estudiante durante el proceso que tarda la prueba de flotación de mineral, lo que impide un constante grado de agitación.

La inyección de aire está creada en el laboratorio por un compresor y una manguera, la que no cuenta con un punto fijo de apoyo para la correcta aireación, que permita una continuidad para las burbujas de aire que se requieren en el proceso de flotación, en beneficio de la recuperación del mineral a flotar.

1.5.HIPÓTESIS

Al mejorar la calidad de la celda de flotación tipo Denver, con la incorporación del nuevo agitador modificado, los ajustes para los RPM, y sistema de aireación continua, esperamos que este proyecto pueda obtener mejores recuperaciones del mineral de cobre, principalmente al mantener una agitación y aireación constante, y así obtener una buena homogenización de los reactivos, colectores y modificadores entre sí.

1.6.ANTECEDENTES

El Laboratorio Metalúrgico de la Sede Vallenar, cuenta con una celda de flotación tipo Denver a escala de laboratorio, la cual, fue diseñada a través del programa AutoCAD y elaborada con material acrílico de 4mm.

Recogemos como antecedente fundamental en nuestra investigación, prueba realizada el año 2021 en Celda Denver ubicada en el laboratorio de la Universidad. Esta prueba consistió en ejecutar una optimización de parámetros, además de la realización de diversos análisis para establecer una mejor concentración y recuperación de la mineral calcopirita, la determinación de cobre total, por volumetría; además determinar el pH óptimo para lograr mayor recuperación. En esta prueba, arrojó como resultado que de un pH 11,98 y 12,34, se logra obtener una recuperación mayor al 80%. Año anterior a esto, se realizó una prueba de las mismas características, donde se utilizó un pH 10 y 11, los cuales obtuvieron una recuperación de tan solo el 20%.

El segundo parámetro, optimizado corresponde a la adición de reactivo (espumante), en la experiencia anterior se adicionaron 0,1200 g de Mibc logrando una mejor resistencia en las burbujas. Seguido por la optimización del colector donde se adicionaron 0,0400 g.

1.7.JUSTIFICACIÓN

Este proyecto tiene como objetivo rediseñar e implementar una Celda de flotación tipo Denver a escala de laboratorio, que permita resultados óptimos y fidedignos para que las y los futuros profesionales de esta institución, puedan realizar pruebas de flotación de alta calidad, que contribuya en la adquisición de experiencia y conocimientos para el ámbito profesional y laboral. Así como, también puedan desarrollar futuras investigaciones que contribuyan al campo de la metalurgia o mineralurgia.

1.8.ALCANCE

La nueva celda elaborada, será destinada a dependencias de nuestra Universidad en escala de laboratorio, con la finalidad de ser un aporte para las y los futuros estudiantes de las diferentes especialidades relacionadas con la minería. Esta permitirá, realizar pruebas de flotación de minerales, con parámetros más cercanos a los arrojados por la actual celda ubicada en el laboratorio. También se proyecta a futuro pueda beneficiar a la comunidad de la Provincia del Huasco toda vez que se puedan prestar servicios de análisis para pequeños y medianos mineros en el laboratorio de la Sede.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

2.1. UNIVERSIDAD DE ATACAMA.

2.1.1. CAMPUS CASA CENTRAL.

La Universidad de Atacama fue fundada en el año 1981 tras el proceso de descentralización de la Universidad Técnica del Estado. Sus inicios se remontan a 1857, cuando se fundó la escuela de minas de Copiapó, conformada por los académicos de primer nivel traídos muchos de ellos directamente de Europa.

Se señala que, gracias a la Escuela normal de Copiapó, se pudo chilenizar el Norte Grande conquistando en la Guerra del Pacífico, porque en ésta eran formados por los profesores primarios necesarios para formar a las nuevas generaciones de “nuevos” chilenos. De la fusión de la Escuela de Minas y de la Escuela nace la Universidad técnica de Estado, Sede Copiapó.

El 26 de octubre de 1981, el General Augusto Pinochet firmó el D.E.L N° 37, crea la corporación de derecho público y patrimonio propio denominada Universidad de Atacama, siendo su primer rector el ingeniero Vicente Rodríguez Bull (1981-1989), quien durante su rectorado echó las bases del desarrollo institucional de ésta, debiendo sortear difíciles momentos políticos y escomidos y sociales que afectaban al Chile de la década de los ochenta.

La Universidad de Atacama, como continuadora legal e histórica de la Universidad técnica del estado y de la escuela de minas de Copiapó, ha mantenido el nivel de exigencia de estas causas de estudios y la característica de ser una “Universidad aplicada”, especialmente en lo que respecta a las carreras vinculadas a la minería.

La principal versión de Universidad de Atacama es buscar aire de renovación constante conforme a las demandas y avances de nuestra sociedad. Con la alta calidad de los

profesionales que nos acompañan, buscamos ser y seguir siendo una institución de Educación Superior reconocida y valorada por nuestra responsabilidad social, gestión y contribución al desarrollo de la Región de Atacama y, desde ella, proyecta un desarrollo hacia el resto del país.

Su misión es la innovación y la excelencia de su proyecto educativo, enfocados en la entrega de sus conocimientos, junto con la preparación integral de nuestros alumnos, quienes obtendrán las herramientas necesarias para cumplir un servicio guiado hacia el desarrollo de nuestro país y nuestra región. (UNIVERSIDAD DE ATACAMA, 2021)



Figura 2.1. Universidad de Atacama, Casa Central, Copiapó

2.1.2. SEDE VALLENAR

En la actualidad Sede Vallenar se ubica en la Provincia de Huasco, en la comuna de Vallenar. Han cumplido 30 años de existencia en el valle, con una matrícula cercana a los 1000 estudiantes, una dotación docente mayoritariamente con grados académicos de Magísteres, y una oferta académica de carreras técnica e Ingenieras en Ejecución, que se fortalecerá en el año 2023 con la educación de Postgrado, Postítulos, Diplomados y cursos en concordancia con el plan de Desarrollo Estratégico de la Sede, y de la Universidad.

La Sede Vallenar cuenta con espacios de infraestructura e implementación para concretar Modelo Educativo con enfoque en competencias de la Universidad, y seguir formando los profesionales y técnicos que requiere la provincia, la Región de Atacama y nuestro país. El desarrollo del Macro Unidad Académica está en manos de la comunidad universitaria para seguir atendiendo las demandas de formación de pre y postgrado no solo de nuestra región, sino también de las otras zonas de Chile. (UNIVERSIDAD DE ATACAMA, 2021)

El campus Sede Vallenar cuenta múltiples laboratorios que son:

- ✓ Laboratorio de Geominería.
- ✓ Laboratorio de mecánicas Herramientas-Maquinas y Mantención.
- ✓ Laboratorio de Automatización.
- ✓ Laboratorio Químico Metalúrgico.
- ✓ Laboratorio de Prevención de Riesgos.
- ✓ Laboratorios de Computación, entre otros.



Figura 2.2. Universidad de Atacama, Sede Vallenar

2.2. METALURGIA.

La Metalurgia es el Arte y la Ciencia técnica de obtención y tratamiento de metales a partir de sus minerales, también estudia la producción de aleaciones con forma y propiedades adecuadas para el uso y el control de calidad de los procesos.

La metalurgia química se ocupa principalmente de la reducción y la oxidación de los metales, así como del rendimiento químico de los mismos. Los temas de estudio incluyen el procesamiento de minerales, la extracción de minerales, la termodinámica, la electroquímica y la degradación química (corrosión). Incluyendo la unificación de los diferentes entre sí (aleaciones). (Figura 2.3)

En cambio, la metalurgia física se centra en las propiedades mecánicas de los metales, las propiedades físicas de los metales y el rendimiento físico de los metales. Los temas estudiados en la metalurgia física incluyen la cristalografía, la caracterización de minerales, la metalurgia mecánica, las transformaciones de fase y el mecanismo de fallo. (CODELCO, s.f.)



Figura 2.3. Metalurgia extractiva.

2.3. PROCESOS METALÚRGICOS

Los procesos metalúrgicos comprenden las siguientes fases.

- ✓ Obtención del metal a partir del mineral que lo contiene en estado natural, separándolo de la ganga.
- ✓ El afino, enriquecimiento o purificación: eliminación de las impurezas que quedan en el metal.
- ✓ Elaboración de aleaciones.
- ✓ Otros tratamientos del metal para facilitar su uso.

2.4. OPERACIONES BÁSICAS DE OBTENCIÓN DE METALES.

Operaciones físicas: triturado, molido, filtrado (a presión o al vacío), centrifugado, decantado, flotación, disolución, destilación, secado, precipitación física.

Operaciones químicas: tostación, oxidación, reducción, hidrometalurgia, electrólisis, hidrólisis, lixiviación mediante reacciones ácido-base, precipitación química, electrodeposición, cianuración.

La metalurgia contiene subdivisiones que son:

- ✓ Metalurgia general o metalurgia extractiva.
- ✓ Metalurgia o estado metálico.
- ✓ Metalurgias especiales.

2.5. LA METALURGIA EXTRACTIVA.

Área donde se estudian y aplican operaciones y procesos para el tratamiento de minerales que contengan una especie útil, también procesos químicos y sus fundamentos necesarios que beneficia una mena mineral primaria o un material susceptible de reciclar, obteniendo a partir de ello, el metal más o menos puro, o bajo la forma de algunos de sus compuestos. Dentro de los procesos que encontramos en esta ciencia son:

2.5.1. CONCENTRACIÓN DE MENAS.

- ✓ Metalurgia seca o pirometalurgia.
- ✓ Metalurgia húmeda o hidrometalurgia
- ✓ Electrometalurgia electroquímica:
- ✓ Electrometalurgia por caldeo o electrotérmica.
- ✓ Electrometalurgia por descomposición o electrolisis.

2.5.2. OBJETIVOS DE LA METALURGIA EXTRACTIVA.

- ✓ Utilizar procesos y operaciones.
- ✓ Alcanzar la mayor eficiencia posible
- ✓ Obtener altas recuperaciones (especie de valor en productos de máxima pureza).
- ✓ No causar daño al medio ambiente.

2.5.3 ETAPAS DE LA METALURGIA EXTRACTIVA.

- ✓ Transporte y almacenamiento.
- ✓ Conminución
- ✓ Clasificación
- ✓ Separación de metal de la ganga

- ✓ Purificación y refinación.

2.6. MENA

Es el material natural del que se puede extraer minerales o metales con beneficio económico, las menas se explotan mediante un proceso de minería en yacimientos minerales también llamados depósitos de minerales, o asociación de minerales a partir del cual uno o más metales pueden ser obtenidos de forma económica. Considerarse los siguientes factores:

- ✓ El tamaño y la morfología del cuerpo del mineral.
- ✓ El espesor y el tipo del escarpe superficial.
- ✓ La localización, rumbo y buzamiento del depósito.
- ✓ Las características físicas y resistencia de la roca encajonaste.
- ✓ La presencia de sustancias de aguas subterráneas.
- ✓ Factores económicos involucrados con la operación, el proceso de explotación y extracción incluyendo la ley y el tipo de mineral.
- ✓ Factores ecológicos y ambientales tales como la conservación del entorno topográfico original en el área de minado y prevención de sustancias nocivas que contaminen las aguas o la atmósfera.
- ✓ La presencia de elementos tóxicos o de difícil comercialización.

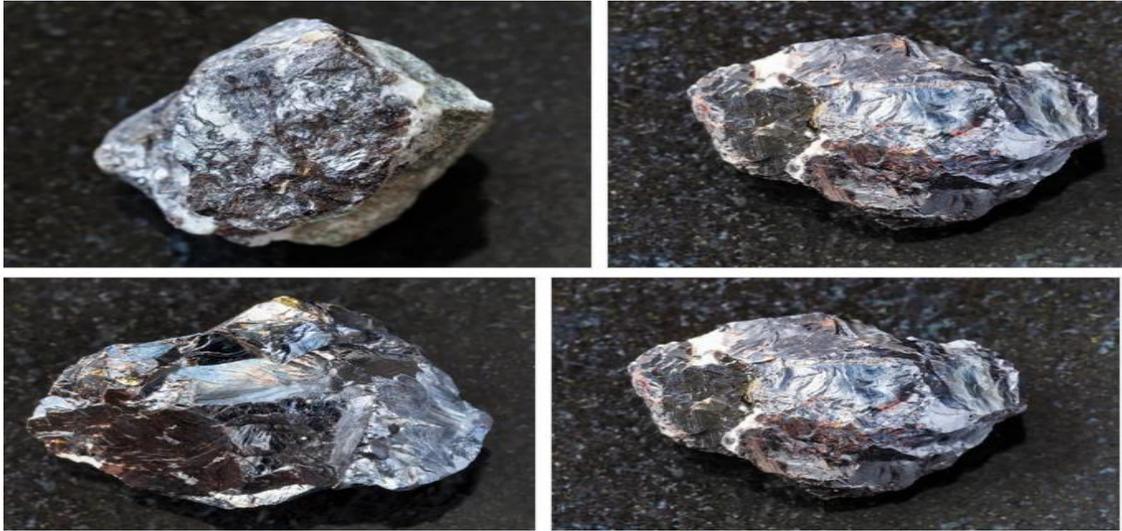


Figura 2.4. Muestras de mena mineral

2.7. PROCEDIMIENTO DE LA METALURGIA EXTRACTIVA

La metalurgia extractiva corresponde al conjunto de procesos que se llevan a cabo para separar selectivamente las especies de interés de aquellas sin valor.

Dentro del área de metalurgia extractiva se encuentran aquellas de hidrometalurgia, pirometalurgia, entre las áreas de investigación del grupo se encuentra los procesos de lixiviación bacteriana.

2.8. HIDROMETALURGIA

Es la rama de la metalurgia extractiva que estudia la extracción y recuperación de metales usando soluciones líquidas, acuosa y orgánicas. que permiten la extracción y obtención de metales y/o compuestos desde sus minerales o materiales de reciclaje (chatarras, escorias, cementos metálicos, barras anódicas, etc.).

En general los metales extraídos por esta técnica son provenientes de los metales anteriormente lixiviados en medios de sulfatos, cloruro, amoniacal, etc. Metales como cobre, níquel, vanadio, cromo y uranio, son extraídos de esta forma.

El proceso se basa en la concentración de soluciones en uno a varios elementos de interés metales presente como iones, que por reacciones reversibles y diferencias físicas de la solución son separados y aislados de forma específica. Como resultado se obtiene una solución rica en ion de interés y con características propicias para la próxima etapa productiva.

Los procesos hidrometalúrgicos normalmente operan a temperaturas bajas (en rango de 25 a 250°C). Las presiones de operación pueden variar de unos pocos kPa (kilopascales) (vacío) hasta presiones tan altas como 5000kPa. (Schulz, 2013)

La hidrometalurgia se subdivide en tres ramas importantes, las cuales son:

- ✓ Lixiviación.
- ✓ Concentración y Purificación.
- ✓ Precipitación.

Ventajas de la hidrometalurgia.

- ✓ Bajo capital y bajo costo operacional
- ✓ Posibilidad de tratar minerales pobres o incluso marginales.
- ✓ Alta selectividad y alto grado de separación en las reacciones químicas.
- ✓ Alta pureza de los productos.
- ✓ Fácil control y optimización.
- ✓ Ausencia de polución (contaminación de medio ambiente) por gases, especialmente la contaminación del aire producida por las emisiones de SO₂ de las fundiciones.
- ✓ Separación con éxito metales con propiedades muy similares tales como tierras raras individuales.
- ✓ Menor consumo de energía a menas de baja ley
- ✓ Las soluciones de pulpas del proceso se pueden transportar por sistema de cañerías cerradas.

Desventajas de la hidrometalurgia.

- ✓ Velocidades de reacción lentas.
- ✓ Poca producción por reactor o unidad productiva.
- ✓ Sensible a variaciones en la composición de la alimentación.
- ✓ Problemas en la eliminación y almacenamiento de los residuos sólidos generados.
- ✓ Problemas con la aguas residuales y sólidos.
- ✓ Alto consumo de materiales de proceso, combustible y energía eléctrica.

A. LIXIVIACIÓN.

Es un proceso por el cual se extrae uno o varios solutos de sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido.

La lixiviación está basada en la solubilidad del soluto que se disuelve que se usará para extraerlo. Para que la lixiviación sea efectiva, el soluto debe ser más a fin a la fase líquida que a la fase sólida en la que se encontraba originalmente. Al ser un equilibrio entre las dos fases, la lixiviación al igual que la extracción líquido-líquido, pueden ser cuantitativas (>99,9%) pero nunca totales (100%), esto quiere decir que la fase sólida siempre contendrá una porción de soluto.

Es la operación unitaria fundamental de la hidrometalurgia y su objetivo es disolver en forma parcial o total un sólido con el fin de recuperar algunas especies metálicas contenidas en él.

Este proceso se aplica a las rocas que contienen minerales oxidados, ya que éstos son fácilmente atacables por los ácidos. En la lixiviación del cobre se utiliza una solución de ácido sulfúrico. (Universidad de Santiago de Chile, s.f.)



Figura 2.5. Pilas de lixiviación

La lixiviación tiene una gran importancia en el ámbito de la metalurgia, ya que se utiliza frecuentemente en la extracción de algunos minerales como el oro, plata y cobre.

OPERACIÓN DEL PROCESO:

Tiene un sistema de aspersion que rocía la mezcla de agua y ácido sulfúrico, solución que se encarga de disolver el cobre contenido en los minerales oxidados, formando una emulsión de sulfato de cobre.

Una vez en el lugar de destino, el material se deposita y distribuye ordenadamente formando un montículo continuo de 6 a 8 metros de altura, que se denomina pila de lixiviación. Encima de esta se instala un sistema de riego por goteo y aspersores que cubren toda el área.

El material chancado se lleva en correas transportadoras hacia el lugar en el que será ubicado en pilas. Ya en este trayecto, las rocas mineralizadas se rocían con una solución de agua y ácido sulfúrico para comenzar rápidamente con la Lixiviación. Este procedimiento se conoce como curado.

Para realizar el proceso de Lixiviación se requiere de un patio o superficie de apoyo de la pila, en la que se coloca la impermeabilización. Cuando el patio es recuperado para reutilizarlo con nuevo material se trata de Lixiviación en depósitos. Si el patio no es recuperado y el mineral agotado queda en la pila como vertedero que se restaura, se trata de Lixiviación en pilas. (CODELCO, 2018)

ETAPAS DE LA LIXIVIACIÓN:

Para que la Lixiviación tenga éxito se tienen que cumplir varios requerimientos, siendo el primero asegurar la permeabilidad de la masa a lixiviar, de manera que el líquido lixivante pase a través de todo el material y que el contacto entre el agente lixivante y el mineral sea el óptimo.

Esto depende de los siguientes factores, los que deben ser considerados en todas las etapas del proceso:

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

B. EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

La extracción por solventes involucra la transferencia del ión cúprico desde la solución rica proveniente de la etapa de lixiviación (PLS) a una molécula orgánica, extractante, que está disuelta en un solvente, comúnmente parafina. Durante la extracción, el ión cúprico se intercambia por un ion de hidrógeno (pH 1 a 2). Luego el orgánico cargado se agota en una solución concentrada de ácido sulfúrico, llamada electrolito pobre, proveniente del proceso de electroobtención, esta etapa se conoce como reextracción. El electrolito rico está más concentrado en cobre que la solución de salida de la lixiviación (35 a 50 gpL) y además está prácticamente libre de impurezas. La extracción y reextracción son procesos de extracción líquido-líquido y ocurren en equipos mezcladores-decantadores, donde ambas fases (orgánica y acuosa) se ponen en contacto en contracorriente durante el tiempo

necesario para llevar a cabo el intercambio. Al final, la solución agotada de cobre que sale del proceso de extracción, llamada refino, se recircula a las pilas de lixiviación, conformando parte del riego.

La operación metalúrgica de extracción por solventes, conocida por su sigla en inglés SX, se basa en que la especie metálica de interés, disuelta en una fase acuosa junto con otras impurezas, se transfiere a una fase orgánica, ambas fases no se deben mezclar entre sí, generando una nueva solución acuosa concentrada y pura, desde la que se puede extraer el elemento metálico.

Este proceso tiene distintas aplicaciones y se usa para:

- ✓ Purificar soluciones.
- ✓ Separar uno o más elementos metálicos.
- ✓ Concentrar el elemento de interés en una fase acuosa, para su posterior recuperación.

Se produce un equilibrio en el cual el cobre en solución se distribuye entre las fases acuosas y orgánicas de acuerdo a su solubilidad. La solución portadora del metal es denominada solución acuosa y corresponde al líquido obtenido luego del proceso de lixiviación (PLS). La solución extractante se determina según las características físicoquímicas del PLS y es llamada solución orgánica. La operación de extracción por solventes utilizada en el proceso hidrometalúrgico del cobre busca:

- ✓ Transferir selectivamente el cobre contenido en el PLS hacia el electrolito rico de electroobtención.
- ✓ Modificar y ajustar la concentración de cobre disuelto por una compatible con el proceso de Electroobtención.

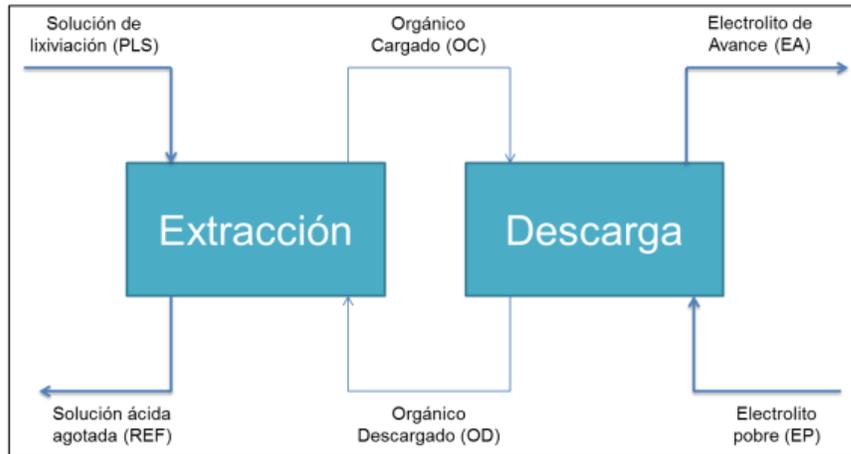


Figura2.6. Esquema de la extracción por solventes

C. ELECTROMETALURGIA.

Es un conjunto de tecnologías, junto con la electricidad y otros factores, por lo cual se obtiene reacciones físicas y/o químicas la cual se emplea para obtener y/o refinar materiales; siendo así parte del electro química. La electrometalurgia se define como la rama de la metalurgia que usa energía eléctrica para la producción y tratamiento de los metales. La energía eléctrica es convertida en calor con el fin de producir la energía necesaria para el proceso o servir para descomponer un compuesto por acción electrolítica en el que el calor generado es relativamente pequeño o por electrolisis, en que la cantidad d calor empleado es necesariamente grande. Cuando el calor utilizado es bajo o bien por electrólisis cuando es mayor. Se puede aplicar en soluciones acuosas o en sales fundidas. En el primer caso se utiliza sobre todo para cobre, zinc, níquel, cobalto, plomo, plata, oro y otros metales como cadmio, cromo, manganeso, galio, titanio o telurio. En el segundo, para aluminio, litio, magnesio, sodio y potasio, así como para tierras raras.

Según el tipo de depósito que se obtiene, hay distintos procesos electrometalúrgicos: la electro refinación, la galvanoplastia o electrodeposición y el electro conformado, electro obtención de metales. (CODELCO, s.f.)



Figura 2.7. Laboratorio de electrometalurgia

D. ELECTROREFINACIÓN

Es la disolución electroquímica de los ánodos impuros de cobre, para permitir que el metal se deposite en forma selectiva y con una máxima pureza sobre cátodos de cobre.

La electrorefinación tiene dos objetivos:

- ✓ Eliminar las impurezas que dañan las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre.
- ✓ Separar las impurezas valiosas del cobre. Estas pueden ser recuperadas después como subproductos metálicos.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO:

La electrorefinación se lleva a cabo mediante un sistema múltiple (paralelo) en el que ánodos y cátodos están intercalados en el interior de la celda electrolítica. Con este sistema, todos los cátodos están en otro potencial más abajo. Cada ánodo está colocado entre dos cátodos, de manera que se disuelven electroquímicamente a velocidad similar. Las celdas están conectadas en serie para formar secciones. Cada serie de 26 a 42 celdas, constituyen una parte independiente que puede ser aislada eléctrica y químicamente para

las operaciones de colocación y retiro de electrodos, limpieza de residuos y mantenimiento.

Las secciones están conectadas eléctricamente para que la tensión total sea del orden de 100 a 250 V dependiendo del equipo de rectificación. El resultado de esto en el cobre es que el 99,9% de cobre, totalmente puro y listo para su comercialización. (Universidad de Santiago de Chile, s.f.)

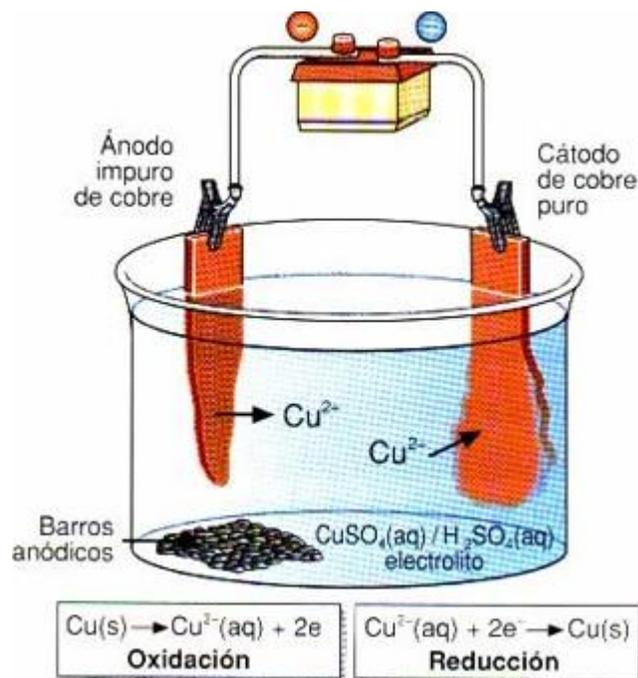


Figura 2.8. Electrorefinación del cobre

E. GALVANOPLASTÍA.

Es la aplicación tecnológica de la deposición de metales mediante electricidad, también llamada electrodeposición. El proceso se basa en el traslado de iones metálicos desde un ánodo a un cátodo, donde se depositan, en un medio líquido acuoso, compuesto principalmente por sales metálicas y ligeramente acidular (electrolito). Se terminan adheriendo al cátodo, creando consigo una capa de la solución, el cual el grosor dependerá del tiempo que transcurra en la solución. (Arkiplus, 2021)

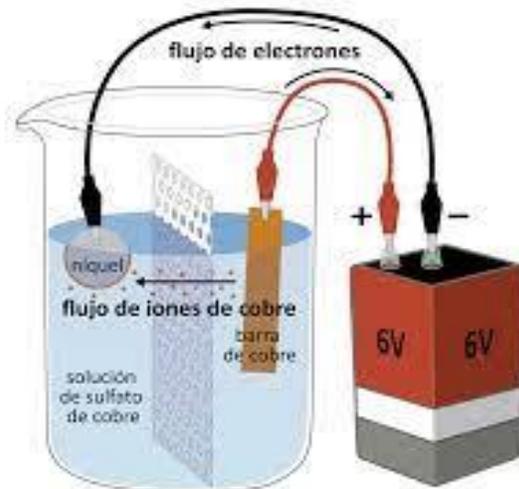


Figura 2.9. Galvanoplastia

F. ELECTROCONFORMADO

Es un proceso de conformado de metales en el que las piezas se fabrican mediante electrodeposición sobre un modelo, conocido en la industria como Mandri. Se aplica a la fábrica de moldes de precisión, y se empleó ampliamente en la producción de discos fonográficos. Es un proceso similar al galvanizado electrolítico, aunque en este último el propósito es formar un revestimiento protector que queda adherido al objeto procesado.

Las primeras aplicaciones de esta tecnología estaban relacionadas a la elaboración de réplicas de obras de arte, pero actualmente se la utiliza en la industria aeroespacial (cámara principal de combustión del transbordador espacial), para la fabricación de guías de onda de forma intrincada, en la producción de discos compactos y de video y para la elaboración de microcomponentes en la industria electrónica. (Arkiplus, 2021)



Figura 2.10. Piezas elaboradas por electroconformado de cobre

G. ELECTROOBTENCIÓN

Es un proceso de electrometalurgia, mediante el cual se recupera el cobre que se encuentra concentrado en la solución de cobre (que obtiene del proceso de lixiviación) con el propósito de producir cátodos de alta pureza de cobre (99,99%), muy cotizados en el mercado.

La electroobtención permite el beneficio de recursos lixiviables, en caso del oro y la plata cuyo tratamiento en otros medios sería imposible. (CODELCO, s.f.)



2.11. Electroobtención de cobre

2.9. PIROMETALURGIA.

Es la que se emplea más en los procesos para la obtención y refinación de metales utilizando calor, como en el caso de la fundición es la técnica más antigua para extraer los minerales. La pirometalurgia se emplea mucho porque es más rápida y puede procesar grandes cantidades de mineral. Pero también tiene sus desventajas ambientales ya es altamente contaminante porque al momento de la fundición emite SO_2 (anhídrido sulfuroso) y CO_2 (anhídrido carbónico).

Permite obtener metales a partir de sus menas, directamente o después de concentradas por medio de calor. Prácticamente todos los metales como el hierro, níquel, estaño y la mayor parte del cobre, oro y plata son obtenidos desde el mineral o su concentrado por métodos pirometalúrgicos, el rango de temperaturas que van desde los 800 a 1600°C. a estas temperaturas la velocidad de las reacciones químicas es alta, por lo que la cinética total del proceso es controlada por transferencia de masa (difusión y convección) en el lugar de la reacción. En las reacciones de lixiviación que se efectúan a temperaturas cercanas al ambiente (25-150°C). Para mantener la temperatura del proceso que se esté realizando requiere un aporte de energía. Esta energía la proporciona generalmente la reacción exotérmica de alguna variedad de carbón, o la energía eléctrica. Según sea el proceso, se añade un agente reductor que puede ser combustible. (CODELCO, s.f.)



2.12. Pirometalurgia

2.9.1 SECADO

Mediante el proceso de secado se elimina la humedad del material. En general, para secar los sólidos húmedos se les trata con los gases calientes resultantes de la combustión de combustibles fósiles. En el proceso de secado, la cantidad de calor requerido para evaporar el material sólido.

En este proceso el agua normalmente se evapora a poco más de 100°C . Si hay que eliminar también el agua de cristalización se debe aumentar la temperatura hasta 120°C .

Existe gran variedad de equipos de secado en la metalurgia.



Figura 2.13. Horno rotatorio para secado

Desde el punto de vista termodinámico el proceso más importante asociado al secado es la evaporación parcial o total del agua contenida en el sólido, producto del cambio de temperatura, que se puede representar. En esta etapa la humedad original del concentrado (entre 6% y 8%) se reduce a niveles que oscilan entre 0,2% y 0,3%.

2.9.2. CALCINADO O CALCINACIÓN.

Es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, (temperatura de descomposición), para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química. El proceso, que suele llevarse a cabo en largos hornos cilíndricos, tiene a menudo el efecto de volver frágiles las sustancias.

Objetivos de la calcinación suelen ser:

- ✓ Elimina el agua presente como la humedad absorbida, agua de cristalización o agua de constitución ártica (como la conversión del hidróxido férrico en óxido férrico)
- ✓ Eliminar el óxido de carbono (como en la calcinación de la piedra caliza en cal en un horno de cal), el dióxido de azufre u otros compuestos orgánicos volátiles.
- ✓ Para oxidar (calcinación oxidante) una parte o toda la sustancia (usando común mente para convertir menas sulfurosas a óxidos en el primer paso de recuperación de metales como el zinc, el plomo y el cobre).
- ✓ Para reducir (calcinación reductora) metales a partir de sus menas (fundición).
- ✓ Eliminar del mineral la materia estéril de naturaleza gaseosa, facilitando así la posterior reducción.

Hay pocas finalidades más para que se emplea la calcinación en casos especiales (por ejemplo, el carbón animal). Puede llegar a una temperatura máxima a 1200°C, su numeración para aumentar su temperatura depende de 10-10.

Las reacciones de calcinación pueden incluir disociación térmica, incluyendo la destilación destructiva de los compuestos orgánicos (es decir, calentar un mineral rico en carbono en ausencia de aire u oxígeno, para producir sólidos, líquidos y gases) (Mendez, 2010)



2.14. Horno de cal

2.9.3. TOSTACIÓN

Es una operación preparatoria de los minerales de tipo pirometalúrgico. En su forma oxidante se utiliza para transformar los sulfuros metálicos en óxidos y/o sulfatos, por reacción con el oxígeno a temperatura entre 500 y 900°C, facilitando la extracción por ambos métodos.

En el proceso de tostado la temperatura provoca reacciones químicas gas-sólido. La aplicación típica de este proceso de tostación consiste en la oxidación de minerales de sulfuros metálicos. Estos sulfuros se calientan en presencia de aire a una temperatura que permite que el oxígeno (O_2) del aire reaccione con los sulfuros y generen dióxido de azufre (anhídrido sulfuroso) SO_2 gaseoso, y óxido de metal sólido. A menudo al producto sólido del tostado se le denomina <<calcinado >>. (Mendez, 2010)

2.9.4. REFINO

El refino o refinación consiste en eliminación de impurezas remanentes en el material, mediante un tratamiento térmico. Después de la extracción de las materias primas, los metales brutos son entre 96 y 99% de impureza del principal metal. Los metales en bruto no pueden ser utilizados por la industria en esta etapa debido a la característica inferior en propiedades físicas, químicas y propiedades mecánicas. Esto comprende a una amplia gama

de procesos, que requieren diferentes tipos de horno o incluso otra factoría. El término (refinado) también puede referirse a ciertos procesos electrolíticos en frío. Por ello algunos tipos de refinación pirometalúrgica se conoce como (refinado al fuego) algunos de estos métodos son: (Mendez, 2010)



Figura 2.15. Refino a fuego

2.9.5. VOLATILIZACIÓN

Obtención del metal o un compuesto metálico que pasa directamente a gas. A veces se emplea un reactivo intermedio que genera un compuesto volátil del metal. Después de extraer el metal se reutiliza el compuesto (refino químico). A veces lo que interesa es el residuo.

LA pirometalurgia termina por la obtención de ánodos de cobre los cuales pueden llegar a convertirse en cátodos por el proceso antes descrito de electrorrefinación.

Ventajas de la pirometalurgia

- ✓ Requerimiento de energía.
- ✓ Agentes reductores de bajo costo.
- ✓ Alta capacidad específica.
- ✓ Separación simple de residuos y metal.
- ✓ Colección de metales preciosos.

Desventajas

- ✓ Descarte de gases de fundición.
- ✓ Gases fugitivos.
- ✓ Alta contaminación ambiental atmosférica

2.10. FLOTACIÓN

Es un proceso físico-químico de separación de minerales o compuestos finamente molidos, basados en las propiedades superficiales de los minerales (mojabilidad), que hace que un mineral o varios se queden en una fase o pasen a otra. Las propiedades superficiales pueden ser modificadas a voluntad con ayuda de reactivos.

El proceso de flotación se basa en las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de los minerales. Se trata fundamentalmente de un fenómeno de comportamiento de sólidos frente agua. Los principios básicos que se fundamenta el proceso de la flotación son los siguientes:

La hidrofobicidad del mineral que permite la adherencia de las partículas sólidas a las burbujas de aire.

La formación de la espuma estable sobre la superficie del agua que permite mantener las partículas sobre la superficie.

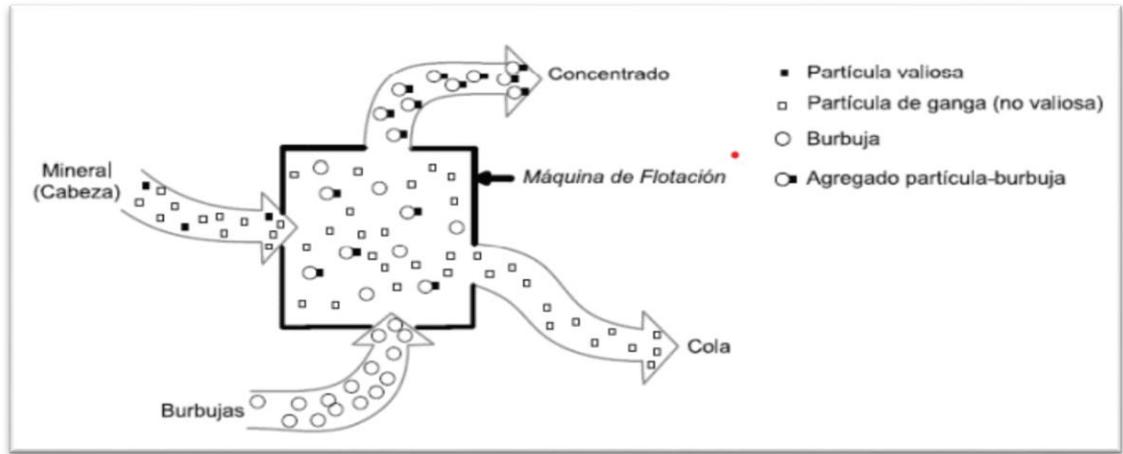


Figura 2.16. Flotación soluble de cobre

Para establecer sus principios se requiere la adición de reactivos químicos al sistema. Estos reactivos de flotación son los colectores, depresores activadores y modificadores cuyas acciones principales son inducir e inhibir hidrofobicidad de las partículas y darle estabilidad a la espuma formada.

Las partículas minerales hidrofóbicas tienen la capacidad de adherirse a la burbuja, en tanto que las hidrofílicas, como la ganga, no se adhieren. La superficie hidrofóbica presenta afinidad por la fase gaseosa y repele la fase líquida, mientras que la superficie hidrofílica tiene una afinidad por la fase líquida.

La flotación es un proceso muy utilizado en la recuperación de los minerales sulfurados de cobre debido a la hidrofobicidad natural que tienen. También se usan para la limpieza de aguas usadas con contenidos de gas o aceites para su reutilización. Existen equipos que realizan este proceso como las celdas de flotación y las columnas de flotación, estas últimas han ido reemplazando a las celdas por sus menores costos operacionales.

La primera flotación de Europa fue desarrollada por el ingeniero cántabro don Leopoldo Bárcena Días de la Guerra en la localidad cántabra de Torrelavega. (Codelco, 2019)

2.10.1. REACTIVOS Y COLECTORES DE FLOTACIÓN

La flotación por espuma es el proceso industrial más ampliamente usado para la separación de minerales finamente liberados. El proceso consiste en la aireación de los minerales en agua en presencia de reactivos de flotación que facilitan la fijación de las burbujas de aire a minerales seleccionados, así como la liberación de estos. Una vez en la superficie, una capa de espuma sostiene a los minerales seleccionados hasta que sean retirados. Los materiales no unidos permanecen sumergidos en la pulpa.

Las propiedades de la superficie de un mineral determinan su capacidad de flotación. Los colectores, algunos de los reactivos de flotación más importantes que se utilizan en el proceso de flotación, se utilizan para modificar las propiedades de la superficie de los minerales. Un colector es un producto químico que se une selectivamente a la superficie de los minerales objetivo e imparte hidrofobicidad a dichas partículas minerales, una condición necesaria para la fijación de las burbujas de aire. (CODELCO, s.f.)

A. COLECTOR.

Los colectores se pueden clasificar en tres categorías iónicos, aniónicos y catiónicos. Los colectores no iónicos son aceites de hidrocarburos simples. Los colectores aniónicos y catiónicos consisten en un componente polar, que se une selectivamente a las superficies minerales, y un componente no polar que se proyecta hacia afuera en la solución, lo que convierte en hidrófoba a su superficie. Los colectores pueden unirse químicamente a la superficie del mineral con alta selectividad (quimisorción) o mantenerse en la superficie por medio de fuerzas físicas (absorción física). Principalmente son sustancias orgánicas que están conformadas por un anión o catión, estas poseen una estructura integrada por una parte polar y una apolar. La parte polar del ion se adsorbe en la superficie del mineral mientras que el extremo apolar, constituido por una cadena de hidrocarburos, queda orientada hacia la fase acuosa, dando así el carácter hidrofóbico a las partículas minerales. De esta forma las partículas minerales son capaces de repeler el agua y adherirse selectivamente a las burbujas de gas.

Existen diversos tipos de colectores, clasificándose en ionizables y no ionizables como el aceite. Dentro de los colectores ionizables se encuentran los catiónicos y aniónicos, dentro de éstos últimos existen los colectores del grupo sulfhídrico y oxhidrilo.

En el grupo sulfhídrico o tiol se encuentran los xantatos, xantofosforatos, ditiofosforatos y tionacarbamatos, mientras que en el grupo oxhidrilo se encuentran los oleatos, sulfatos y sulfonatos.

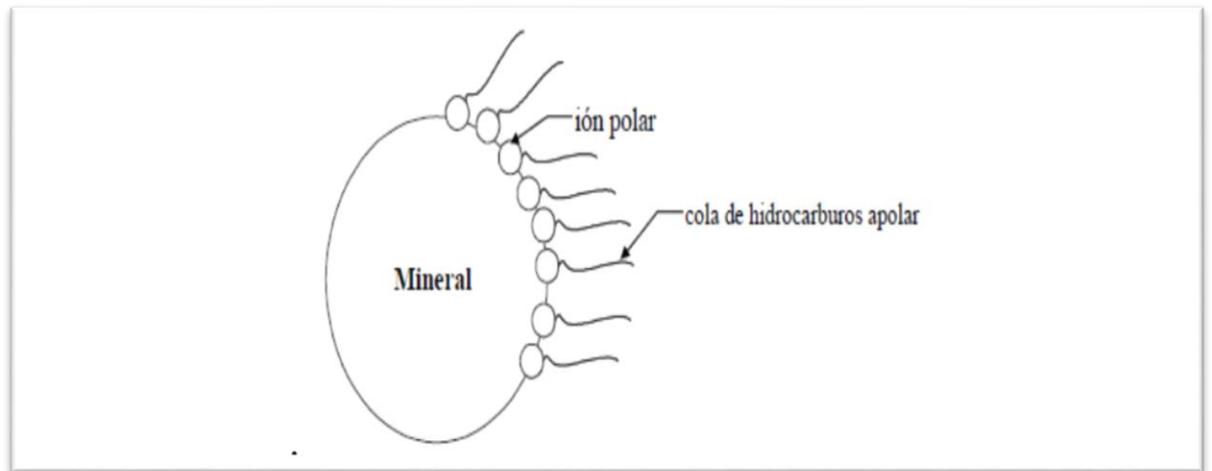


Figura 2.17 Colector

No todos los minerales tienen la misma composición química, por lo que esto hace que cada mineral que se desee flotar deba tener distintos procesos o distinta adición de reactivos para lograr su producción eficaz. En el proceso de flotación de minerales, estos minerales se pueden clasificar de la siguiente manera:

B. ESPUMANTES.

Los espumantes son agentes tenso-activos o surfactantes que consiste en una parte polar (hidrofilica) y una parte apolar (hidrofóbica). La parte apolar es una cadena hidrocarbonada y la parte polar es típicamente un grupo OH. En la superficie de la burbuja (interfase aire-agua), la cadena hidrocarbonada se orienta hacia el lado del aire y el grupo polar hacia el lado del agua. La estabilidad de la burbuja contra la coalescencia es incrementada por la fuerte interacción del grupo polar/dipolo del agua (hidratación) en la interfase (aire-liquido), que produce la capa de enlace.

Los espumantes son reactivos que, al igual que los colectores, están constituidos por una cabeza polar orientada hacia la fase líquida y una cola de hidrocarburos orientada hacia la fase gas. Estos reactivos permiten modificar las propiedades superficiales de las burbujas generadas al interior de las celdas de flotación, disminuyendo así el tamaño de ellas y de esta forma lograr el incremento del área de contacto de la burbuja con la partícula mineral. Además, mediante la utilización de espumantes, se logra la estabilización de la espuma y la reducción del tiempo de inducción o tiempo mínimo necesario para romper el film líquido existente entre la partícula-burbuja hasta que se produzca adhesión entre ambas fases.

Al igual que los colectores, también tienen diversos tipos de espumantes. Estos se agrupan en alcoholes-alifáticos, cíclicos y aromáticos y glicoles. Los alcoholes permiten un buen control del tamaño de la burbuja mientras que los glicoles generan una espuma más estable. (TECHNOLOGY)

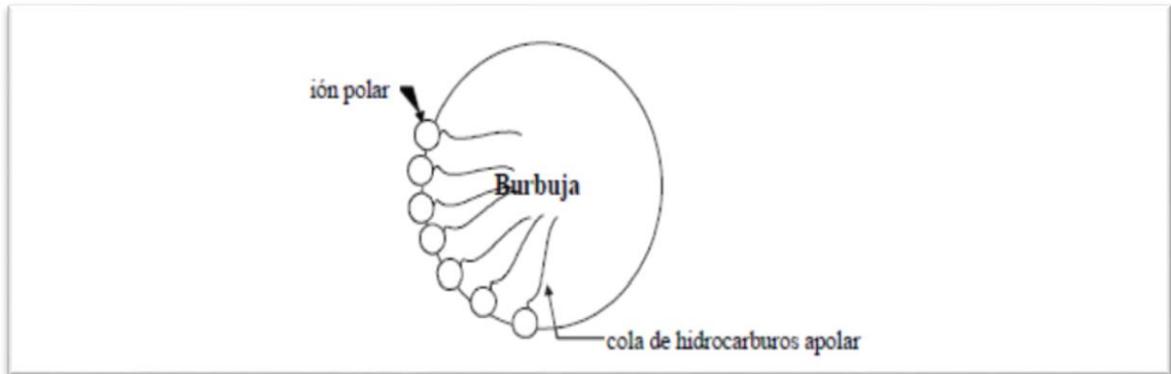


Figura 2.18 Espumante.

C. MODIFICADORES

Los modificadores tienen como función principal lograr el cambio de las condiciones fisicoquímicas del sistema para mejorar la eficiencia del proceso de flotación. Es así como dentro de los reactivos modificadores se encuentran los dispersantes tanto orgánicos e inorgánicos, los depresantes inorgánicos y orgánicos, reactivos reguladores del pH, como lo son la cal y el ácido sulfúrico, y los activadores, dentro de los cuales se encuentran los reactivos sulfidizantes, surfactantes catiónicos, cationes polivalentes, entre otros.

En esta categoría se incluyen:

- ✓ Activadores: aumentan la adsorción de los colectores sobre la superficie de los minerales para fortalecer el enlace entre la superficie y el colector.
- ✓ Depresantes: disminuyen la flotabilidad de un mineral haciendo su superficie más hidrofóbica o impidiendo la adsorción de colectores que pueden hidrofobizarla.
- ✓ Reguladores de pH: se agrega para operar en medio alcalino o ácido. En el primer caso se utiliza soda ash, cal o soda caustica, mientras que en el segundo caso se usa ácido sulfúrico.

2.10.2. PARTÍCULAS HIDROFÓBICAS.

En fisicoquímica, la hidrofobicidad es la propiedad física de una molécula que es aparentemente repelida de una masa de agua (conocida como hidrofóbica). Por el contrario, las hidrófilas son atraídas por el agua. Las moléculas hidrofóbicas tienden a ser no polares y, por tanto, prefieren otras moléculas neutras y disolventes no polares. Como las moléculas de agua son polares, los hidrófobos no se devuelven bien entre ellas. Las moléculas hidrofóbicas en el agua suelen agruparse, formando micelas. El agua sobre superficies hidrofóbicas mostrará un alto ángulo de contacto.



Figura 2.19. Partícula hidrofóbica

2.10.3. PARTÍCULAS HIDROFÍLICAS.

Son aquellos minerales que son mojables y/o solubles en el agua. Estos minerales son constituidos por: óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros, que generalmente representan la mayoría de los minerales estériles o ganga. Haciendo que se mojen y puedan permanecer en suspensión en la pulpa para finalmente hundirse. (Codelco, 2019)

Un hidrofílico o hidrófilo es un segmento molecular o un compuesto que se caracterizan por tener una fuerte afinidad por el agua y los solventes polares. Etimológicamente significa (amantes del agua), por lo que implica que un hidrófilo será capaz de disolver o interaccionar eficientemente con las moléculas del agua. Por lo tanto, las sustancias hidrofílicas tienen a ser solubles o miscibles con el agua. Sin embargo, la hidrofobicidad, es decir, su afinidad por el agua y otros solventes polares, no solo se vincula con la solubilidad en sí misma, sino también con el grado de mojabilidad que existe el agua y las superficies de estas sustancias o materiales.

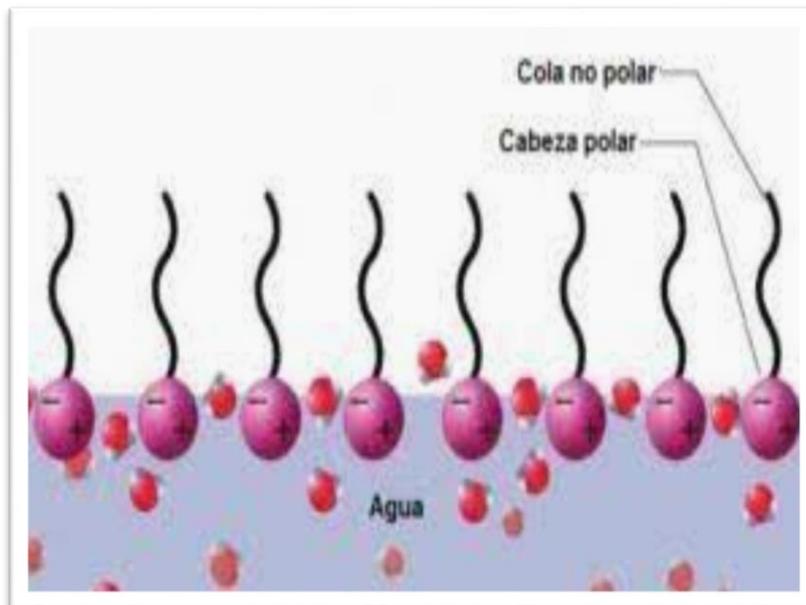


Figura 2.20 Partícula

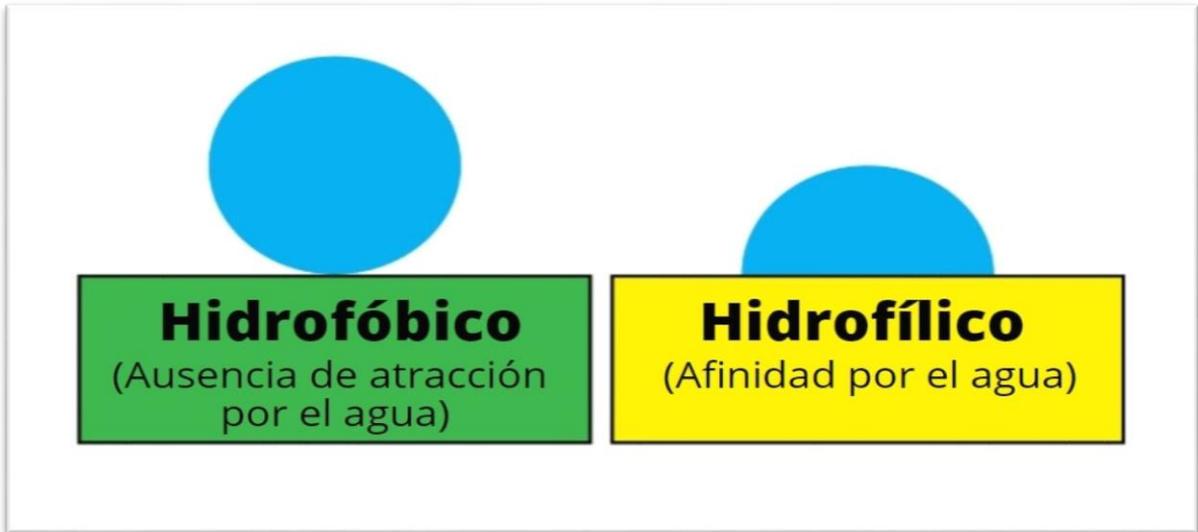


Figura 2.21 Comparación Hidrofóbico v/s Hidrofílico

2.10.4. PROCESO DE LA FLOTACIÓN EN LA MINERÍA.

La flotación es utilizada en diversos procesos de extracción, como el oro, el cobre y otros minerales; es un método de concentración de minerales en húmedo en el cual se procura separar las partículas de mineral útiles de otros compuestos, en la que se aprovechan propiedades físico-químicas superficiales de las partículas para efectuar una separación de materiales desde sus pulpas acuosas por medio de burbujas de gas y a base de sus propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas. La flotación contempla la presencia de tres fases: sólida, líquida y gaseosa.

Una vez ingresada la pulpa al proceso, se inyecta el aire para poder formar las burbujas, que es la base sobre la cual se adhieren las partículas sólidas. Para lograr una buena concentración se requiere que los minerales objetivo que constituyen la mena tenga un tamaño óptimo para su separación lo cual se logra en las etapas previa de trituración y molienda. Para la mayoría de los minerales, un adecuado grado de liberación se alcanza moliendo a tamaños cercanos a los 100 micrones (0,1mm). Al aumentar el tamaño de la partícula, crecen las posibilidades de la mala adherencia a la burbuja; en tanto que partículas, demasiado finas no tienen el suficiente impulso para producir un encuentro efectivo partícula-burbuja. (Universidad de Santiago de Chile, s.f.)

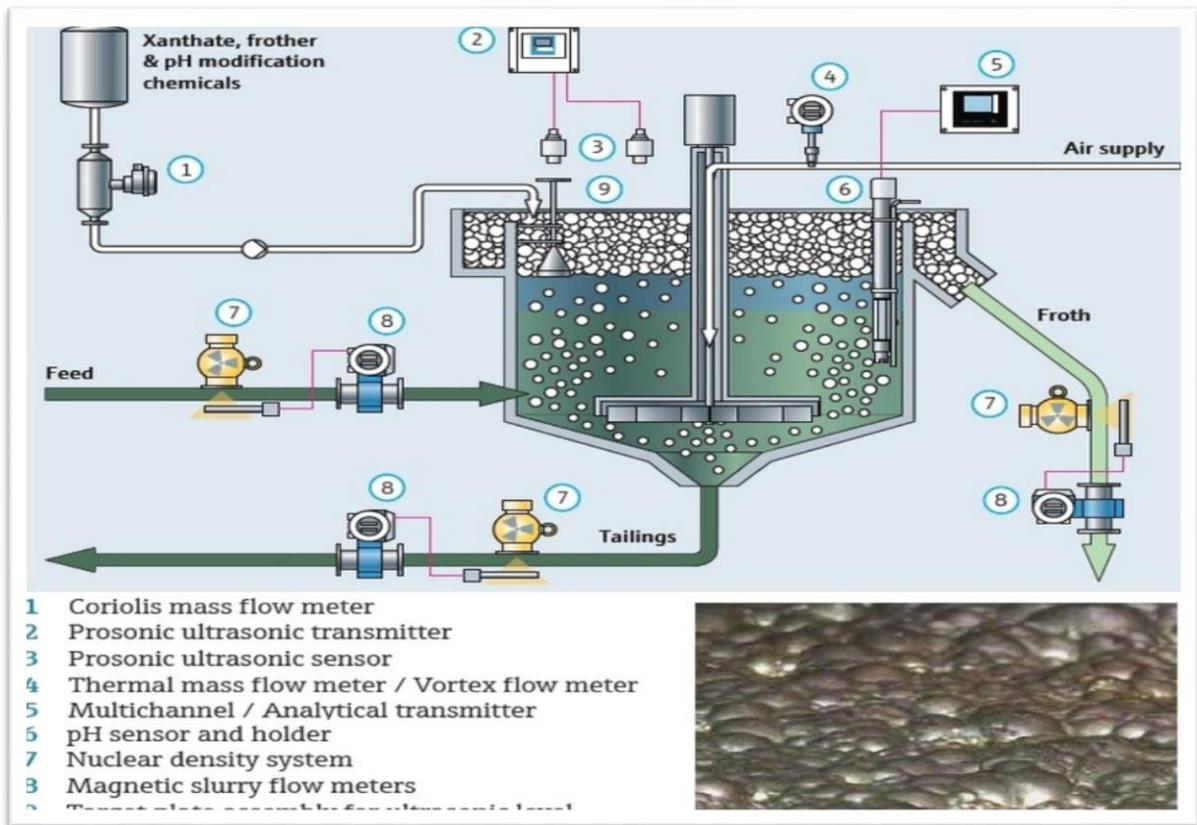


Figura 2.22. Parámetros de la Flotación

2.10.5 LOS PARÁMETROS DE CONTROL DE LA CELDA DE FLOTACIÓN

- ✓ Medición de nivel de espuma.
- ✓ Flujo de aire para agitación
- ✓ Medición de pH
- ✓ Dosificación de reactivos químicos
- ✓ Medición de flujo de alimentación pulpas y colas con transmisiones de flujo
- ✓ magnético y transmisores de densidad para obtener flujo másico.
- ✓ Velocidad, tamaño y consistencia de la burbuja.
- ✓

A. NIVELES DE PULPA:

La medición de la suspensión a la interfase de la burbuja es importante para controlar la eficiencia del proceso, el sensor mide la distancia a la superficie de la burbuja y el segundo, la distancia de a la placa de destino. La eficiencia de la espuma es determinada por una serie de probabilidades, como las del contacto y la conexión entre las partículas y las burbujas, el transporte de la pulpa y la espuma, y la recogida de la espuma en la batea. En una celda convencional de agitación mecánica, el volumen ocupado por las burbujas de aire es bajo (5 al 10%), y el tamaño de las burbujas suele ser superior a 1 mm. (Universidad nacional de Colombia)

B. ETAPAS DE LA PRODUCCIÓN DE BURBUJAS:

Existen tres etapas por las que se pasa un mineral para maximizar recuperación del producto.

- ✓ **Desbaste:** en esta etapa se produce un concentrado de desbaste. El objetivo es extraer la máxima cantidad de mineral valioso con el tamaño de partícula más grueso posible.

- ✓ **Limpieza:** el concentrado de desbaste pasa por otras etapas de flotación para rechazar una mayor cantidad de los minerales no deseados que terminaron en la espuma. El producto de limpieza se conoce como el concentrado más pobre.

- ✓ **Depuración:** la etapa de flotación de desbaste suele ir seguida de una etapa de flotación de barrido que se aplica a los relaves de desbaste. El objetivo es recuperar algunos de los minerales objetivo que no se recuperaron durante la etapa inicial.

C. FLUJO DE AIRE PARA LA AGITACIÓN:

La cantidad de flujo de aire afecta directamente el rendimiento de la flotación y, por lo tanto, tiene un impacto importante en la recuperación metalúrgica y en la ley del concentrado. Además, la interacción burbuja/partícula, el aire también ayuda a controlar la velocidad a la que se elimina el concentrado de la celda. El aumento de la alimentación de aire produce más burbujas, lo que conduce a una mayor probabilidad de interacción burbuja partícula, lo que a su vez conduce a una mayor recuperación general. Sin embargo, demasiado aire puede reducir la cantidad de concentrado y también provocar que se extraiga más agua de la celda en la capa de espuma debido al aumento más rápido de las burbujas.

D. MEDICIÓN DE pH:

El control del pH puede afectar el resultado de la flotación de forma notable, la mayoría de los procesos de recuperación de minerales requieren algún tipo de ajuste de pH para impartir las condiciones de separación ideales. A medida que la cantidad de suministro de mineral continúa disminuyendo, se necesitan modificadores de pH más eficientes y sofisticados para lograr un resultado óptimo de flotación.

Los parámetros o variables involucran una serie de condiciones operacionales, estas pueden ser modificables con la finalidad de mejorar el proceso y obtener una mayor recuperación del mineral valioso que se desee obtener.

Los parámetros que pueden ser modificados son:

- ✓ **Granulometría del mineral:** Las partículas deben tener una distribución de tamaño tal que se promueva la flotación. La recuperación disminuye con tamaños muy finos y gruesos, debido a que es difícil lograr un agregado partícula-burbuja estable en ambos casos.
- ✓ **Densidad de la pulpa:** En el proceso de flotación viene determinada desde la molienda y clasificación, afectando el tiempo de residencia del mineral en las distintas etapas del circuito de flotación y su capacidad.
- ✓ **Aireación de la pulpa:** Esta es una variable controlada generalmente por la persona a cargo de la adición del suministro de burbujas, la cual permite la aceleración o retraso de la flotación en beneficio de la recuperación metalúrgica o de la ley del elemento útil.
- ✓ **pH:** Es la variable de control más utilizada en el proceso de flotación, ya que resulta fundamental en la recuperación y selectividad. En la flotación de cobre el regulador de pH más utilizado es la Cal.

- ✓ **Tiempo de residencia:** El tiempo de duración del proceso de flotación varía de acuerdo con las características que posee el material alimentado al proceso y a las variables que inciden también en éste, ya sea el tamaño de la celda de flotación, los reactivos agregados entre otros.

- ✓ **Tipo y dosificación de reactivos:** los reactivos utilizados en el proceso pueden clasificarse en tres grandes tipos los cuales son colectores, espumantes y modificadores, cumpliendo distintas funciones en el proceso mejorando su eficiencia. Sin embargo, estos reactivos deben ser adicionados en una dosis adecuada ya que un exceso o déficit de éstos pueden alterar la concentración de minerales por flotación. (Codelco, 2019)

2.10.6. FASES DE LA FLOTACIÓN.

Fase sólida.

Corresponde a las materias provenientes de la molienda que se quiere separar. La fase sólida está constituida principalmente por las partículas de mineral. Las propiedades superficiales de estas partículas dependen de su estructura y composición.

Fase líquida.

Está constituida por agua con reactivos. La dureza del agua, la contaminación natural causada por sales de calcio, magnesio y sodio pueden cambiar completamente el resultado de la flotación en algunos casos, ya sea por un consumo excesivo de reactivos o la creación de sales insolubles.

Fase gaseosa.

El aire que es inyectada a la pulpa, para así poder formar las burbujas que son el centro por el cual se adhieren las partículas sólidas que sean de interés económicamente. La función del aire en el proceso de flotación tiene aspectos principales, los cuales son:

El aire influye químicamente en el proceso de flotación. Es el medio de transporte de las partículas de mineral hasta la superficie de la pulpa.

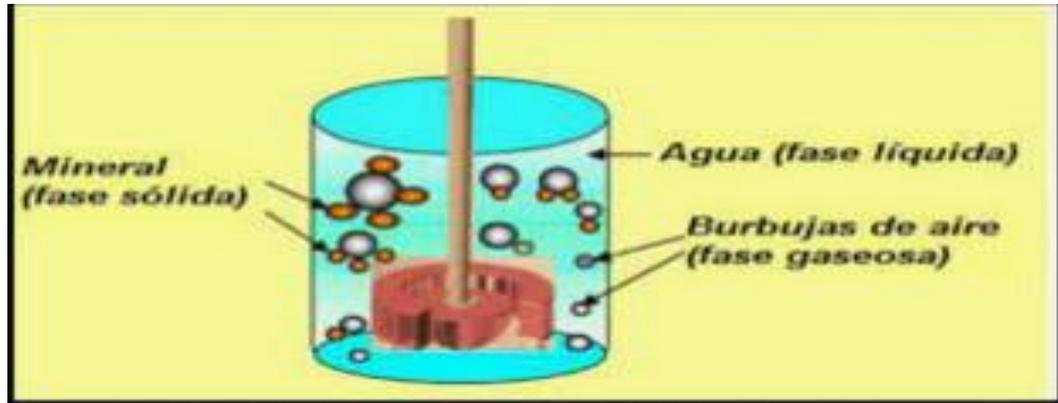


Figura 2.23. Fases de la Flotación

2.10.7. EQUIPOS DE FLOTACIÓN.

La flotación es una operación donde interactúan muchas variables complicadas, como factores básicos, el conocimiento de la estructura de mineral, reactivos químicos, pH de solución, densidad de la pulpa, temperatura, habilidades técnicas del operador, y la confiabilidad de la máquina de flotación.

La metalurgia tiene como objetivo práctico, el procesamiento de minerales y asegurar la máxima ganancia en la operación. Incorpora los elementos de máxima recuperación posible, alto grado de concentrados, bajos costos operativos y de mantenimiento.

Para manejar la variación de condiciones operativas y los requerimientos, se han desarrollado diferentes tipos de celdas de flotación. (Codelco, 2019)

Existen tres tipos de celdas de flotación:

- ✓ **Mecánicas:** son las más comunes, características por un impulsor mecánico que agita la pulpa y la dispersa.
- ✓ **Neumáticas:** carecen de impulsor y utilizan aire comprimido para agitar y airear la pulpa.
- ✓ **Columnas:** tiene un flujo en contracorriente de las burbujas de aire con la pulpa, y de las burbujas minerales con el flujo de agua de lavado.

Función de las celdas de flotación:

- ✓ Mantener todas las partículas en suspensión dentro de las pulpas en forma efectiva, con el fin de prevenir la sedimentación.
- ✓ Producir una buena aireación, que permita la diseminación de burbujas de aire a través de la celda.
- ✓ Promover las colisiones y adhesiones de partícula-burbuja.
- ✓ Mantener quietud en la pulpa inminentemente bajo la columna de espuma.
- ✓ Proveer un eficiente transporte de la pulpa alimentada a la celda, del concentrado y del relave.
- ✓ Proveer un mecanismo de control de la altura de la pulpa y de la espuma, la aireación de la pulpa y del grado de agitación.
- ✓ Características que deben reunir las celdas de flotación:

- ✓ Facilidad para la alimentación de la pulpa en forma continua.
- ✓ Mantener la pulpa en estado de suspensión.
- ✓ No debe ocurrir la sedimentación de partículas
- ✓ Separación adecuada del concentrado y del relave.
- ✓ Eficiencia de una celda de flotación.
- ✓ La eficiencia de una celda de flotación se determina por los siguientes aspectos.
- ✓ Tonelaje que se puede tratar por una unidad de volumen.
- ✓ Calidad de los productos obtenidos y recuperados.
- ✓ Consumo de energía eléctrica, reactivos espumantes y otros reactivos, con el fin de obtener los resultados óptimos.
- ✓ Gastos operacionales y mantención por tonelada de mineral tratado

A. LA CELDA MECÁNICA.

La celda mecánica está constituida por depósitos en forma cubica, de distintas capacidades, con un mecanismo rotor-estador para dispersión del sólido y el aire. Las celdas se juntan en serie y forman un banco de flotación agrupándose de diferentes formas. Por ejemplo, un banco de doce celdas mecánicas podría tener las siguientes configuraciones, de acuerdo a como se agrupen las celdas: 3-3-3-3; 2-2-2-3-3, etc. en las celdas de flotación, se pueden distinguir tres zonas típicas.

- ✓ Una zona de alta turbulencia, a nivel del mecanismo de agitación.
- ✓ Una zona intermedia.
- ✓ Una zona superior.



Figura 2.24 Zonas de la Flotación

En la zona alta turbulencia o zona de agitación se producen los choques para la adhesión partícula burbuja. En esta zona debe existir las condiciones hidrodinámicas y fisicoquímicas que favorezcan este contacto.

En la zona intermedia se caracteriza por ser una zona de relativa calma, lo que favorece la migración de las burbujas hacia la parte superior de la celda. La zona superior corresponde a la fase espuma, está formada por burbujas separadas por finos canales de pulpa. La pulpa descarga por rebalse natural, o con la ayuda de paletas mecánicas. Cuando la turbulencia en la interfase pulpa/espuma es alta, se produce una contaminación debido al arrastre significativo de pulpa hacia la espuma. (CODELCO, s.f.)

Ventajas:

- ✓ Diseño de la celda con gran capacidad del flujo y alta velocidad de flotación.
- ✓ El aire de inflación se realiza por el soplante exterior con regulación.
- ✓ Poco cubrimiento de área con peso ligero por unidad.
- ✓ Se adopta el cilindro cónico permite el gran ciclo vertical hacia arriba fortaleciendo la agitación inferior de la celda y mejorar la suspensión del mineral, lo que es adecuado para las operaciones difíciles de separación con gran volumen de aire inflado.
- ✓ El impulsor se usa para la circulación de la pulpa y la dispersión del aire y el impulsor ubicada en la celda reduce la abrasión del agitador para mantener la estabilidad de la superficie de la pulpa.
- ✓ Es espacio muerto axila y radial entre el impulsor y la palanca es mayor que lo de la serie A facilitando la instalación y mantenimiento.

- ✓ El consumo de reactivos y la energía se reduce obviamente mientras el índice de flotación sube.
- ✓ Las partículas gruesas y de gran densidad suben hacia arriba por el flujo vertical pasando por el cilindro cónico evitando el sedimento y la delimitación. El aire de baja presión se dispersa en toda la celda. Las burbujas mineralizadas se suben verticalmente hasta la zona estable superior de la celda dejando las gangas.
- ✓ Se utiliza ampliamente en las operaciones de beneficio para los minerales metálicos y no metálicos.

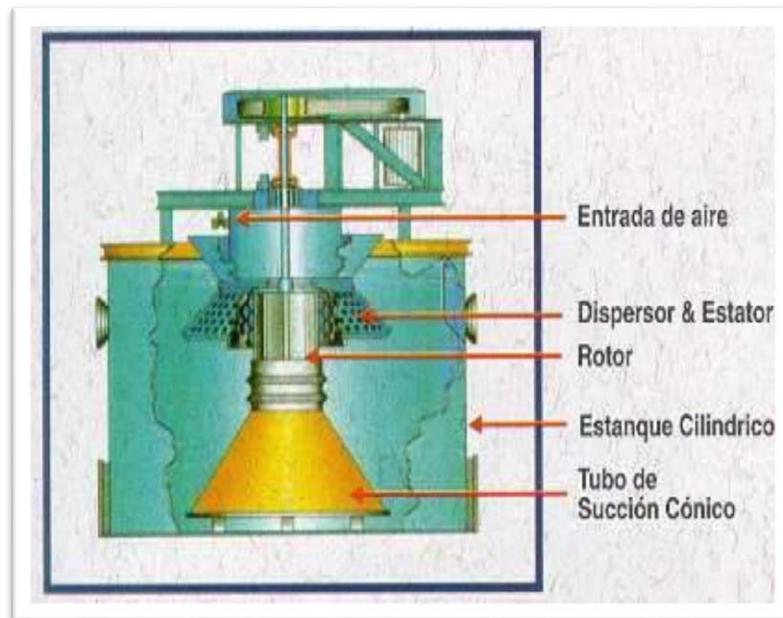


Figura 2.25. Celda Mecánica

B. CELDA NEUMÁTICA.

La celda de flotación neumática Ekoflot-v, que comenzó a venderse al mercado 1987, ha llegado a ser bien conocida ya que incorporó lo más avanzado del sistema de flotación neumática, con una reducción sustancial de costos y un aumento de recuperación en el concentrado.

El diseño de Ekoflot-v asegura que las partículas hidrofóbicas gruesas sean captadas por la espuma en la parte superior de la celda.

Hay un regulador cónico de espuma que puede moverse hacia arriba y hacia abajo, para ajustar la zona de espuma y hacerla variar de acuerdo con cada aplicación. Se este modo es posible utilizar un diseño estándar de celdas para diferentes aplicaciones, tales como desbastes, o selectividad.

El medio principal de regular la calidad de concentrado es un sistema de lavado con agua situado por encima de la espuma. (CODELCO, 2018)

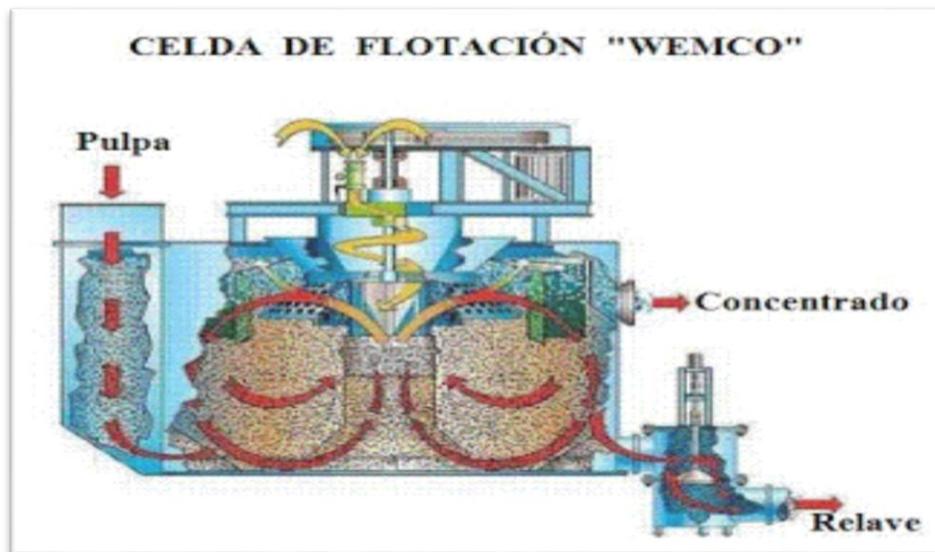


Figura 2.24. Celda de flotación Wemco

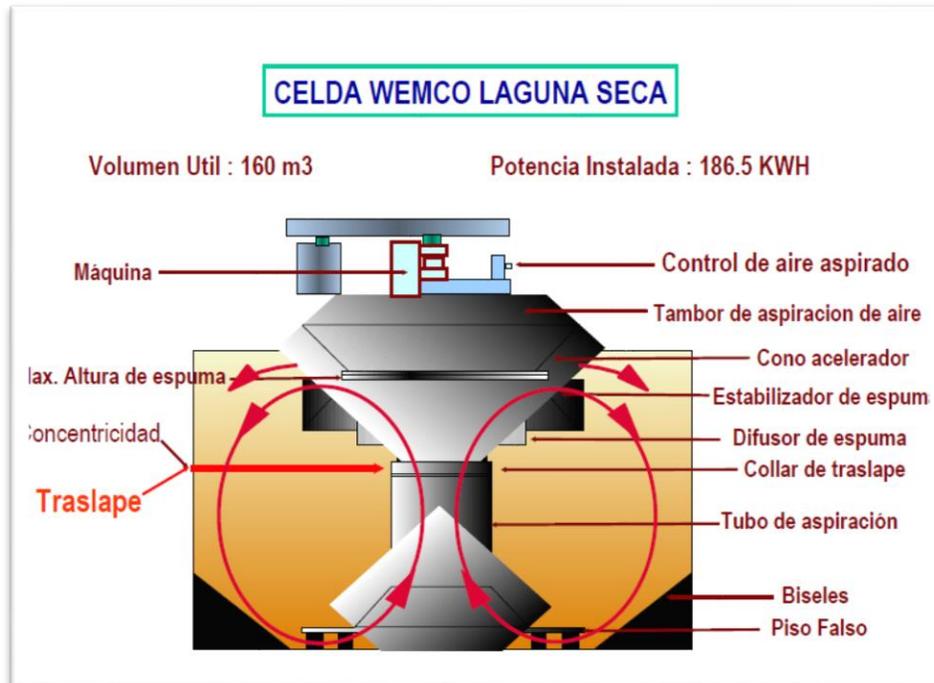


Figura 2.25. Celda Wemco Laguna Seca

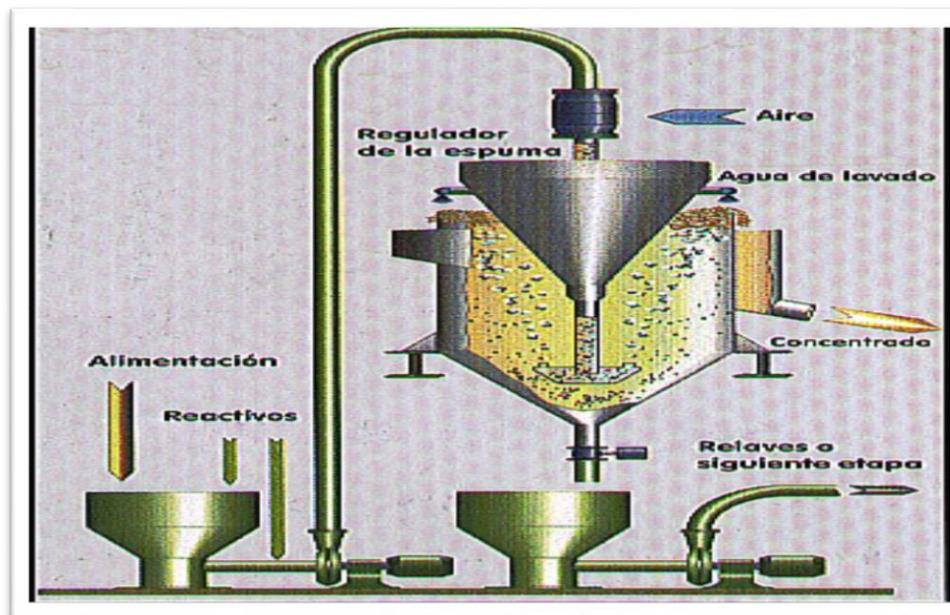


Figura 2.26. celda Mecánica

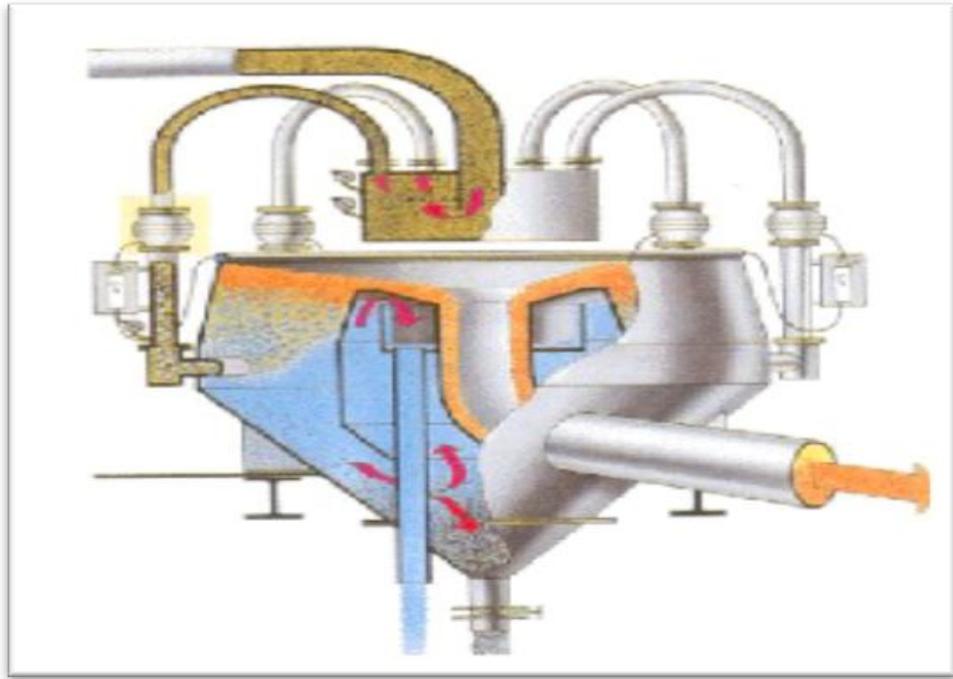


Figura 2.27 Celda Ekoflot

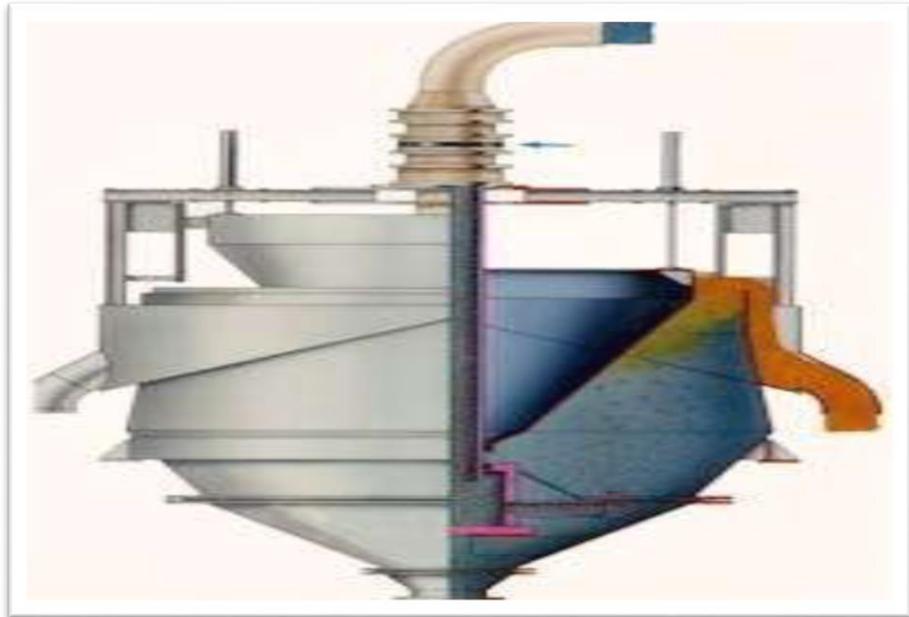


Figura 2.28 Celda Neumática de flujo tangencial

2.10.8. CELDAS COLUMNAS DE FLOTACIÓN

La tecnología de la flotación columna ha logrado una amplia aceptación en la industria de procesamiento de minerales por las ventajas que ofrece sobre los equipos de flotación convencional en las etapas de cleaner y recleaner.

Las ventajas de las columnas se pueden resumir en los siguientes puntos.

- ✓ Mejores leyes.
- ✓ Menor costo de operación.
- ✓ Menor costo de capital.
- ✓ Control superior.
- ✓ Ventajas de las columnas de flotación en relación a las celdas de flotación convencionales de agitación mecánica
- ✓ .
- ✓ Espacio ocupado en la planta es reducido: más capacidad flotación instalada por unidad de superficie de edificio.
- ✓ Bajo costo de capital: menos espacio, instalación eléctrica más sencilla.
- ✓ No lleva agitador.
- ✓ Mejor control del proceso

- ✓ Productos obtenidos son mejor calidad: leyes más elevadas de la especie útil para recuperación similares.

La capacidad de las columnas de producir concentrados de ley con recuperaciones similares deriva de la mejora que se consigue en la selectividad combinada con el lavado de espuma, que remueve la ganga arrastrada que generalmente está asociada con la pulpa de alimentación. En la limpieza de cobre, por ejemplo, se han reportado mejoras de ley de 2-4%.

La introducción del agua de lavado permite a la columna operar con un bias positivo, el cual asegura que cualquier partícula de ganga liberada será reportada preferentemente a la cola de la columna.

En la práctica operacional el bias se puede definir como la razón entre el flujo de colas y el flujo de alimentación de las columnas, en este caso en bias positivo corresponde a una razón mayor que 1.

La reducción en costos de operación con columnas puede atribuirse generalmente a la carencia de partes móviles. Toda la potencia de agitación mecánica se elimina, así como, la necesidad de mantención y reemplazo de agitadores y estatores.

El menor costo de capital del equipo se atribuye a su mejor eficiencia metalúrgica y al hecho de que la capacidad de flotación está en la dirección vertical. Esto generalmente se traduce en un arreglo más compacto para la planta.

Un ejemplo de la eficiencia superior de las columnas se aprecia en la flotación de molibdeno donde es normalmente posible reemplazar 12 etapas de limpieza convencional por 3 etapas de flotación columnar. (Maria Luisa Paino, 2021)

Las mejoras en control y estabilidad pueden atribuirse a la simplificación del circuito, por ejemplo, un número reducido de etapas, y la aplicación de hardware para el control

moderno de proceso a un mayor número de variables de control disponible, en particular para el lavado de espuma.

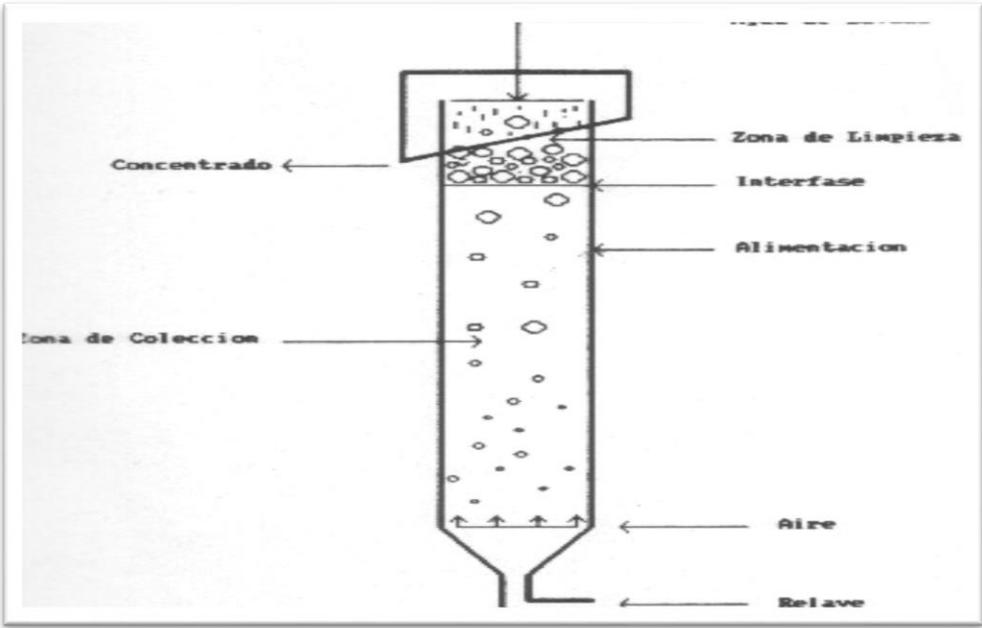


Figura 2.29. Circuito de columna de Flotación

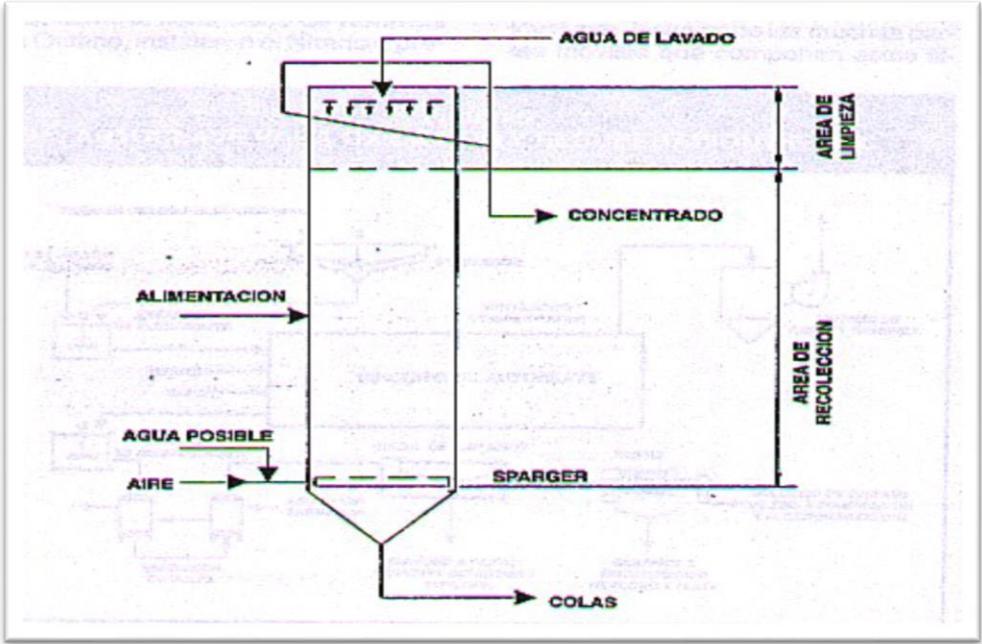


Figura 2.30. Circuito de columna de Flotación



Figura 2.31. Columna de Flotación

2.10.9. FLOTACIÓN BULK

Se define a la flotación simultanea de dos o más especies mineralógicas principales, los cuales son recuperados en un concentrado colectivo comúnmente llamado concentrado Bulk.

Esto sucede en el tratamiento de los minerales Polimetálicos de cobre-plomo-plata-oro y zinc donde inicialmente se flotan la Galena y la calcopirita en un concentrado Bulk (cobre-plomo) que contiene también los valores de oro y plata.

Generalmente es una flotación de una sola etapa, con desbaste y agotamiento, donde un mineral simple o un grupo de minerales valiosos son separados de la ganga.

El ejemplo más simple es la flotación de diversas especies de sulfuros de cobre de una mena que también contiene pirita e insoluble. (Bae)

LAS ETAPAS DE LA FLOTACIÓN.

Etapa Rougher: Esta etapa es la primera etapa que se encuentra en un circuito de flotación y su objetivo es realizar la primera concentración de la especie valiosa, privilegiando la recuperación sobre la selectividad. Dado que esta es la primera etapa en un circuito, es allí donde se obtiene la recuperación que más influye sobre la recuperación del circuito global. En esta etapa, debido a la gran cantidad de volumen de flujo que tratan, normalmente se usan equipos de un gran volumen.

Etapa Scavenger: La etapa Scavenger es una etapa recuperadora ya que busca capturar las partículas de mineral valioso que no han sido posibles de concentrar en las etapas finales del circuito. Debido a que solo tratan una parte del flujo, en este circuito normalmente se usan equipos más pequeños que los equipos de la etapa rougher, también a menudo los concentrados de esta etapa tienen que ser remolidos antes de pasar a la siguiente. (Codelco, 2019)



Figura 2.32. Circuito de las etapas de Flotación

Etapas Cleaner: La etapa Cleaner opera industrialmente a valores de pH más altos que las etapas anteriores, a diferencia de las etapas de rougher y Scavenger, el objetivo de este circuito es de concentrar la especie valiosa más que recuperador de la misma. Si no hay una etapa posterior de limpieza, en este circuito se obtiene el concentrado final de la flotación, en esta etapa se utilizan equipos alargados llamadas columnas.

Algunas de las ventajas de las columnas pueden ser:

- Mejores leyes.
- Menor costo de operación.
- Menor costo de capital.
- Mejor control del proceso.

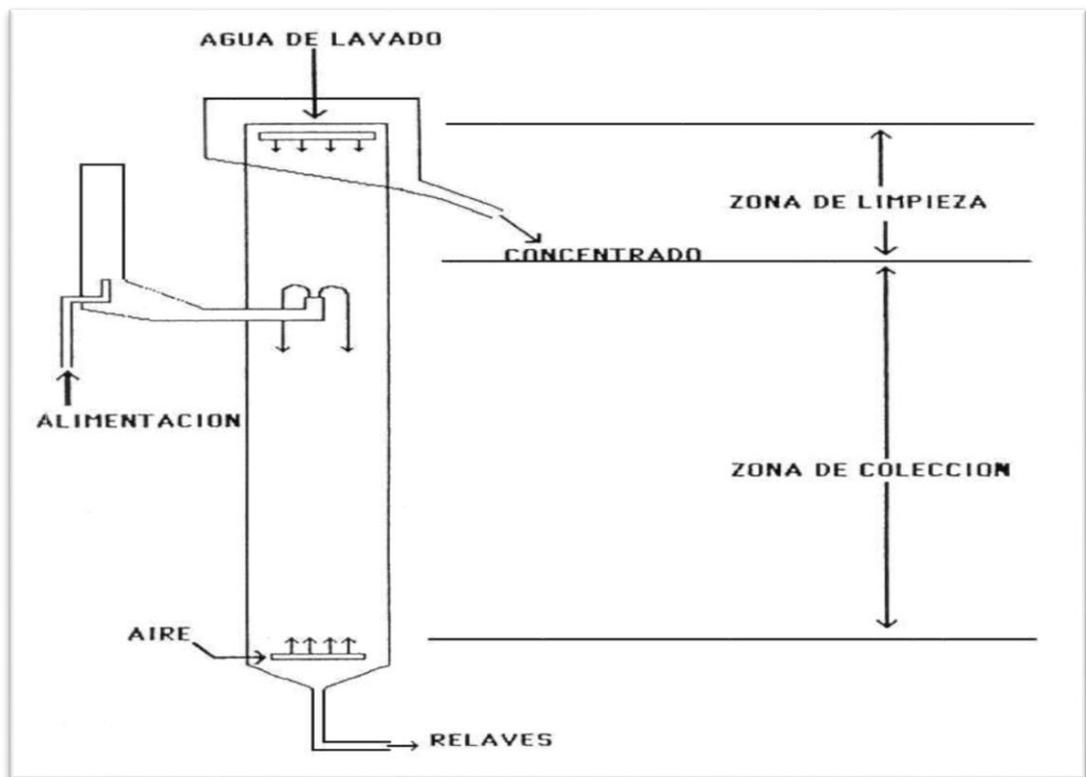


Figura 2.33. Circuito de celda Scavenger

Etapa Re-Cleaner: Como la etapa anterior, esta lo que busca es realizar una concentración de la especie valiosa, por lo que es necesario contar con re-limpieza cuando la etapa anterior no es capaz de concentrar por sí misma la especie de valor ya sea por capacidad o espacio. Si existe, en esta etapa se logra obtener el concentrado final del circuito. Al igual que en la etapa de limpieza, normalmente los equipos que se utilizan son celdas columnares.

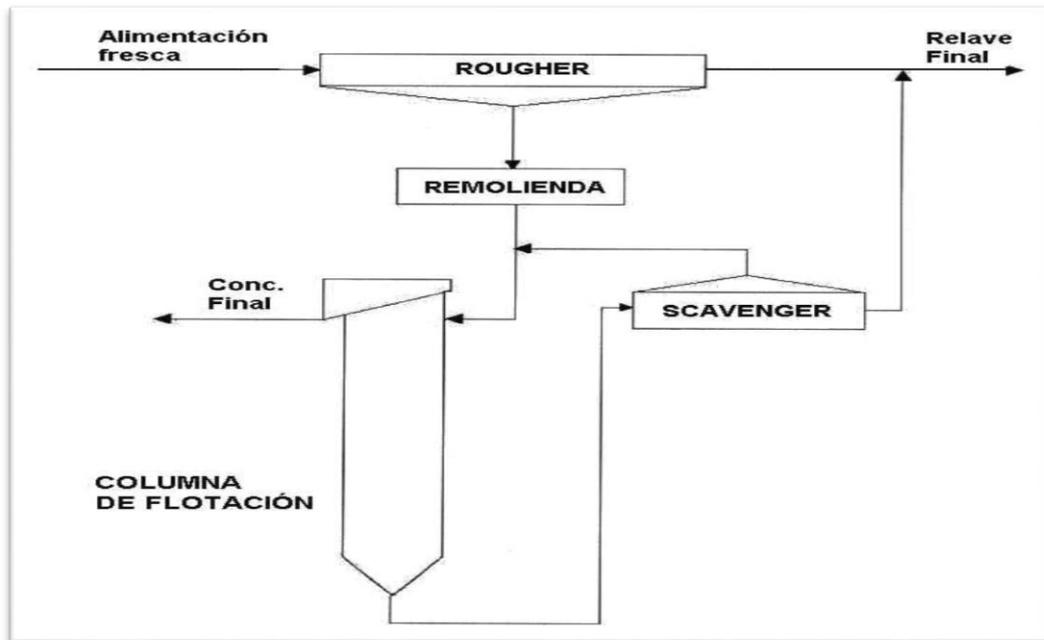


Figura 2.34. Circuito con columna de Flotación etapa Cleaner

Los productos de la flotación contienen habitualmente entre un 50% y 70% de sólidos. Gran parte del agua contenida en las pulpas producidas por la flotación es retirada en los espesadores de concentrado y cola, los que realizan simultáneamente los procesos de sedimentación y clarificación. El producto obtenido en la descarga de los espesadores de concentrado puede contener entre 50% y 65% de sólidos. El agua remanente en estos concentrados espesados es posteriormente retirada y secada mediante filtros hasta obtener un valor final que va desde un 8% hasta un 10% de humedad en el producto final. Este último es la alimentación para la siguiente etapa, la cual sería la fundición del producto a comercializar

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.

En este capítulo se detallará paso a paso el desarrollo logístico para el rediseño de la celda Denver, y la realización de pruebas para su reacondicionamiento.

3.1 REDISEÑO

Para cumplir con el primer objetivo del proyecto se debe definir el material idóneo para su rediseño, realizando una vasta investigación sobre sus elementos, agitación y sistema de aireación.

Para cumplir con el rediseño de la celda Denver, se investigan modelos similares a través de internet, análisis de videos de su funcionamiento, identificando empresas que comercialicen este tipo de equipo, identificando diversos materiales con los cuales fueron confeccionados.

Durante el proceso de investigación se encontró un modelo Denver D-12 perteneciente a la empresa Metso, donde se observa que esta celda posee un mecanismo de flotación de tipo suspendido, que le permite subir y bajar. Se observa además un tubo vertical de acero inoxidable con válvula de control de aire.

Descripción

- ✓ Mecanismos suspendidos.
- ✓ Motor de ½ HP.
- ✓ Tanque de acero inoxidable de 200 gramos.
- ✓ Agitador / kit de desbaste por burbujeo.



Figura 3.1 tanque de acero inoxidable

D-12 Lab Flotation Machine Tank Volumes, Capacities

-	TANK VOLUME (CC'S)			
	Volume Less Mechanism (cc)	Full (cc)	1 Inch below lip (cc)	2 Inch below lip (cc)
Tank Size (Grams) **				
250	1710	1235	970	810
500	3230	2550	2000	1830
1000	5780	4980	4300	3520
2000	10712	9327	8057	6927
** Dry solids SG 2.7, 20% solids by weight				

Figura 3.2. Tabla que muestra dimensiones de la celda Denver D12

Al investigar la celda Denver D-12 es que se decide realizar este proyecto de tesis en base a su diseño y características. A continuación, se detallará la lista de materiales que se utilizarán en este proyecto.

Para lograr el segundo objetivo que es la construcción del equipo se realizó un listado del material y equipos necesarios.

3.2. CONSTRUCCIÓN

ESTANQUE:

Para el estanque se dispondrá de una plancha de acero inoxidable de 5mm de espesor, que permitirá la confección de dos unidades con las mismas medidas de la que ya existe en el laboratorio.

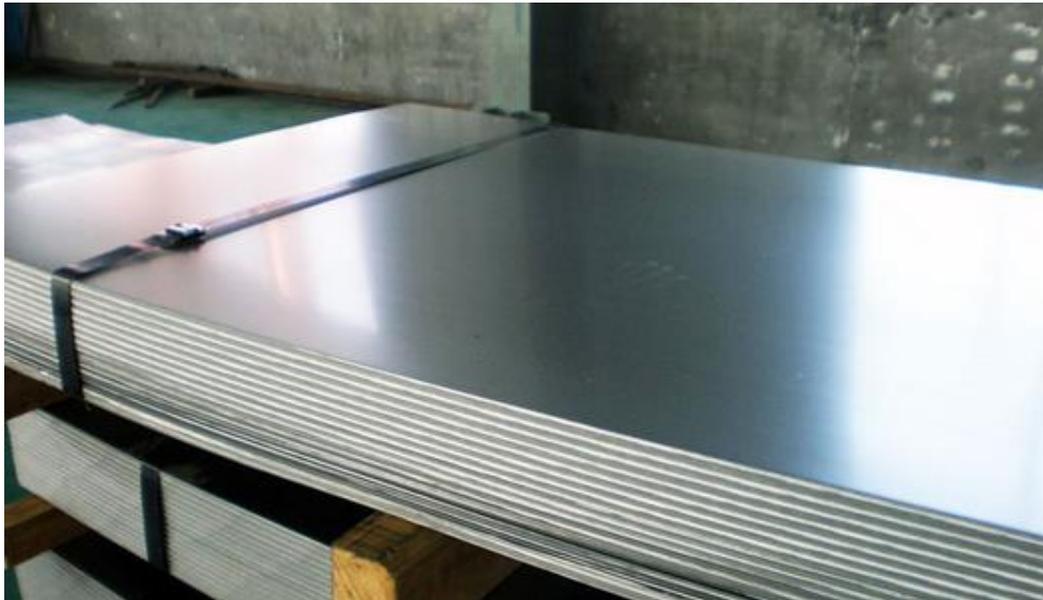


Figura 3.3. Planchas de acero inoxidable de 5 mm de espesor

AGITADOR:

Se determinó mantener un sistema similar al que ya estaba, se usará un taladro BOSCH modelo GSH 450, donde se regula la revoluciones en forma manual con una abrazadera metálica tipo tornillo puesta en el gatillo, realizar pruebas con agua para regular las revoluciones adecuadas.



Figura3.4. Taladro de Proyecto

SISTEMA DE AIREACIÓN:

Dispondrá de un compresor marca Resun de gran capacidad, que posee un caudal de 38 litros/por minutos de aire, que es utilizado para el sistema de aireación de acuarios. Se realizarán diversas pruebas con agua, para determinar la cantidad de aire que pasará, y de acuerdo a los resultados de estas se diseñará un sistema que permita regular la intensidad y el flujo de aire adecuado para la realización de las pruebas de flotación



Figura3.5. Compresor sistema de aireación

La celda tipo Denver a escala de laboratorio diseñada el año 2020, utiliza un estanque de material acrílico de 3mm de espesor, las uniones están fijadas con silicona y masilla, este tipo sellante no era el adecuado y el estanque perdía líquido por las uniones.

El nuevo estanque se hizo con las mismas dimensiones del anterior, pero con material de acero inoxidable de 5mm, en sus uniones se utilizó soldadura inoxidable y esto garantiza una unión más resistente y con escasa probabilidad de filtraciones.

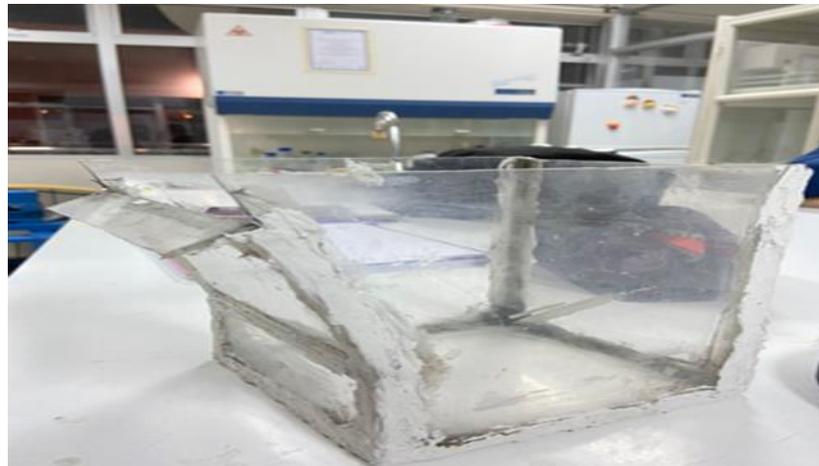


Figura 3.6..Estanque año 2020



Figura 3.7. Fabricación de Estanque

AGITADOR:

Se decide rediseñar el agitador con aspas de mayor similitud a las original, por lo que en la investigación se identifica un modelo de un agitador de concentrado de alta calidad que permite el referente para la confección, esta se realiza con una varilla de 6 mm y las aspas con plancha de acero inoxidable, que permita una eficaz agitación homogénea al interior del estanque.



Figura3.8. de aspa de agitador año2020



Figura 3.9.aspa de agitador año 2022

Motor de agitador:

Para el motor del agitador se utilizó un taladro percutor de velocidad variable, donde su potencia y revoluciones por minuto era demasiado elevada para nuestro objetivo, por lo que se tomó la decisión de cambiar por uno con menos capacidad y sin la opción de percutor por el volumen de la celda. En conjunto se confecciona un pedestal para la posición del taladro con una cubierta tapando es su totalidad el taladro para una mayor seguridad.



Figura 3.10. Motor de agitador con pedestal año 2020



Figura 3.11. Motor de agitador año 2022

SISTEMA DE AIREACIÓN

El sistema de aireación utilizado no era el adecuado, ya que presenta baja potencia. Debido a esto, se debe introducir unas mangueras de 6 mm al estanque, las cuales no tenían la rigidez suficiente, por lo tanto, no mantenían su posición y se desplazaba constantemente con el movimiento que provocaba el agitador. En consecuencia, se decide que esta acción se debe realizar de manera manual, sosteniéndolo un estudiante de manera fija para inyectar el aire de manera constante.

Luego de una extensa búsqueda para la solución de este problema, se instala un sistema de aireación fijo, donde no fuese necesario mantener a una persona inyectando aire. Este consiste en una línea para aire de 3/8" de acero inoxidable con una válvula reguladora para su control.



Figura 3.12. Sistema de aireación



Figura 3.13. Línea de aire año 2022



Figura3.15. sistema de aireación año 2022

MATERIALES

- ✓ Lámina de acero inoxidable
- ✓ Taladro
- ✓ Compresor
- ✓ Soldadura inoxidable
- ✓ Discos de corte de 4 ½"
- ✓ Discos de lija
- ✓ Insumos
- ✓ Abrazadera metálica de 2"
- ✓ Manguera de 10 mm
- ✓ Conectores de 3/8"
- ✓ Línea de acero inoxidable de 3/8"

Lamina de acero inoxidable	valor \$ 67.000
Taladro	valor \$ 65.000
compresor	valor \$ 53.000
Soldadura inoxidable	valor \$ 22.000
Discos de corte de 4 ½”.	valor \$ 2.500 c/u
Discos de lija	valor \$ 11.000 c/u
Insumos varios	valor \$ 43.000
Abrazadera metálica de 2”.	valor \$ 8.000
2 conector de 3/8”.	valor \$ 12.000 c/u
50centímetros de manguera de 10mm	valor \$ 8.000
Línea de acero inoxidable de 3/8”	valor \$ 12.000

Figura 3.16. Tabla de presupuesto

Las primeras pruebas son realizadas con agua, donde se verifica el sistema de aireación incorporado, regulando el aire de tal manera que no genere rebalsé del estanque, y posteriormente se ejecuta la prueba con la agitación.



Figura3.17. Prueba con aire



Figura 3.18. Prueba con agitación

3.3. PRUEBAS ANALÍTICAS

3.3.1. Materiales y equipos para el proceso:

- ✓ Celda de flotación Denver
- ✓ Balanza analítica
- ✓ Espátulas
- ✓ Jeringas
- ✓ Bandejas de acero inoxidable o bandeja apta para el calor
- ✓ Toalla de papel absorbente
- ✓ Vasos precipitados de 50ml

- ✓ Balanza semianalítica
- ✓ Agua
- ✓ Malla #200 Tyler
- ✓ Brochas
- ✓ Phmetro
- ✓ Horno
- ✓ Pulverizador o mortero
- ✓ Muestra (calcopirita)
- ✓ Pizeta

3.3.2. Equipos de protección personal a utilizar antes de realizar la flotación son:

- ✓ Delantal
- ✓ Guantes de nitrilo
- ✓ Lentes
- ✓ Protector respiratorio
- ✓ Pantalón largo
- ✓ Calzado de seguridad

- ✓ Guante keblar

Reactivos a utilizar:

- ✓ Espumante (MIBC)
- ✓ Colector (isopropanol)
- ✓ Modificador de ph (óxido de calcio)
- ✓ Calcopirita

3.3.4.PRUEBAS EN CELDA DE FLOTACIÓN:

1. Antes de comenzar se debe realizar la granulometria del mineral a flotar: Calcopirita. En el caso de no pasar el 100% el mineral se debe conminuir, o pulverizar hasta obtener la granulometria deseada (100% menor de la malla -#200 tyler)
2. Revisar todos los parametros de la celda, sus componentes, de tal forma que cuente con las condiciones óptimas para la realización de la prueba, donde todo este en orden y apto para utilizar.
3. Obtener pesos para conocer las variantes de peso especifico, el porcentaje de sólido, y volumen de la celda.
4. Para obtener el volumen de la celda debemos pesar la celda en balanza analítica, tarar,y anotar el peso de ésta (peso celda 2.978kg.)

5. Se llena la celda con agua hasta el rebalse, llevando con precaución para no derramar parte del agua hasta llegar al equipo de flotación. Encender la agitación y aireación provocando un rebalse para poder calcular el volumen de la celda.

3.3.5. Datos recopilados:

Porcentaje de sólido= **32%**

Densidad= **3,1%**

Peso de mineral=**1,257 kg**

3.3.6. Fórmula para calcular peso del mineral:

$$\text{Peso del mineral} = \left(\frac{\% \text{sólido a flotar} * \text{volumen de la celda}}{(1 - \% \text{sólido a flotar}) + (\% \text{sólido a flotar} / \text{densidad del mineral})} \right)$$

6. Conociendo las variables anteriores, se deberá introducir el mineral con el peso obtenido (1257g) y el agua que se conoció el peso del mineral a flotar. El peso de la pulpa dependerá del peso del mineral y el porcentaje de sólido a flotar tiene un valor de 32%.

$$\text{Peso del Mineral} = \frac{(32 * 1257)}{((1 - 32) + (32/3.1))}$$

Peso de mineral= 3.553 gramos

El peso total de la pulpa terminará incluyendo el peso del mineral, el agua y la dosificación de los diferentes aditivos, como:

- ✓ Colector
- ✓ Espumante
- ✓ Depresores
- ✓ Activadores
- ✓ Modificador de Ph

Para calcular la dosificación de los reactivos para comenzar a flotar se deben realizar los siguientes calculos:

Peso real del Reactivo (g)=Dosis Reactivo en (g/ton)*Peso del Mineral a Flotar (ton)

Peso real del Reactivo (g)=0,05 g (g/ton)*1,257/1000 (ton)

Peso Espumante (g)=0.6285 gramos

Peso real del Reactivo (g)=0,03 g (g/ton)*1,257/1000 (ton)

Peso Colector (g)=0.0377 gramos

7. Encender balanza semianalítica, abrir la compuerta introducir el vaso precipitado de 50 mL, cerrar la compuerta y tarar.

Con la jeringa de 5 ml sacar la cantidad calculada del reactivo, vertiendo éste con mucho cuidado al vaso precipitado y con delicadeza, hasta conseguir el peso óptimo.



Figura 3.19 peso del Espumante

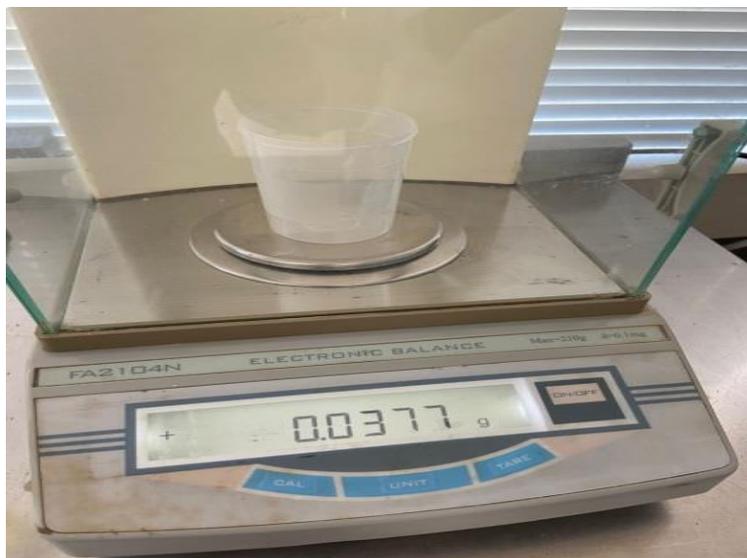


Figura 3.20 peso del Colector



Figura 3.21. peso del mineral

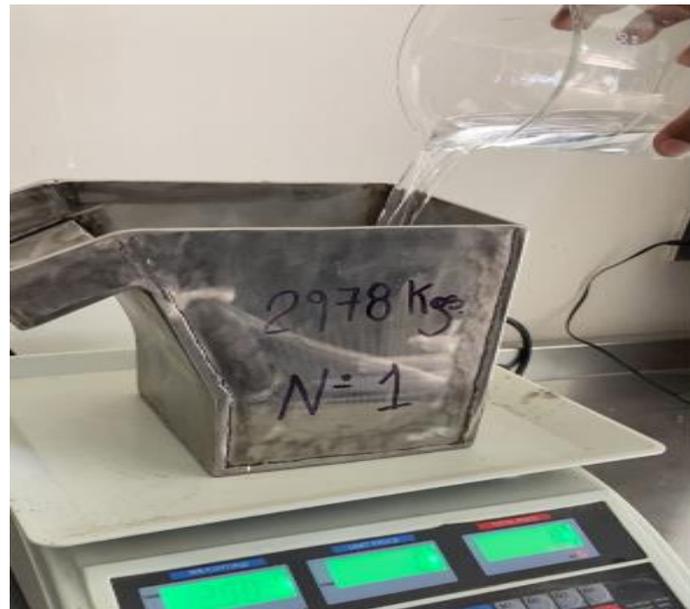


Figura 3.22. Agua agregada



Figura 3.23. Estanque con Rebalse

8. Pesar el mineral calcopirita en la celda de flotacion previamente tarada.
9. Con todo ya instalado en el equipo de la celda Denver, agregar la espumante y el colector, agregando el agua hasta el rebalse de la celda.
10. Encender todo el sistema de la celda de Flotacion Denver por 15 minutos.
11. Se debe agitar por unos minutos la pulpa y medir el pH, agregar el modificador (Calcio Óxido) con la espátula en pequeñas cantidades y medir constantemente con el pHmetro dentro de la muestra hasta obtener el ph

óptimo(12pH).Como referencia, aproximadamente 5 gramos ayuda a subir de un ph 7,8 a 9,5.



Figura 3.24. Modificador de PH



Figura 3.25. Indicador de pH

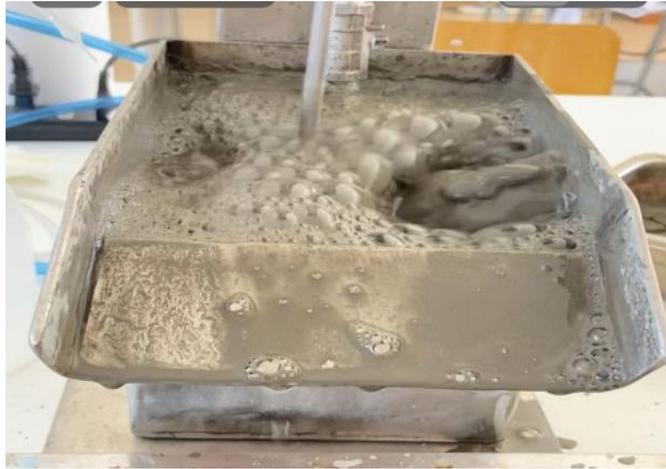


Figura 3.26 Flotación de Mineral

Al formar las burbujas de aire en la parte superior, se podrá ir paleando con la ayuda de una espátula, con un movimiento de arrastre a la caída de la celda hacia la bandeja de acero.



Figura 3.27. Recuperación de Mineral

Se debe ir llenando con una pizeta con más agua la celda, ya que, al hacer el barrido va disminuyendo el nivel.

Al pasar los 15 minutos se detiene el agitador y se apagara en la bomba de aireación.

- 12.** La pulpa concentrada que se obtuvo en la bandeja de acero se rotula y se deja en el horno de secado por alrededor de 24 horas a 200°C.



Figura 3.28. concentrado en el horno de secado

- 13.** Para el proceso de recuperación de la flotación se repite el proceso de agregar los reactivos y agua hasta el rebalse y se enciende nuevamente por 15 min. el proceso de flotación.
- 14.** Cuando la muestra en el horno ya esté completamente seca, se debe retirar con precaución del horno con guantes keblar (guante para la temperatura.)
- 15.** Al enfriarse se extrae y rompe con una espátula la muestra de la bandeja; la cual, se debe hacer más pequeña con la ayuda de una brocha y una malla #200 ty, volver a tamizar.

16. Pesar resultado de la muestra flotada en un vaso, tarar y agregar la muestra para pesar (balanza semianalítica), rotular el vaso colocando: el tipo de muestra, fecha de la realización de la flotación, hora y peso de la muestra. Esto se debe hacer con el resultado de la recuperación.



Figura 3.29. Muestra roturada y pesada

3.4. DETERMINACIÓN DE COBRE TOTAL DE CONCENTRADO POR VOLUMETRÍA.

Equipos y Materiales:

- ✓ Vaso Precipitado 250 ml.
- ✓ Pipeta de 10 ml.

- ✓ Vidrio de Reloj.
- ✓ Espátula.
- ✓ Pinzas.
- ✓ Balanza Analítica.
- ✓ Pizeta.
- ✓ Plancha Calefactora.
- ✓ Propipeta.

- ✓ Papel de Limpiar.
- ✓ Bureta.
- ✓ Campana Extractora de Gases.
- ✓ Agitador Magnético.
- ✓ Varilla de Agitación.
- ✓ Pececito.
- ✓ Elementos de Protección Personal.
- ✓ Lentes de Seguridad.
- ✓ Guantes.
- ✓ Mascarilla.
- ✓ Calzado de Seguridad.
- ✓ Pantalón largo.
- ✓ Cotona/Bata.
- ✓ Polera manga larga.

REACTIVOS:

Ácido Nítrico (d = 1.40 Kg/L, 65% p/p).

Ácido Clorhídrico (d = 1.18 Kg/L, 36% p/p).

Ácido Fluorhídrico (d = 1.13 Kg/L, 40% p/p).

Ácido Sulfúrico (d = 1.84 Kg/L, 96 – 98% p/p).

Ácido Acético p.a, (99% CH₃COOH).

Solución Permanganato de Potasio (KMnO₄ p.a, 2.5g/L).

Solución Sulfato Ferroso (FeSO₄ * 7 H₂O p.a, 5 g/L) (Adicionar 2 mL de H₂SO₄ por litro de solución).

Acetato de Amonio p.a, (NH₄CH₃CO₂).

Bifluoruro de Amonio p.a, (NH₄HF₂).

Yoduro de Potasio p.a, (KI).

Solución de Almidón Soluble p.a, (10 g/L) (Adicionar 2 mL de Ácido

Acético por litro de solución).

Solución de Tiocianato de Amonio (NH_4SCN) p.a, (20% p/v)

(Adicionar 5 mL de NH_4OH por litro de solución).

Solución de Tiosulfato de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

3.4.1 PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN DE COBRE

Preparar la solución de tiosulfato de sodio.

Dirigirnos a la balanza analítica con un vaso precipitado de 250 ml, anteriormente debe estar lavado con agua destilada y secado para no contaminar.

Tarar el vaso precipitado, y pesar exactamente 19.670 gamos de tiosulfato.

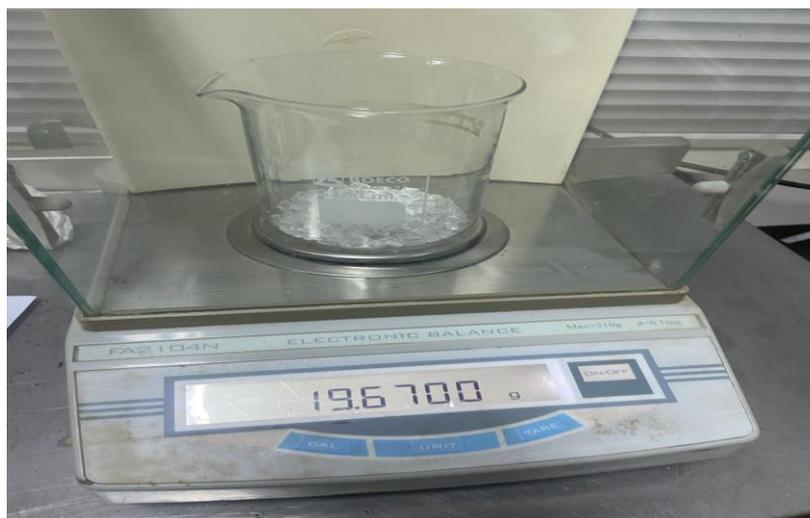


Figura 3.30. peso tiosulfato en la balanza

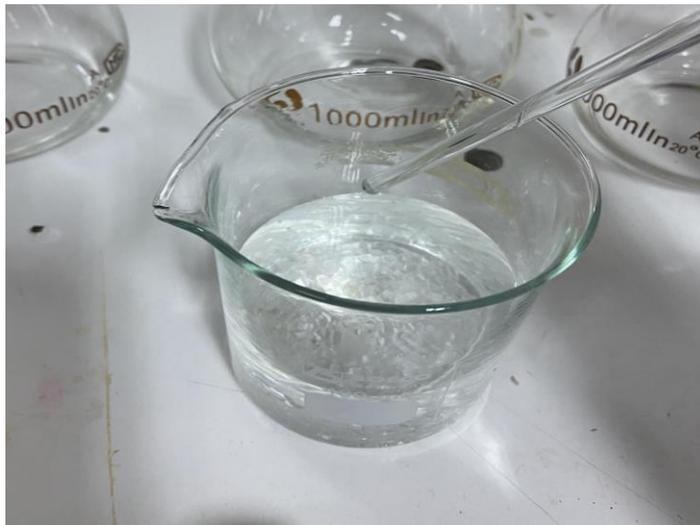


Figura 3.31. dilución de tiosulfato

En el siguiente paso, ya pesada la muestra se debe llenar con agua destilada hasta la mitad del vaso precipitado con la muestra hasta disolver el tiosulfato con la ayuda de una varilla.

Posteriormente en balanza analítica, posar el vaso precipitado de 250 ml previamente tarado, se debe pesar 1 gr de hidróxido de sodio p.a por litro de solución

Consecutivamente se deberá disolver el hidróxido de sodio con agua destilada en el vaso precipitado de 250 ml, con la ayuda de una varilla hasta disolver el reactivo.

Ya terminadas las dos soluciones, se debe invertir en matraces aforados de 1000 ml, primero invertir la solución de tiosulfato y luego el hidróxido de sodio, aforar con agua destilada hasta los 1000 ml.

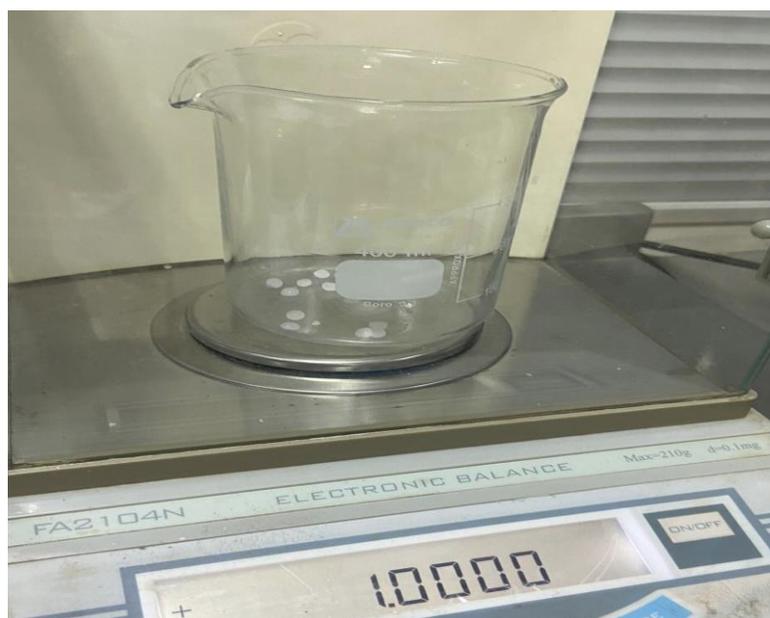


Figura 3.32 peso de hidróxido de sodio

CAPITULO IV

4.1. CONFECCIÓN Y RESULTADOS

El tiempo de confección del proyecto fue de aproximadamente un mes, donde el gasto total de este es de: \$282.567 pesos. Este equipo será donado a la universidad de Atacama, Sede Vallenar, para su utilización por las y los futuros estudiantes y la realización de pruebas de flotación de minerales.

A continuación, se adjuntan las imágenes de su construcción y las pruebas realizadas para constatar su óptimo funcionamiento.

La construcción del estanque se realizó con material de acero inoxidable, para dar mayor durabilidad al equipo, donde se construyen dos unidades conservando las mismas medidas de la anterior.



Figura 4.1 Trazado de estanque



Figura 4.2 Unión y armado de estanque

El principio fundamental de la celda de flotación, es obtener burbujas de aire transversales al flujo de la suspensión partículas sólida-agua, para efectuar el contacto, su ascenso hasta la superficie y formación de la espuma cargada, en un medio rápido y de mínima turbulencia.

La aireación del equipo es fundamental para el proyecto, por lo cual, se implementa una línea rígida de material de acero inoxidable, con un diámetro de 10 milímetros, con dos salidas de aire.



Figura 4.3 Pulido de estanque y fabricación de línea de aire

Para lograr una mayor eficiencia y seguridad, se confecciona un pedestal donde su estructura consiste en: la parte superior posee una caja elaborada por material inoxidable, y en su interior se encuentra un taladro utilizado como agitador de la Celda.



Figura 4.4 Fabricación de pedestal de motor



Figura 4.5. Terminación y pulido



Figura 4.6 presentación de Celda Denver terminada



Figura 4.7. Prueba con agua para verificar filtraciones

4.2. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para la determinación de los objetivos propuestos, se flotó y concentró un mineral llamado Calcopirita con una ley de 1,60% de Cu Total; este mineral se pasó por una malla -200 # Ty y lo que no paso esta malla se mortereo para obtener un 100% -200# tyler.

Los resultados que se dieron al haber flotado este mineral con sus diferentes parámetros, se mostrarán en la siguiente certificado de analisis quimico realizado en el laboratorio San Lorenzo de vallerar.

Nº	N ° Folio LSL	Identificación De Muestras			% Cu Total	
1	Cu-E-2679	Muestra Alimentación Calcopirita			1,60	
2	Cu-E-2680	M 01	Primera muestra de Flotación	antes de 15 mnts	1,047 gr	1,78
3	Cu-E-2681	M 02	Primera muestra de Flotación- Recuperación	después de 15 mnts	1,257 gr	1,34
4	Cu-E-2682	M 03	Segunda muestra de Flotación	antes de 15 mnts	1,257 gr	4,63
5	Cu-E-2683	M 04	Segunda muestra de Flotación - Recuperación	después de 15 mnts	1,047 gr	2,74
6	Cu-E-2684	M 05	Muestra 01 - 1° Vaso - 77,4662 gr	16-12-2022	1,257 gr	1,34
7	Cu-E-2685	M 06	Muestra 2 - vaso 1 - 59,6580 gr	16/12/2022 doble colector	1,257 gr	1,87
8	Cu-E-2686	M 07	Muestra 1 - doble colector - 39,1018 gr	22-12-2022	1,028 AL gr	1,88
9	Cu-E-2687	M 08	Muestra 2 - Recuperadora doble colector	56,2060 gr	1,028 AL gr	1,23

Resultado de análisis válido para las muestras proporcionadas por el cliente.



SAN LORENZO
 Laboratorio Químico
 Ana Zepeda Rojas
 Químico Laboratorista
 Laboratorio Químico San Lorenzo

Figura 4.8 Resultado de analisis

TABLA DE MUESTRAS					
N° MUESTRAS	pH	% Cu TOTAL	ALIMENTACIÓN DE MINERAL	PESO RECUPERADO	CONCENTRACIÓN DE MINERAL
M 1 ROUGHER	12,05	2,74	1.047	52,833 grs	ESPUMANTE 0,05235
M 1 Scavenger	12,05	1,78	1.047	17,274 grs	COLECTOR 0,03141
M 2 ROUGHER	12,00	4,63	1.257	77,466 grs	ESPUMANTE 0,01277
M 2 Scavenger	12,00	1,34	1.257	54,658 grs	COLECTOR 0,03773
M 3 ROUGHER	12,10	1,87	1.257	59,451 grs	DOBLE ESPUMANTE 0,06385
M 3 Scavenger	12,10	1,34	1.257	51,658 grs	COLECTOR 0,03773
M 4 ROUGHER	12,00	1,88	1.028	39,108 grs	ESPUMANTE 0,05142
M 4 Scavenger	12,00	1,23	1.028	56,201 grs	DOBLE COLECTOR 0,06118

Figura 4.9. Identificación de muestras

FORMULA PORCENTAJE DE Cu EN FINO DE ALIMENTACIÓN

$$\frac{\% \text{ DE Cu DE FINO ALIMENTADO } \times \text{ ALIMENTACIÓN DE MUESTRAS}}{100} = g \text{ Cu}$$

EJEMPLO:

$$\frac{1,6 \text{ Cu} \times 1047g}{100} = 16,752 g \text{ Cu}$$

FORMULA PARA RECUPERACIÓN

$$\frac{\text{GRAMOS RECUPERADO} \times \% \text{ Cu DE MUESTRAS}}{100} = g \text{ Cu}$$

EJEMPLO:

$$\frac{52,83 g \times 2,74 \text{ Cu}}{100} = 1,5g \text{ Cu}$$

MUESTRAS REALIZADAS	Cu DE MUESTRAS	PESO DE MINERAL	PESO DE MASA TOTAL	MASA RECUPERADA	Cu FINO ALIMENTACIÓN	Cu RECUPERADO
M 1 ROUGHER	2,74	1047	2792g	52,833 g	16,752	1,5
M1 Scavenger	1,78	1047	2792g	33,274 g	16,752	0,58
M2 ROUGHER	4,63	1257	2714g	77,466 g	20,112	3,5
M2 Scavenger	1,34	1257	2714g	54,658 g	20,112	0,72
M3 ROUGHER	1,87	1257	2714g	59,451 g	20,112	1,1
M3 Scavenger	1,34	1257	2714g	51,658 g	20,112	0,68
M4 ROUGHER	1,88	1028	2485g	81,108 g	16,448	1,5
M4 Scavenger	1,23	1028	2485g	56,201 g	16,448	0,68

Figura 4.10. tabla de datos finales

Esta tabla muestra el %Cu total y las pruebas de flotación realizadas; la gráfica muestra lo mismo, en ambas se muestra mayor concentración en la muestra 03 y recuperación en la muestra 04 viendo el mayor resultado de recuperación de cobre total.

GRÁFICO DE MUESTRAS Y SU PORCENTAJE DE COBRE TOTAL

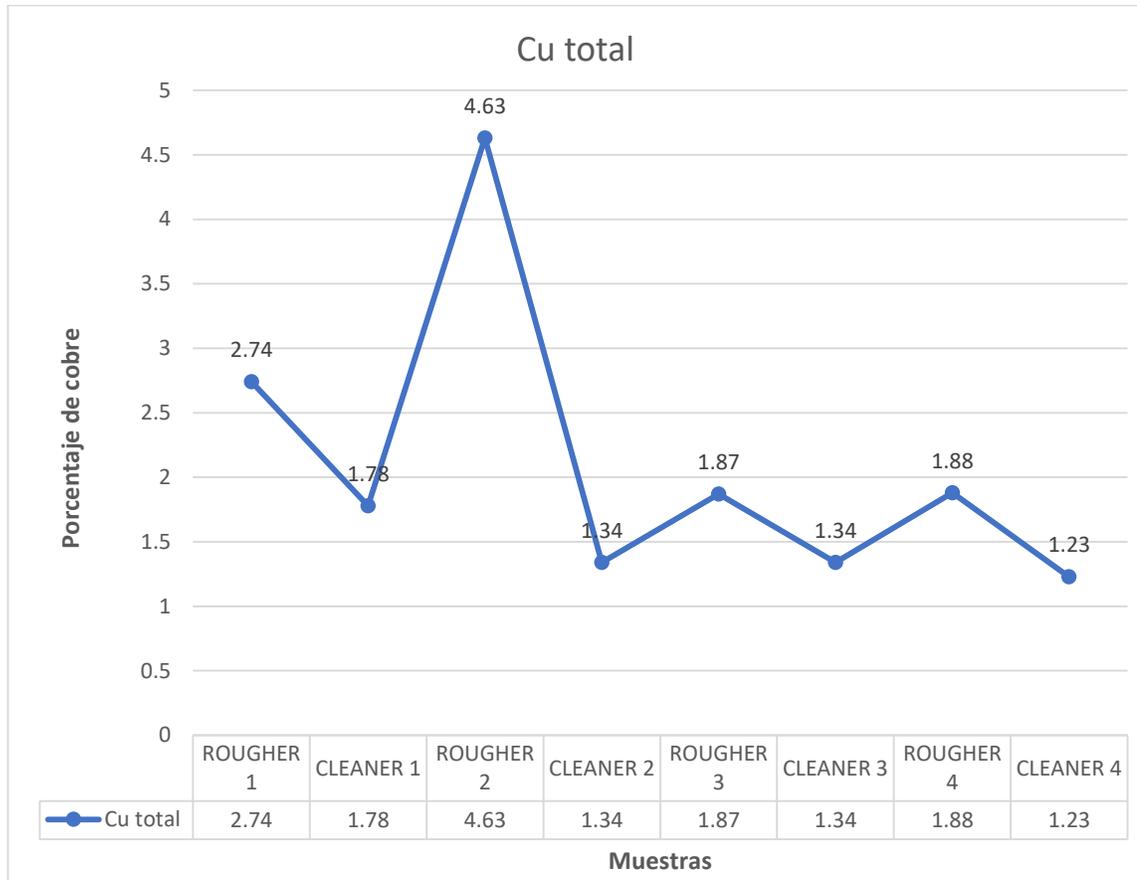


Figura 4.11. Gráfico porcentaje de Cu

En la optimización del ph logramos el pH optimo que es 12 en todas las pruebas de flotacion, cabe señalar que las condiciones del rediseño de la celda de flotacion y sus parametros de control quedaron muy bien para esta optimización

GLOSARIO

Palabras claves en español

- 1. Concentrador:** Planta procesadora de mineral de cobre cuya finalidad es procesarlo en diversas etapas hasta obtener un concentrado de este metal. Este concentrado se procesa en fundiciones o plantas químicas para obtener cobre en forma de barras o lingotes.
- 2. Química:** Ciencia que estudia la composición y propiedades de la materia y las transformaciones que sufre sin alterar los elementos que la forman. El comienzo del desarrollo moderno de la química se sitúa en el siglo XVII.
- 3. Depósito:** Lugar donde se encuentran naturalmente minerales, rocas o fósiles, especialmente cuando se puede explotar.
- 4. Flotación:** sistema de separación semilíquido o totalmente líquido basado en la diferencia de densidad. Está destinado a separar elementos sólidos o líquidos que flotan.
- 5. Molienda:** La molienda es una de las operaciones de molienda o reducción de tamaño, a la que se someten los minerales para su posterior beneficio.

- 6. Hidrometalurgia:** Rama de la metalurgia extractiva que estudia todos los procesos extractivos que se producen en medios acuosos, lo que permite la extracción de metales o compuestos de sus minerales o materiales de reciclaje (chatarra, escoria, cemento metálico, lodo de ánodo, etc.).
- 7. Hidrofílico:** Dicho de una materia o sustancia que adsorbe el agua con mucha facilidad.
- 8. Hidrofóbico:** Las sustancias hidrofóbicas están compuestas de moléculas no polares que repelen los cuerpos de agua y atraen otras moléculas neutras y disolventes no polares.
- 9. Homogeneización:** Es un proceso que combina diversas sustancias para producir una mezcla uniformemente consistente.
- 10. Agitación mecánica:** La agitación mecánica es una operación de mezcla, que se utiliza cuando el componente más grande de la mezcla es un líquido, que utiliza algún tipo de cuchillas como dispositivo para lograr la mezcla.
- 11. Optimización:** Lograr el mejor rendimiento de algo, utilizando los recursos de la mejor manera. Desde un punto de vista matemático, optimizar significa elegir el mejor de los elementos que pertenecen a un conjunto. Se trata de encontrar la solución más conveniente.
- 12. Pirometalurgia:** Metalurgia extractiva en la que se utilizan procesos para obtener y refinar metales utilizando calor, como en el caso de la fundición.

- 13. Recuperación de minerales:** El proceso consiste en modificar la naturaleza química de los minerales para separar el metal de sus compuestos sulfúricos, óxidos, silicatos o carbonatos.
- 14. Volumetría:** Técnica que se ocupa de la determinación y medición de volúmenes.
- 15. Mineral:** Compuestos químicos inorgánicos que poseen estructura atómica, se han formado por procesos naturales, tienen propiedades físicas y químicas definidas.
- 16. Mena:** Deposito natural, sometidas a fenómenos naturales, se describe como una extracción económica del mineral de interés.
- 17. Ganga:** Especies sin valor económico que se encuentra mezclado con la especie de interés económico.
- 18. Conminucion:** Es la reducción de tamaño, la cual libera la especie de valor comercial.
- 19. Yacimiento:** Masa de roca localizada en la corteza terrestre que contiene una o varios minerales en cantidad suficiente para ser extraídos con beneficio económicos.
- 20. Metalurgia:** Es la ciencia y técnica de extracción de metales a partir de minerales también estudia la producción de aleaciones, un concepto más amplio es

mineralurgia, que habla del tratamiento que se le da a los minerales metálicos y no metálicos.

21. Ley de cobre: Es el porcentaje que encierra una determinada muestra. Ejemplo cuando se habla de una ley de 1% significa que en cada 100 kilo de roca hay 1 kilo de cobre puro.

22. Ley de mineral: se refiere a la concentración de oro, plata, cobre, estaño, etcétera, presente en las rocas y en el mineralizado de un yacimiento.

23. Metal: elementos puros que están contenidos en una mena mineral y que pueden ser extraídos mediante procesos químicos.

24. Finos: Cantidades de metal presentes en un mineral o producto, se mide en una unidad de masa.

GLOSSARY

Keywords in english

1. Concentrator: Copper ore processing plant whose purpose is to process it in various stages until obtaining a copper ore concentrate. This concentrate is processed in smelters or chemical plants to obtain copper in the form of bars or ingots.

2. **Chemistry:** Science that studies the composition and properties of matter and the transformations it undergoes without altering the elements that form it. The beginning of the modern development of chemistry is located in the seventeenth century.
3. **Deposit:** Place where minerals, rocks or fossils are naturally found, especially when it can be exploited.
4. **Flotation:** semi-liquid or fully liquid separation system based on density difference. It is intended to separate floating solid or liquid elements.
5. **Grinding:** Grinding is one of the operations of ammuniton or reduction of size, to which the minerals are subjected for their subsequent benefit.
6. **Hydrometallurgy:** Branch of extractive metallurgy that studies all extractive processes that occur in aqueous media, which allows the extraction of metals or compounds from their minerals or recycling materials (scrap, slag, metal cement, anode sludge, etc.).
7. **Hydrophilic:** Said of a matter or substance that adsorbs water very easily.
8. **Hydrophobic:** Hydrophobic substances are composed of nonpolar molecules that repel water bodies and attract other neutral molecules and nonpolar solvents.
9. **Homogenization:** It is a process that combines various substances to produce a uniformly consistent mixture.

10. Mechanical agitation: Mechanical agitation is a mixing operation, which is used when the largest component of the mixture is a liquid, which uses some kind of blades as a device to achieve mixing.

11. Optimization: Achieve the best performance of something, using resources in the best way. From a mathematical point of view, optimizing means choosing the best of the elements that belong to a set. It is about finding the most convenient solution.

12. Pyrometallurgy: Extractive metallurgy in which processes are used to obtain and refine metals using heat, as in the case of smelting.

13. Mineral recovery: The process consists of modifying the chemical nature of minerals to separate the metal from its sulfuric compounds, oxides, silicates or carbonates.

14. Volumetry: Technique that deals with the determination and measurement of volumes.

15. Mineral: Inorganic chemical compounds that possess atomic structure, have been formed by natural processes, have definite physical and chemical properties.

16. Mena: Natural deposit, subjected to natural phenomena, is described as an economic extraction of the mineral of interest.

17. Ganga: Species without economic value that is mixed with the species of economic interest.

- 18. Comminution:** It is the reduction of size, which releases the species of commercial value.
- 19. Deposit:** Mass of rock located in the earth's crust that contains one or more minerals in sufficient quantity to be extracted with economic benefit.
- 20. Metallurgy:** It is the science and technique of extraction of metals from minerals also studies the production of alloys, a broader concept is mineralurgy, which speaks of the treatment given to metallic and non-metallic minerals.
- 21. Copper law:** It is the percentage that encloses a certain sample. Example when talking about a law of 1% means that in every 100 kilo of rock there is 1 kilo of pure copper.
- 22. Ore law:** refers to the concentration of gold, silver, copper, tin, etc., present in the rocks and mineralized of a deposit.
- 23. Metal:** pure elements that are contained in a mineral ore and that can be extracted by chemical processes.
- 24. Fine:** Amounts of metal present in a mineral or product, measured in a unit of mass.

CONCLUSIÓN

Para cualquier método o proceso de concentración de los diversos minerales, el objetivo fundamental siempre consistirá en separar o recuperar la mayor cantidad de mineral valioso (que tenga valor económico y sustentable para la empresa).

El proceso de flotación permite separar el mineral valioso de aquel mineral no valioso, utilizando sus propiedades físico-químicas mediante la adición de reactivos para las partículas hidrofóbicas e hidrofílicas del mineral, logrando una separación selectiva por medio de las burbujas de aire.

El proceso de concentración en una planta procesadora de minerales, es fundamental para recuperar el mineral valioso y obtener material de calidad, en el proceso metalúrgico para los ingresos de la empresa.

Los parámetros para una buena flotación son muy importantes. Esta afirmación, no se observa en la celda de flotación Denver de los tesisas del año 2020, debido a diversas condiciones desfavorables tanto en la confección de la celda, donde se aprecian fugas de líquidos, al igual que su sistema de aireación y agitación los cuales, no son constante; es por esto que se produjeron múltiples inconvenientes, lo que dificultaba alcanzar un pH óptimo.

El objetivo principal de nuestro proyecto es: optimizar los parámetros de recuperación de la celda tipo Denver, a escala de laboratorio de la Universidad de Atacama, Sede Vallenar, para futuros alumnos y alumnas para la realización de pruebas, y adquirir mayor conocimiento sobre la flotación, así poder lograr una experiencia académica tanto teórica como en lo práctico.

Se rediseñó un sistema de aireación rígido con dos salidas, el cual inyecta el aire por ambos extremos de manera uniforme, además posee una válvula reguladora en la parte

superior que evita la ruptura de las burbujas. Al momento de la realización de las pruebas, podemos apreciar el cumplimiento de nuestras expectativas debido a que las burbujas llegan de buena manera a la superficie, cumpliendo con uno de los parámetros esperados.

Se realizaron cuatro pruebas en laboratorio de la Universidad de Atacama sede Vallenar, la muestra numero dos obtuvo la mayor recuperación de Cu, dado que se utilizó doble reactivo de espumante con una recuperación en porcentaje de 4,63 como primera etapa de Rougher y 1,34 como segunda etapa de Scavenger.

Los resultados muestran que se pudo concentrar, pero no lo esperado ya que faltó tiempo y mineral para poder realizar más pruebas de optimización de parámetros, por lo que se sugiere que las futuras generaciones retomen este trabajo y puedan concretar cuáles son los valores óptimos para cada variable operacional.

Se concluye que fue posible construir una celda de flotación tipo Denver con materiales de calidad y con un sistema de agitación y aireación que permiten dar la continuidad que el proceso necesita. Las pruebas analíticas realizadas en el laboratorio dan cuenta de que es posible concentrar en la Celda, aunque todavía falta realizar más pruebas que permitan optimizar los parámetros, específicamente cantidad de colector, de espumante e incluso tiempo de residencia.

En estas condiciones y en limitado tiempo para la realización de las pruebas además de la carencia de material, se pudieron realizar cuatro pruebas lo cual en la muestra numero dos arrojó como resultado la etapa Rougher con un Cu de 1.1 como mínimo alcanzando el máximo de 3,5, y en la etapa Scavenger se logra un mínimo de un 0,58 alcanzando un máximo de 0,72.

BIBLIOGRAFIA:

(s.f.).

2021, U. (s.f.).

Alsimet. (29 de julio de 2021). Obtenido de Alsimet:
<http://www.alsimet.es/es/noticias/procesos-metalurgicos-industriales-pirometalurgia-hidrometalurgia-y-electrometalurgia>

Arkiplus. (24 de noviembre de 2021). *www.arkiplus.com*. Obtenido de
<https://www.arkiplus.com/historia-de-la-metalurgia/>

CODELCO. (2018). Lixiviación . *CODELCO EDUCA*.

Codelco. (2019). Flotación. *Codelco educa*.

CODELCO. (s.f.). *Codelco*. Obtenido de
https://www.codelco.com/glosario/prontus_codelco/2016-06-22/175933.html

Maria Luisa Paino, J. S. (2021). Metalurgia y Siderurgia. *depto de ciencias e ingeniería del terreno de los materiales* .

Mendez, A. (2010). Pirometalurgia. *La guía*.

minerías, C. d. (2018). *Consejo de competencia minerías*.

Schulz. (2013). *Metalurgia*.

TECHNOLOGY, G. (s.f.). *GLENCORE TECHNOLOGY*. Obtenido de
<https://www.glencoretechnology.com/es/technologies/jameson-cell/>

Universidad de Santiago de Chile. (s.f.). Hidrometalurgia. En *Departamento de ingeniería metalúrgica* (pág. capítulo 14).

Universidad Nacional de Colombia. (s.f.). *Pirometalurgia*. medellin.