

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA,

MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA
TIPO VÓRTICE DE LABORATORIO PARA LA OBTENCIÓN DE
POLVOS DE COBRE**

PRESENTADO POR:

Br. JHONATAN CESAR ALVARO MENDOZA

Br. LUIS ANGEL PERALTA POBLETE

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO METALÚRGICO**

ASESOR:

ABEL FRANKLIN CANAL CÉSPEDES

CUSCO-PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Abel Franklin Canal Céspedes
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA
CELDA ELECTROLÍTICA TIPO VÓRTICE DE LABORATORIO
PARA LA OBTENCIÓN DE POLVOS DE COBRE

Presentado por: Jhonatan Cesar Alvaro Mendoza DNI N° 74552419
presentado por: Luis Angel Peralta Poblete DNI N° 70449436
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO METALÚRGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por una veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 2.0%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 27 de mayo de 202026

Firma

Post firma Abel Franklin Canal Céspedes

Nro. de DNI 23875439

ORCID del Asesor 0000-0003-4619-7569

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:594999/12

TESIS - CELDA ELECTROLÍTICA TIPO VÓRTICE ALVARO.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:594999112

Fecha de entrega

27 may 2026, 9:08 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

27 may 2026, 9:29 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS - CELDA ELECTROLÍTICA TIPO VÓRTICE ALVARO.pdf

Tamaño del archivo

3.1 MB

110 páginas

21.965 palabras

135.108 caracteres

2% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

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

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

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

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Señores miembros jurados de la junta de evaluación.

En cumplimiento de las disposiciones del artículo 18 del reglamento de grados y títulos adaptado para atención por medio virtual (aprobado por Resolución Nro. CU-324-2020-UNSAAC de 24.09.2020), con el objetivo de optar el título profesional de ingeniero metalúrgico ponemos a vuestra disposición la tesis:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA TIPO VÓRTICE DE LABORATORIO PARA LA OBTENCIÓN DE POLVOS DE COBRE

La celda electrolítica tipo vórtice fue diseñada y construida en respuesta a la necesidad de superar las limitaciones actuales en la investigación de polvos metálicos en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. Su desarrollo busca proporcionar un equipo para la producción controlada de polvos metálicos, promoviendo la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías.

Br. Jhonatan Cesar Alvaro Mendoza

Br. Luis Angel Peralta Poblete

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, pilar de mi vida: a mi padre, Genaro Álvaro, a mi madre, Dina Mendoza, y a mis hermanos, Jhosued, Jhac y Glen. Su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y la fe que siempre depositaron en mí han sido la fuerza que me impulsó a perseverar y alcanzar esta meta.

Con todo mi amor, dedico este logro a mi esposa Sheyla Prisca y mi hija Elaine Cattaleya. Ustedes son mi razón, mi fuerza y mi mayor orgullo. Que este esfuerzo sea siempre un reflejo del amor infinito que siento por las dos.

Jhonatan Cesar

DEDICATORIA

Esta tesis es el resultado de muchos años de esfuerzo, dedicación y aprendizaje. Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por darme la vida, la salud y la fe para seguir adelante en este camino. A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y sus sabios consejos. Ellos han sido mi inspiración y mi fortaleza en los momentos difíciles. Sin ellos, nada de esto hubiera sido posible. Les dedico este trabajo con todo mi cariño y gratitud.

Luis Angel

ÍNDICE

PRESENTACIÓN.....	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN	xvi
1. CAPÍTULO I GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	1
1.1. Planteamiento Del Problema	1
1.2. Formulación Del Problema.....	2
1.2.1. Problema General.....	2
1.2.2. Problemas Específicos.....	2
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4. Justificación Del Proyecto	3
1.4.1. Práctica.....	3
1.4.2. Social.....	3
1.4.3. Tecnológico.....	3
1.4.4. Teórico	4
2. CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes De La Investigación	5
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	5
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	7
2.2. Bases Teóricas	7
2.2.1. Diseño	7

2.2.1.1.	Importancia.....	8
2.2.1.2.	Definición.....	8
2.2.1.3.	Fases Del Proceso de Diseño.....	9
2.2.1.4.	Herramientas De Diseño.....	11
2.2.2.	Construcción	12
2.2.3.	Polvos De Cobre	13
2.2.3.1.	Propiedades de los polvos de cobre.....	13
2.2.3.2.	Clasificación De Los Polvos De Cobre	13
2.2.4.	Electroquímica	15
2.2.4.1.	Ley De Ohm	16
2.2.5.	Fundamentos Termodinámicos	17
2.2.5.1.	Potencial Electrodo.....	17
2.2.5.2.	Energía Libre De Gibbs.....	18
2.2.5.3.	Ecuación De Nernst.....	19
2.2.6.	Fundamentos Electroquímicos	20
2.2.6.1.	Capa De Difusión De Nernst Y Transporte De Masa.....	20
2.2.6.2.	Teoría De Electro cristalización De Polvos Metálicos	21
2.2.6.3.	Reacciones De Oxidación Y Reducción.....	21
2.2.6.4.	Ley De Faraday	22
2.2.6.5.	Cinética Electroquímica	23
2.2.7.	Celda Electrolítica.....	25
2.2.7.1.	Componentes De La Celda Electrolítica	26
2.2.7.2.	Celda Electrolítica Tipo Vórtice.....	29
2.2.7.3.	Parámetros Operacionales	30
2.2.7.4.	Geometría Y Diseño Del Reactor Electrolítico	32
2.2.7.5.	Distancia Entre Electrodos	33
2.2.7.6.	Geometría De Los Electrodos	34
2.2.8.	Fundamentos En Dinámica De Fluidos.....	35

2.2.8.1.	Flujo Y Turbulencia	35
2.2.8.2.	Régimen de Flujo y Número de Reynolds.....	36
3.	CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	37
3.1.	Alcance De Investigación.....	37
3.1.1.	Exploratorio - Descriptivo.....	37
3.2.	Diseño De Investigación.....	37
3.2.1.	No Experimental	37
4.	CAPÍTULO IV INGENIERÍA DEL PROYECTO	39
4.1.	Investigación y Descubrimiento	39
4.2.	Ideación y Conceptualización.....	40
4.2.1.	Propuesta Del Diseño.....	40
4.2.2.	Descripción Del Diseño.	41
4.3.	Cálculos de Ingeniería	42
4.3.1.	Área Efectiva Del Cátodo.	42
4.3.2.	Área Efectiva Del Ánodo.....	43
4.3.3.	Masa Teórica Depositada.....	43
4.3.4.	Densidad De Corriente.....	44
4.3.5.	Número de Reynolds.....	44
4.3.6.	El Factor de Deposición de Polvo	47
4.3.7.	Estimación del Voltaje y Consumo Energético.....	49
4.4.	Desarrollo Del Diseño	50
4.4.1.	Planos	50
4.4.2.	Geometría Del Sistema.....	50
4.4.2.1.	Dimensionamiento Del Ánodo.	50
4.4.2.2.	Dimensionamiento Del Cátodo.	51
4.4.2.3.	Dimensionamiento De La Carcasa De La Celda.	51

4.4.2.4.	Volumen Útil Del La Celda.....	51
4.4.2.5.	Dimensionamiento De La Cubierta De La Celda.....	51
4.4.3.	Ubicación De Electrodos.....	52
4.4.4.	Sistema De Recirculación	52
4.4.5.	Diseño Del Sistema De Inducción De Vórtice.....	52
4.4.6.	Diseño Del Sistema De Circulación Del Electrolito	53
4.4.6.1.	Tubería De Circulación	54
4.4.6.2.	Bomba.	54
4.4.7.	Selección De Materiales.....	55
4.4.7.1.	Ánodo.	56
4.4.7.2.	Cátodo.	57
4.4.7.3.	Carcasa De La Celda.	59
4.4.7.4.	Cubierta De La Celda.	61
4.4.7.5.	Boquilla Helicoidal.....	63
4.4.7.6.	Tubería Y Accesorios.	63
4.5.	Proceso de Construcción	64
4.5.1.	Construcción De La Base.....	65
4.5.2.	Construcción De La Celda.	66
4.5.2.1.	Acondicionamiento De Accesorios Y Tuberías.	68
4.5.3.	Ensamblaje De La Celda Electrolítica.....	69
4.5.3.1.	Fijación De La Celda A La Base.	69
4.5.3.2.	Integración Del Sistema De Circulación.	69
4.5.3.3.	Conexiones Eléctricas.	70
4.6.	Prueba de Operatividad	71
4.6.1.	Prueba 1.....	71
4.6.2.	Prueba 2.....	72
4.7.	Resultados.....	74

5.	CONCLUSIONES	76
6.	RECOMENDACIONES	77
7.	REFERENCIAS	78
	ANEXOS	81
	ANEXO. A	82
	ANEXO. B	83
	ANEXO. C	84
	ANEXO. D	85
	ANEXO. E	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades de los polvos de cobre	13
Tabla 2 Propiedades físicas del cobre T2.....	57
Tabla 3 Propiedades químicas del cobre T2	57
Tabla 4 Propiedades mecánicas del cobre T2	57
Tabla 5 Propiedades físicas del acero Inoxidable AISI 304	59
Tabla 6 Propiedades químicas del acero Inoxidable AISI 304	59
Tabla 7 Propiedades mecánicas del acero Inoxidable AISI 304.....	59
Tabla 8 Propiedades físicas del polimetilmetacrilato.....	60
Tabla 9 Propiedades químicas del polimetilmetacrilato	60
Tabla 10 Propiedades mecánicas del polimetilmetacrilato	60
Tabla 11 Propiedades físicas del ABS - Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno.....	62
Tabla 12 Propiedades mecánicas del ABS - Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno	62
Tabla 13 Propiedades físicas del PVC – policloruro de vinilo	64
Tabla 14 Propiedades químicas del PVC – policloruro de vinilo	64
Tabla 15 Propiedades mecánicas del PVC – policloruro de vinilo.....	64
Tabla 16 Relación de materiales de la celda electrolítica	65
Tabla 17 Resumen de parámetros de operación.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fases del proceso de diseño.....	10
Figura 2 Polvo de cobre al 99.90 %.....	14
Figura 3 Celda electrolítica.....	26
Figura 4 Partes de una celda electrolítica tipo vórtice	27
Figura 5 Fuente de alimentación.....	28
Figura 6 Celda electrolítica tipo vórtice.....	29
Figura 7 Gráfico de eficiencia del proceso vs densidad de corrientes	31
Figura 8 Gráfico de eficiencia del proceso vs concentración del electrolito	32
Figura 9 Gráfico de eficiencia del proceso vs temperatura.....	33
Figura 10 Celda electrolítica tipo vórtice.....	41
Figura 11 Boquilla helicoidal de la celda electrolítica.....	53
Figura 12 Impresión de la boquilla helicoidal	54
Figura 13 Bomba de la marca CEELPEOPAR.....	55
Figura 14 Ánodo de cobre T2	56
Figura 15 Cátodo de acero inoxidable AISI 304.....	58
Figura 16 Carcasa de la celda de PMMA	61
Figura 17 Diseño de la cubierta superior de la celda	62
Figura 18 Impresión de la boquilla helicoidal con material ABS.....	63
Figura 19 Plancha de fenólico.....	66
Figura 20 Unión de planchas de fenólico.....	66
Figura 21 Fijación de la tapa superior con el ánodo	67
Figura 22 Ensamblaje del reactor de la celda electrolítica.....	67
Figura 23 Bomba y uniones universales roscadas	68
Figura 24 Instalación de componentes sobre el fenólico	69
Figura 25 Prueba hidráulica de la celda electrolítica	71
Figura 26 Preparación de la solución de sulfato de cobre.....	73
Figura 27 Proceso de vaciado de la solución de sulfato de cobre	74

Figura 28	Proceso de retiro de los electrodos de la celda	74
Figura 29	Cobre depositado en el cátodo.....	75
Figura 30	Polvos de cobre depositado	75

SIMBOLOGÍA

A	Área
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno, polímero termoplástico
ASTM	American Society for Testing and Materials
α	Coeficiente de transferencia de carga
ΔG	Energía libre de Gibbs
ΔH	Cambio de entalpia
ΔS	Cambio de entropía
C	Concentración de iones
E	Potencial eléctrico aplicado
E°	Potencial estándar de electrodo
E_{eq}	Potencial de equilibrio
F	Constante de Faraday
g	Aceleración gravitacional
GPM	Galones por minuto
I	Intensidad de corriente
L	Longitud
m	Masa
M	Masa molar
ml	Mililitros
mm	Milímetros
mS	Mili siemens
n	Número de electrones transferidos
P	Presión interna
PMMA	Polimetilmetacrilato, acrílico
PVC	Policloruro de vinilo
Q	Caudal

R	Resistencia eléctrica
R _a	Rugosidad superficial
R _e	Número de Reynolds

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo diseñar y construir una celda electrolítica tipo vórtice de laboratorio para la obtención de polvos de cobre, con el fin de fortalecer las capacidades de enseñanza e investigación en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Se empleó un diseño de ingeniería no experimental que integró principios de electroquímica, dinámica de fluidos y selección de materiales. Los componentes principales incluyeron un ánodo tubular de cobre T2, un cátodo cilíndrico de acero inoxidable AISI 304, una carcasa de polimetilmetacrilato, una boquilla helicoidal impresa en ABS para inducir el flujo vorticial, una bomba de diafragma y una fuente de alimentación de corriente continua variable. Los materiales se seleccionaron por su resistencia a la corrosión en soluciones de sulfato de cobre y ácido sulfúrico. Los parámetros operativos se definieron mediante cálculos basados en la Ley de Faraday, la ecuación de Nernst, la Ley de Ohm y antecedentes bibliográficos, estableciendo una intensidad de corriente de 10 A, un potencial de 2,56 V, una concentración de electrolito de 10 g Cu/L y un caudal de 9,5 L/min. Tras la construcción y las pruebas de operatividad, se obtuvieron depósitos de cobre en forma de polvo sobre el cátodo, confirmando que el diseño y los cálculos realizados permitieron generar un vórtice estable y lograr la electrodeposición. Se concluye que la celda electrolítica tipo vórtice construida cumple con su propósito académico, proporcionando una herramienta funcional para futuros estudios en electrometalurgia y pulvimetalurgia.

Palabras clave: Celda electrolítica tipo vórtice, Electrodeposición, Polvos de cobre, Diseño y construcción.

ABSTRACT

The objective of this project was to design and construct a laboratory-scale vortex-type electrolytic cell for the production of copper powders, with the purpose of strengthening teaching and research capabilities at the School of Metallurgical Engineering of the National University of San Antonio Abad of Cusco. A non-experimental engineering design approach was employed, integrating principles of electrochemistry, fluid dynamics, and material selection. The main components included a T2 copper tubular anode, an AISI 304 stainless steel cylindrical cathode, a polymethyl methacrylate housing, an ABS 3D-printed helical nozzle to induce vortex flow, a diaphragm pump, and a variable direct current power supply. Materials were selected based on their corrosion resistance in copper sulfate and sulfuric acid solutions. Operating parameters were established through calculations based on Faraday's Law, the Nernst equation, Ohm's Law, and previous scientific studies, defining a current intensity of 10 A, a cell potential of 2.56 V, an electrolyte concentration of 10 g Cu/L, and a flow rate of 9.5 L/min. Following construction and operational testing, copper deposits in powder form were obtained on the cathode surface, confirming that the design and calculations enabled the generation of a stable vortex and successful electrodeposition. It is concluded that the constructed vortex-type electrolytic cell fulfills its academic purpose by providing a functional tool for future studies in electrometallurgy and powder metallurgy.

Keywords: Vortex-type electrolytic cell, Electrodeposition; Copper powders; Design and construction.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la Ingeniería Metalúrgica, los polvos de cobre han adquirido una relevancia significativa gracias a sus propiedades, tales como su conductividad eléctrica y térmica, lo que los hace esenciales para el desarrollo de tecnologías avanzadas y su utilidad en diversas aplicaciones industriales, como electrónica, donde se utilizan en pastas conductoras para circuitos impresos, y en la industria automotriz, en materiales de fricción como pastillas de freno. También son fundamentales en la fabricación de componentes de alta resistencia mecánica, como rodamientos auto lubricantes y contactos eléctricos, gracias a su capacidad para mejorar la conductividad y la resistencia en aleaciones y resinas compuestas.

La demanda de estos materiales ha impulsado la exploración de métodos innovadores para su producción, siendo la electrodeposición una técnica consolidada, avanzada y eficiente. Según los estudios publicados en revistas indexadas, la electrodeposición permite obtener polvos de cobre de alta pureza, ideales para aplicaciones que requieren propiedades específicas, como alta conductividad eléctrica y térmica. Este proceso implica la deposición de partículas metálicas a partir de electrolitos, y su eficiencia depende de factores como la composición del electrolito y las condiciones operativas.

En este contexto, surge el interés por el diseño de una celda electrolítica tipo vórtice, un sistema que emplea el flujo vorticial para optimizar la deposición de polvos metálicos. Si bien esta tecnología no es completamente nueva, diversos estudios a nivel mundial han demostrado que, en comparación con la electrólisis convencional, la tecnología electrolítica de vórtice presenta ventajas relevantes, tales como una mayor eficiencia en la transferencia de masa, mayores tasas de recuperación de metales, incluso en soluciones de baja concentración, un menor consumo energético y una mejora significativa en la calidad de la deposición metálica. Asimismo, el flujo vorticial permite incrementar la velocidad del proceso electrolítico y favorece el diseño de sistemas más compactos y adaptables a distintas condiciones de operación. Sin embargo, su implementación en contextos académicos de la formación en ingeniería metalúrgica aún es un área por explorar.

En ese sentido, el presente trabajo busca contribuir en esa dirección, detallando el proceso de diseño y construcción de la celda electrolítica tipo vórtice destinada a la obtención de polvos de cobre,

y resaltando como un recurso para la experimentación y el aprendizaje en el campo de la electrometalurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, logrando ser una herramienta útil para laboratorios de investigación y formación académica.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. Planteamiento Del Problema

El Perú se posiciona como el segundo mayor exportador de cobre a nivel mundial. Según la nota de prensa de la Plataforma Digital Única del Estado Peruano (2024), la producción nacional de cobre “alcanzó 246 568 toneladas métricas finas en agosto, cifra mensual más alta registrada en el 2024. Este incremento representa un crecimiento del 10,9 % respecto a julio y un aumento del 10,7 % en comparación con agosto del 2023”. Estos datos reflejan la importancia del cobre como recurso y como motor económico del país. Además, Perú tiene la oportunidad de diversificar su oferta y agregar valor a su producción de cobre mediante el desarrollo de polvos de cobre, que no solo permitiría fortalecer su economía, sino también impulsar la innovación y la creación de empleos especializados. En este contexto, Shokobayev et al. (2022) señalan que "a finales del siglo XX y principios del XXI, la demanda de polvos de cobre ultrafinos y ultra dispersos aumentó enormemente...y es necesario desarrollar diversos métodos tecnológicos para la producción de diversos materiales en polvo", destacando su relevancia en industrias como la ingeniería mecánica, la construcción y la eléctrica, utilizados para la fabricación de circuitos impresos, baterías y componentes para vehículos eléctricos, entre otros.

Sin embargo, a pesar de la importancia de la producción de cobre en el país, existen limitaciones en la infraestructura para investigar y producir polvos metálicos. No se cuenta con laboratorios especializados en electrometalurgia y pulvimetalurgia, lo cual reduce las oportunidades para innovar en la obtención y el tratamiento de estos materiales. Esta situación limita el potencial del país tanto en el desarrollo de conocimiento en esta área como en la posibilidad de participar en el mercado internacional, exportando polvos metálicos. En ese sentido, en el artículo científico de Shokobayev et al. (2022) se menciona que " el método de deposición electrolítica es uno de los métodos más tecnológicamente avanzados y eficientes para la producción de polvos de cobre finamente dispersos," y detalla el uso de una celda electrolítica del tipo vórtice el cual permitió producir polvos de cobre con un tamaño de partícula de 5-10 μm y una pureza de 99.5%.

Dentro de este contexto, en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, la carencia de equipos en los laboratorios para realizar investigaciones sobre la producción de polvos metálicos representa una barrera significativa. La celda electrolítica tipo vórtice de laboratorio para la obtención de polvos de cobre permitirá, por un lado, equipar el laboratorio, y por otro, habilitar investigaciones futuras para la obtención de otros polvos metálicos, ajustando los parámetros operativos. Esto ayudaría a desarrollar competencias en los estudiantes, promover la investigación en metalurgia y contribuir a ampliar el conocimiento en áreas de pulvimetalurgia y electrometalurgia. Además, este equipo posibilita a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica establecerse como un referente académico de la región y el Perú, promoviendo la investigación y el desarrollo de tecnologías innovadoras para la producción de polvos metálicos.

1.2. Formulación Del Problema

1.2.1. Problema General

¿Es posible diseñar y construir una celda electrolítica tipo vórtice de laboratorio para la obtención de polvos de cobre, que contribuya en el desarrollo de investigaciones en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica?

1.2.2. Problemas Específicos

PE1. ¿Cuáles son los materiales adecuados para el diseño y construcción de los componentes de una celda electrolítica tipo vórtice de laboratorio?

PE2. ¿Qué dimensiones deben considerarse en los componentes de la celda electrolítica tipo vórtice de laboratorio?

PE3. ¿Qué condiciones operativas deben establecerse para garantizar el funcionamiento adecuado de la celda electrolítica tipo vórtice de laboratorio?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar y construir una celda electrolítica tipo vórtice de laboratorio para la obtención de polvos de cobre, que contribuya en el desarrollo de investigaciones en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

1.3.2. Objetivos Específicos

- OE1.** Seleccionar los materiales adecuados para el diseño y construcción de los componentes de la celda electrolítica tipo vórtice de laboratorio.
- OE2.** Determinar las dimensiones de los componentes de la celda electrolítica tipo vórtice de laboratorio.
- OE3.** Determinar las condiciones operativas para garantizar el funcionamiento adecuado de la celda electrolítica tipo vórtice de laboratorio.

1.4. Justificación Del Proyecto

1.4.1. Práctica

El diseño y construcción de una celda electrolítica tipo vórtice resulta de alto valor, ya que equipa al laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de un equipo diseñado para apoyar a docentes y estudiantes en investigaciones relacionadas con la pulvimetalurgia. La implementación de esta celda permitirá que el laboratorio ofrezca un espacio adecuado para el desarrollo de conocimientos prácticos y experimentales. Esta incorporación fortalece las capacidades operativas del laboratorio, así como también fomenta el desarrollo de conocimientos técnicos y la generación de conocimiento especializado.

1.4.2. Social

Los principales beneficiarios son los estudiantes y docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, así como la comunidad universitaria y el público interesado en el campo de la pulvimetalurgia. La incorporación de este equipo al laboratorio brinda la oportunidad de innovar en la producción de polvos metálicos, fortaleciendo la formación académica e intelectual de sus usuarios. De esta manera, contribuyendo positivamente a la calidad educativa y a la preparación de profesionales con la capacidad de impulsar el desarrollo del sector metalúrgico en el país.

1.4.3. Tecnológico

El diseño y construcción de una celda electrolítica tipo vórtice tiene una notable relevancia tecnológica, ya que aborda la problemática de la producción de polvos de cobre a nivel nacional, proporcionando conocimientos aplicables al diseño de procesos industriales. Con este equipo en el

laboratorio, se facilitará el estudio de la producción de polvos metálicos, abriendo la posibilidad de desarrollar proyectos de inversión, como plantas de producción continua de polvos de cobre. Dado que Perú se encuentra entre los principales países exportadores de cobre a nivel mundial, esta investigación contribuye al potencial de diversificar y agregar valor a los productos exportados, como los polvos de cobre, beneficiando la economía nacional.

1.4.4. Teórico

Este proyecto tiene un alto valor teórico, ya que permitirá explorar el comportamiento de variables en el diseño y construcción de una celda electrolítica tipo vórtice para la producción de polvos de cobre. Dicho diseño posibilitará el análisis de las relaciones entre variables, facilitando que futuros investigadores realicen ajustes y mejoras que impacten en la calidad y la velocidad de producción. Así, esta investigación contribuye a la ampliación del conocimiento en pulvimetalurgia y electrometalurgia, creando una base sólida para futuros desarrollos de estas áreas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes De La Investigación

El presente proyecto de ingeniería no cuenta con antecedentes específicos al título de “Diseño y Construcción de una celda electrolítica del tipo vórtice”, sin embargo, se encuentran trabajos de investigación que mencionan sobre el uso y operatividad de celdas electrolíticas tipo vórtice o ciclón, los cuales se detallan a continuación.

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Shokobayev et al. (2022). En su artículo científico titulado “*Obtaining of copper powder by method of a vortex electrolysis from acid sulphate electrolytes*”, publicado en la revista Results in Engineering, desde el D.V. Sokolskiy Institute of Fuel Catalysis and Electrochemistry en Almaty, Kazajistán, abordaron el problema de las limitaciones de las celdas electrolíticas convencionales para producir polvos de cobre finamente dispersos con alta eficiencia y control de morfología. Su objetivo principal fue verificar la operatividad, durabilidad y eficiencia de una celda electrolítica tipo vórtice para la producción de polvos de cobre a partir de electrolitos de sulfato ácido. Aplicaron una metodología experimental variando parámetros como densidad de corriente, temperatura, concentración de iones de cobre y aditivos. Los principales resultados mostraron que es posible obtener polvos con tamaño de partícula entre 5 y 10 μm y una eficiencia de corriente del 95,5 % bajo condiciones óptimas (150 mA/cm², 40 °C, 10 g/L de Cu²⁺, 100 g/L de H₂SO₄ y 7 g/L de NTP). Concluyeron que el flujo vorticial mejora significativamente la transferencia de masa, la estabilidad del electrolito y permite un buen control de la morfología del polvo. Este estudio representa un aporte fundamental para nuestro trabajo, ya que es el antecedente más directo y sirve de base técnica para el diseño, la selección de parámetros operativos y la justificación de la celda tipo vórtice que construimos en esta tesis.

Wang, Y., y Wei, Y. (2022), en el artículo científico “*Effect of Zn²⁺ on the extraction of copper by cyclone electrowinning from simulated copper-containing electrolyte*”; publicado en Separation and Purification Technology (China), analizaron el problema del efecto negativo que generan las impurezas, como los iones Zn²⁺, en la electroobtención ciclónica de cobre. Su objetivo principal fue evaluar cómo

diferentes concentraciones de Zn^{2+} afectan la eficiencia de corriente, la pureza y la morfología del cobre catódico depositado. Mediante experimentos en celda ciclónica con soluciones simuladas, encontraron que concentraciones altas de Zn^{2+} (mayores a 3 g/L) reducen la eficiencia de corriente, aumentan la concentración residual de cobre y favorecen la formación de dendritas. Concluyeron que es fundamental controlar las impurezas para obtener cobre de alta pureza y buena morfología, destacando las ventajas de la tecnología ciclónica en selectividad frente a métodos tradicionales. Este antecedente aporta a nuestra tesis al resaltar la importancia del control de impurezas y las ventajas del flujo ciclónico, lo que refuerza la elección de nuestro diseño para lograr depósitos de mejor calidad.

Barragán et al. (2020), en su artículo científico “*Copper and Antimony Recovery from Electronic Waste by Hydrometallurgical and Electrochemical Techniques*”, publicado en ACS Omega desde la Universidad de Guadalajara, México, abordaron el problema de la recuperación eficiente de metales valiosos a partir de residuos electrónicos (e-waste). Su objetivo principal fue desarrollar un proceso combinado hidrometalúrgico y electroquímico para obtener cobre y antimonio de alta pureza. Utilizaron lixiviación con cloruro férrico seguida de electroobtención en un reactor rotatorio con electrodo cilíndrico (RCE). Los resultados más importantes fueron la obtención de cobre con 96 % de pureza y antimonio con 81 % de pureza, con una eficiencia de corriente inicial del 85 %. Concluyeron que esta metodología es viable, económica y más sostenible que los procesos pirometalúrgicos. Su aporte radica en demostrar la adaptabilidad de reactores electroquímicos con flujo controlado para recuperación de cobre, lo que complementa y motiva el uso de flujo vorticial en nuestra celda de laboratorio.

Xu et al. (2020), en el artículo científico “*Extracting of copper from simulated leaching solution of copper-cadmium residues by cyclone electrowinning technology*”, publicado en la revista Hydrometallurgy (China), investigaron el problema de la recuperación selectiva de cobre desde soluciones polimetálicas complejas provenientes de residuos de cobre y cadmio. Su objetivo principal fue evaluar la eficiencia de la electroobtención ciclónica para separar cobre de alta pureza. Aplicaron una metodología de tres etapas en celda ciclónica con diferentes densidades de corriente y flujos de electrolito. Lograron una pureza de cobre superior al 99.9 % y eficiencia de corriente de hasta 98.93 %,

reduciendo la concentración de Cu^{2+} a menos de 0.1 g/L. Concluyeron que la tecnología ciclónica ofrece mayor selectividad, mejor transferencia de masa y menor impacto ambiental que los métodos convencionales. Este trabajo aporta evidencia sólida sobre las ventajas del flujo ciclónico, reforzando la decisión de implementar un diseño tipo vórtice en nuestra celda para mejorar la eficiencia y calidad de los polvos de cobre.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Gutiérrez, C. (2023) en su trabajo de investigación titulado “*Optimización de extracción de cobre de soluciones empleando electrodeposición ciclónica*”, realizado en la Universidad Nacional del Callao, abordó las limitaciones de la electrodeposición convencional, como la baja eficiencia y la distribución no uniforme de la corriente. Su objetivo principal fue desarrollar y optimizar una celda electrolítica ciclónica a escala de laboratorio para mejorar la extracción de cobre. Utilizó una configuración con flujo tangencial, cátodo de acero inoxidable, diseño tubular y un sistema de recirculación controlado con Arduino. Los principales resultados indicaron que flujos entre 6 y 9 L/min, concentraciones de 15 a 35 g/L de cobre e intensidades de corriente hasta 19 A permitieron una deposición más uniforme. Concluyó que la electrodeposición ciclónica mejora significativamente el desempeño respecto al método tradicional. Este antecedente nacional es muy cercano a nuestro trabajo, ya que desarrolla una celda ciclónica en contexto peruano; nuestra tesis lo complementa al enfocarse específicamente en el diseño y construcción de una celda tipo vórtice con boquilla helicoidal adaptada para la producción de polvos de cobre en la UNSAAC.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Diseño

Según Budynas, R. G., y Nisbett, J. K. (2008), diseñar significa crear un plan que permita satisfacer una necesidad concreta o dar solución a un problema real. El diseño no es un proceso rígido ni lineal, sino una actividad creativa y dinámica que avanza mediante constantes ajustes y mejoras. A lo largo de este proceso, el diseñador debe tomar decisiones importantes, muchas veces con información limitada, otras con datos suficientes y, en algunos casos, enfrentando un exceso de información que debe ser analizada con criterio.

El diseño es también una actividad profundamente humana, basada en la comunicación. A través de palabras, imágenes, ideas escritas y orales, el diseñador transmite soluciones y construye entendimiento. La creatividad personal, la capacidad de comunicar con claridad y la habilidad para resolver problemas se combinan con el conocimiento de la tecnología y sus principios básicos. Las herramientas de la ingeniería, como las matemáticas, la estadística, la computación, las representaciones gráficas y el lenguaje técnico, se integran para dar forma a un plan que, al materializarse, se convierte en un producto funcional, seguro, confiable, útil y competitivo, capaz de ser fabricado y comercializado sin depender de quién lo construya o lo utilice.

2.2.1.1. Importancia

El diseño cumple un papel esencial en el desarrollo tecnológico, ya que hace posible la creación de máquinas, vehículos, estructuras y sistemas que mejoran la calidad de vida y fortalecen la industria. Gracias a la ingeniería, es posible anticipar y controlar el comportamiento de estos sistemas, asegurando que respondan adecuadamente a las condiciones de uso y a las necesidades para las que fueron concebidos.

Un proceso de diseño bien planificado considera aspectos clave como la selección de materiales, la geometría de los componentes, los métodos de manufactura y los costos asociados. Aunque no existe una única solución perfecta, el diseño de ingeniería abarca todas las etapas del desarrollo, desde la identificación de una necesidad hasta la construcción y validación del producto final. Por esta razón, las empresas invierten de manera constante en diseño, ya que les permite reducir costos, optimizar recursos, innovar y acelerar la introducción de nuevos productos en el mercado, manteniéndose competitivas en un entorno cada vez más exigente. (Vanegas U., 2018)

2.2.1.2. Definición

El diseño se enfoca en la creación de dispositivos, productos o sistemas que pueden ser completamente nuevos o surgir a partir de la modificación de elementos existentes. Según Vanegas U., L. V. (2018), el diseño puede clasificarse en tres tipos principales:

Diseño original, que consiste en crear algo nuevo a partir de un principio propio e innovador.

Diseño adaptativo, que aplica un sistema ya conocido a una nueva situación, manteniendo el mismo principio de solución.

Diseño de variante, que introduce cambios en ciertos aspectos de un sistema, conservando su función y su principio de funcionamiento.

Esta clasificación permite comprender que el diseño no siempre parte de cero, sino que también se apoya en el conocimiento previo para mejorar y optimizar soluciones existentes.

2.2.1.3. Fases Del Proceso de Diseño

Según Budynas, R. G., y Nisbett, J. K. (2008), el diseño en ingeniería no es un proceso lineal, sino iterativo e interactivo, en el cual las distintas fases se retroalimentan continuamente. Como se muestra en la Figura 1.

Cada etapa influye en las demás, permitiendo mejorar progresivamente la solución hasta cumplir los objetivos técnicos, funcionales y económicos del proyecto, como se detalla a continuación.

a) Identificación De La Necesidad.

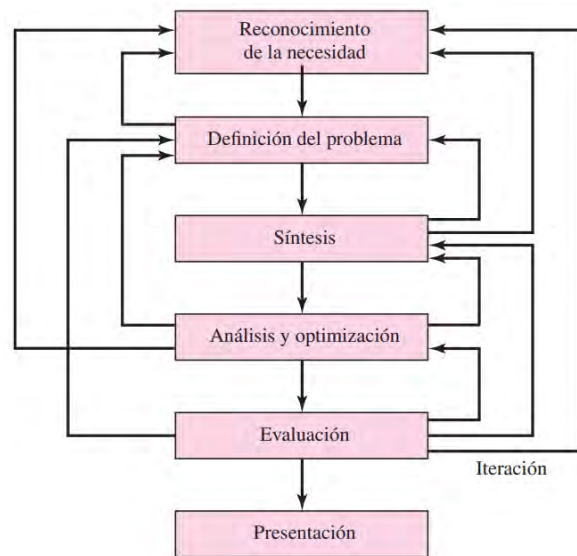
El proceso de diseño se inicia con el reconocimiento de una necesidad, la cual puede surgir de un problema existente, una mejora requerida o una oportunidad de innovación. En esta fase se define de manera general qué se necesita y por qué es importante resolverlo, sin entrar aún en detalles técnicos.

b) Definición Del Problema.

Una vez identificada la necesidad, esta se transforma en un problema de ingeniería claramente definido. En esta etapa se establecen los requisitos del diseño, las condiciones de operación, las limitaciones técnicas, económicas y normativas, así como los criterios que permitirán evaluar las posibles soluciones.

c) Síntesis.

La síntesis consiste en la generación de posibles soluciones al problema planteado. En esta fase se proponen conceptos, configuraciones y alternativas de diseño, apoyándose en la creatividad del diseñador, su experiencia y el conocimiento de principios de ingeniería. Es común que se desarrollen varias opciones antes de seleccionar una.

Figura 1*Fases del proceso de diseño*

Nota: En la imagen se muestra las fases del proceso de diseño que reconocen múltiples retroalimentaciones e iteraciones entre las diferentes fases del diseño. Tomado de Budynas, R. G., y Nisbett, J. K.: (2008)

d) Análisis Y Optimización.

Durante esta etapa, las alternativas propuestas son evaluadas mediante cálculos, modelos y criterios técnicos. Se analizan aspectos como resistencia, funcionamiento, seguridad, eficiencia y costos. A partir de estos análisis, el diseño se ajusta y mejora, buscando una solución que cumpla de manera equilibrada con todos los requisitos establecidos.

e) Evaluación.

La evaluación permite comparar las diferentes alternativas de diseño y seleccionar la más adecuada. Se consideran factores técnicos, económicos, de manufactura y de uso. Esta fase puede conducir a regresar a etapas anteriores si los resultados no son satisfactorios, lo que refuerza el carácter iterativo del proceso.

f) Presentación y documentación del diseño.

La etapa final consiste en la documentación completa del diseño seleccionado. Esto incluye planos, especificaciones técnicas, listas de materiales y descripciones necesarias para su fabricación, ensamblaje y uso. Una documentación clara asegura que el diseño pueda ser reproducido correctamente, sin depender directamente del diseñador original.

2.2.1.4. Herramientas De Diseño.

Según Budynas, R. G., y Nisbett, J. K. (2008), en la actualidad, el ingeniero cuenta con una amplia variedad de herramientas y recursos que facilitan la solución de problemas de diseño. Las computadoras y los programas especializados permiten desarrollar, analizar y simular componentes mecánicos con mayor precisión y eficiencia. Sin embargo, estas herramientas no reemplazan el conocimiento técnico, sino que lo complementan. El ingeniero necesita una base sólida en ciencias e ingeniería, así como información detallada sobre el desempeño y las características de los componentes que utiliza.

a) Herramientas Computacionales.

El software de diseño asistido por computadora (CAD) permite crear modelos tridimensionales (3D) a partir de los cuales se generan automáticamente vistas bidimensionales con dimensiones precisas. Estos modelos facilitan la generación de trayectorias de herramientas de manufactura y, en algunos casos, permiten fabricar piezas directamente mediante técnicas de prototipado rápido.

Una de las grandes ventajas de los sistemas CAD es su capacidad para realizar cálculos rápidos y exactos de propiedades importantes, como la masa, el centro de gravedad, los momentos de inercia, las áreas y las distancias entre puntos. Existen numerosos programas de diseño CAD, entre los que destacan Autodesk Inventor, SolidWorks, Siemens NX y Solid Edge.

b) Herramientas No Computacionales.

El proceso de diseño de ingeniería se apoya en herramientas no computacionales que permiten comprender, analizar y validar las soluciones propuestas. Estas herramientas aportan una base sólida para la toma de decisiones y fortalecen la calidad del diseño desde sus primeras etapas.

Entre las principales herramientas no computacionales se encuentran los métodos analíticos, los cuales se basan en principios fundamentales de la física y las matemáticas. Asimismo, el uso de normas y estándares técnicos constituye una herramienta esencial dentro del diseño de ingeniería. Estas normas establecen criterios de calidad, seguridad y desempeño, permitiendo que los productos diseñados sean confiables y compatibles con los requisitos técnicos y legales vigentes.

Las herramientas gráficas tradicionales, como los bocetos y croquis, también forman parte del proceso de diseño. Estas permiten representar ideas de manera rápida y clara, facilitando la comunicación entre los integrantes del equipo de trabajo y sirviendo como punto de partida para el desarrollo de modelos más detallados.

2.2.2. Construcción

La construcción se refiere al proceso mediante el cual los componentes diseñados son fabricados y ensamblados para conformar un sistema físico y funcional. Este proceso comprende la materialización del proyecto mediante operaciones técnicas que permiten obtener un conjunto capaz de cumplir su función bajo condiciones reales de servicio.

Budynas, R. G., y Nisbett, J. K. (2008), explican que los componentes mecánicos deben ser fabricados considerando los procesos industriales disponibles, las limitaciones de los materiales y los métodos de unión, ya que estos aspectos determinan la viabilidad del sistema construido.

Vanegas U., L. V. (2018) señala que la fabricación de elementos mecánicos implica la transformación de materiales en piezas funcionales, respetando dimensiones, tolerancias y condiciones de resistencia previamente establecidas. Asimismo, indica que el ensamblaje adecuado de los componentes es fundamental para garantizar la estabilidad, seguridad y correcto funcionamiento del sistema.

Desde este enfoque, la construcción en ingeniería puede organizarse en etapas generales:

Fabricación de componentes, donde se elaboran las piezas individuales mediante procesos como mecanizado, conformado o corte, asegurando que cumplan con las especificaciones técnicas.

Ensamblaje, que consiste en la unión ordenada de los componentes mediante elementos de fijación o métodos de unión, garantizando continuidad estructural y funcional.

Verificación, en la cual se comprueba que el conjunto ensamblado funcione correctamente y soporte las condiciones de trabajo previstas.

Tanto Budynas, R. G., y Nisbett, J. K. (2008) y Vanegas U., L. V. (2018) coinciden en que una construcción deficiente, ya sea por errores en la fabricación o en el ensamblaje, puede comprometer el

desempeño y la confiabilidad del sistema, aun cuando los cálculos previos sean correctos. Por ello, la construcción representa una etapa crítica para asegurar que el sistema mecánico cumpla con su propósito de manera segura y eficiente.

2.2.3. *Polvos De Cobre*

Los polvos de cobre (Figura 2) son partículas metálicas sólidas obtenidas a partir de diferentes procesos fisicoquímicos, cuyas propiedades dependen directamente de su tamaño de partícula, morfología y método de producción. Estas características determinan su comportamiento eléctrico, térmico, químico y mecánico, así como su idoneidad para aplicaciones industriales específicas, como la metalurgia de polvos, la electrónica y la fabricación aditiva.

Tabla 1

Propiedades de los polvos de cobre

PROPIEDADES	VALOR
Color	Rojizo metálico
Densidad	8.89 g/cm ³
Conductividad eléctrica	Alta
Compresibilidad	Alta
Temperatura de sinterización	700 – 900 °C
Fragilidad	Baja
Capacidad de aleación	Buena

2.2.3.1. *Propiedades de los polvos de cobre*

Las propiedades de los polvos de cobre dependen del tamaño de las partículas, su forma, su pureza y como son obtenidos. Esto afecta cómo se manejan, se guardan, se compactan o se sinterizan, y también su rendimiento eléctrico y mecánico. Por eso, estudiar sus características físicas, químicas y mecánicas ayuda a entender cómo actúan y por qué elegirlos para ciertos usos.

Los polvos de cobre electrolítico a diferencia de los que salen de atomización o métodos mecánicos tienen mayor pureza, una forma dendrítica y una superficie grande, lo que influye directo en sus propiedades físicas, químicas y metalúrgicas, algunas de las propiedades se detallan en la Tabla 1.

2.2.3.2. *Clasificación De Los Polvos De Cobre*

a) Según Tamaño De Partícula.

Desde el enfoque granulométrico, los polvos de cobre se clasifican en función del diámetro medio de partícula, siguiendo criterios ampliamente aceptados en la metalurgia de polvos y la ciencia de materiales:

Polvos nanométricos (<100 nm): Presentan una muy alta área superficial específica, elevada reactividad química y mayor tendencia a la oxidación. Estas propiedades los hacen especialmente adecuados para aplicaciones catalíticas, tintas conductoras avanzadas y procesos electroquímicos, donde la cinética de reacción es un factor determinante.

Figura 2

Polvo de cobre al 99.90 %



Nota: En la imagen se muestra polvo electrolítico de cobre con un 99.90% de pureza y tamaño de grano de 100 μm . Tomado de: (Gutierrez C., 2023)

Polvos micrométricos (=1-100 μm): Constituyen la fracción más utilizada a nivel industrial. Mantienen una alta conductividad eléctrica cercana a la del cobre masivo ($\approx 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$) y ofrecen un equilibrio adecuado entre fluidez, compactibilidad y estabilidad química. Son ampliamente empleados en metalurgia de polvos, electrónica e impresión 3D metálica.

Polvos gruesos (> 100 μm): Se caracterizan por una menor área superficial y mayor fluidez, lo que los hace adecuados para aplicaciones donde se requiere un control eficiente del flujo del polvo, aunque con menor reactividad superficial.

Esta clasificación permite comprender por qué los polvos nanométricos, aunque menos comunes a nivel industrial, poseen aplicaciones específicas distintas a las de los polvos micrométricos tradicionales.

b) Según Morfología De Partícula.

La morfología de los polvos de cobre está estrechamente relacionada con el método de producción y tiene un impacto directo en la densidad aparente, la fluidez y la compactación del material. Las formas más comunes son:

Esférica: Característica de la atomización con gas. Favorece la alta fluidez y empaquetamiento homogéneo, siendo ideal para impresión 3D y moldeo por inyección de metal (MIM).

Ramificada o dendrítica: Propia de los polvos obtenidos por electrólisis. Presenta gran área superficial y excelente adherencia, lo que la hace adecuada para tintas conductoras y aplicaciones electrónicas.

Irregular: Asociada a procesos de reducción química y rectificado mecánico. Esta morfología incrementa la fricción entre partículas y es útil en aplicaciones como catalizadores, lubricantes y materiales de fricción.

2.2.4. Electroquímica

La electroquímica desempeña un papel importante en una amplia gama de procesos industriales, particularmente en la obtención de metales de gran relevancia económica y técnica, tales como el cobre, el zinc, el aluminio, el magnesio, la plata y otros. Estos metales se extraen mediante procesos electrolíticos que pueden emplear soluciones acuosas o electrolitos en estado fundido, dependiendo de las propiedades del material y las condiciones requeridas. Además, algunos de estos metales, como el cobre y la plata, el níquel y el plomo, pueden someterse a procesos de refinación electrolítica para mejorar su pureza y calidad, lo que es esencial en aplicaciones industriales de alta precisión.

Los procedimientos electrolíticos se llevan a cabo en dos contextos principales: a temperatura ambiente, utilizando electrolitos acuosos que suelen ser de naturaleza ácida, o a temperaturas elevadas, recurriendo a la electrólisis de sales fundidas (también conocida como electrólisis ígnea), en la cual se emplean electrolitos fundidos sin presencia de agua. Aunque los principios fundamentales que rigen ambos tipos de electrólisis son esencialmente idénticos, las diferencias prácticas emergen debido a la

naturaleza del electrolito utilizado. En el caso de los electrolitos fundidos, su mayor resistencia eléctrica provoca que el paso de la corriente genere un calentamiento significativo por efecto Joule, lo que produce suficiente calor para mantener el electrolito en estado líquido durante el proceso. Por ejemplo, este fenómeno es especialmente útil en la extracción de metales como el aluminio, que requiere altas temperaturas para la reducción de su óxido (Al_2O_3) en el proceso Hall-Héroult.

Cabe indicar que, la electroquímica se centra en explorar la interacción entre las reacciones químicas y la electricidad, y se centra en dos grandes áreas de estudio: La primera abarca el comportamiento de los iones en solución y la conductividad eléctrica de los electrolitos, analizando cómo las especies cargadas facilitan el transporte de corriente. La segunda se ocupa de la producción de electricidad a partir de reacciones químicas específicas, como ocurre en las celdas galvánicas, aunque en términos prácticos cobra mayor relevancia el fenómeno inverso: la inducción de reacciones químicas mediante la aplicación de corriente eléctrica, es decir, la electrólisis. Este último aspecto es clave en la producción y refinación de metales, ya que permite controlar con precisión las condiciones de reacción para optimizar los rendimientos.

Según Chang, R., y College, W. (2008), "la electrólisis no solo permite la extracción de metales a partir de sus minerales, sino que también es esencial en la purificación de metales para aplicaciones donde se requiere una conductividad eléctrica o resistencia a la corrosión excepcionales"(p.832). Este principio se extiende a otros metales y subraya la importancia de la electroquímica en la ingeniería moderna.

2.2.4.1. Ley De Ohm

Ohm nos permite comprender, de una manera sencilla pero profunda, cómo se comporta la energía eléctrica dentro de un circuito. Esta ley resulta esencial en las celdas electrolíticas, pues explica cómo la diferencia de potencial aplicada entre los electrodos genera el movimiento de la corriente a través del electrolito, dependiendo de la resistencia del material conductor, y se representa matemáticamente mediante la ecuación (2.1). Este flujo de corriente no ocurre de manera arbitraria; está condicionado por la resistencia propia del sistema, la cual depende de las características del electrolito, la geometría de los electrodos y la distancia entre ellos.

$$V = I \cdot R \quad (2.1)$$

Donde:

V: Potencial eléctrico (Voltios)

I: Intensidad de corriente (A)

R: Resistencia (Ω)

El potencial eléctrico, comúnmente denominado voltaje, se define como la variación de energía eléctrica por cada unidad de carga entre dos puntos dentro de un circuito. Expresado en voltios (V), simboliza la fuerza que motiva el desplazamiento de electrones o iones. Según Serway y Jewett (2018) “el potencial eléctrico en un punto dado en un campo eléctrico es el trabajo por unidad de carga requerido para mover una carga desde un punto de referencia (usualmente el infinito) hasta ese punto, sin acelerarla” (p.637).

La intensidad de corriente representa la cantidad de carga eléctrica que circula a través de un conductor en un intervalo de tiempo determinado, medida en amperios (A). Serway y Jewett (2018) explican que, “la corriente se define como $I = \frac{dQ}{dt}$, donde Q es la carga que pasa por una sección transversal en el tiempo t. En soluciones electrolíticas, los iones positivos y negativos transportan la corriente en direcciones opuestas” (p.692).

La resistencia es la propiedad que dificulta el paso de la corriente eléctrica, cuantificada en ohmios (Ω). Su valor está condicionado por el tipo de material utilizado y por su forma o estructura geométrica. Serway y Jewett (2018) indican que, “la resistencia de un conductor es $R = \frac{\rho L}{A}$, donde ρ es la resistencia, L la longitud y A el área transversal” (p.694). En una celda electrolítica, incluye la resistividad del electrolito y las interfaces.

2.2.5. Fundamentos Termodinámicos

2.2.5.1. Potencial Electrodo

El potencial de electrodo (E°), también conocido como potencial de reducción se expresa en voltios (V) y es esencial para comprender el comportamiento de una celda electroquímica, ya que cumple la función de medir la tendencia de un electrodo a ganar o perder electrones en una reacción de

oxidación – reducción (redox), y su cálculo dependerá de la naturaleza del material del electrodo, la concentración de los iones en la solución y la temperatura del sistema, así como también que dicho valor no será constante, porque varía según las condiciones del sistema.

Este potencial no es un valor rígido; por el contrario, es sensible a las condiciones reales del sistema. La naturaleza del material del electrodo, la concentración de los iones metálicos en la solución y la temperatura de operación influyen de manera directa en su magnitud. Esta variabilidad refleja el carácter dinámico del sistema electroquímico, donde pequeños cambios pueden modificar el equilibrio y, con ello, el rendimiento del proceso.

Al introducir un electrodo metálico en una solución con sus propios iones, se crea un equilibrio dinámico entre el metal y los iones presentes en el líquido, este intercambio continuo de electrones da origen a una diferencia de potencial eléctrico en la interface electrodo–solución. Según señalan Atkins, P., y De Paula, J. (2010), "el potencial de electrodo es una medida de la diferencia de potencial eléctrico entre el electrodo y la solución en la que está sumergido" (p. 876).

2.2.5.2. Energía Libre De Gibbs

Gibbs (ΔG) es una variable termodinámica que permite comprender, desde un punto de vista energético, si un proceso puede ocurrir y en qué condiciones. Representa la energía disponible de un sistema para realizar trabajo útil cuando la temperatura y la presión se mantienen constantes. En electroquímica, este concepto adquiere un valor especial, pues conecta el comportamiento termodinámico de las reacciones de oxidación–reducción con el voltaje real de la celda electrolítica. Atkins y De Paula mencionan que, “una reacción es espontánea si $\Delta G < 0$, no espontánea si $\Delta G > 0$ y en equilibrio si $\Delta G = 0$ ” (p. 212), este principio no solo orienta el análisis teórico, sino que también da sentido a los resultados experimentales obtenidos durante la operación de la celda tipo vórtice. Y se define mediante la ecuación (2.2).

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (2.2)$$

Donde:

ΔH : Cambio de entalpia (Calor absorbido o liberado)

T: Temperatura (K)

ΔS : Cambio de entropía (Desorden del sistema)

En electroquímica, la energía libre de Gibbs está relacionada directamente con el potencial de la celda, estableciendo un puente claro entre la energía y el comportamiento real de las reacciones electroquímicas. Esta relación permite comprender si un proceso puede avanzar por sí mismo o si requiere un aporte externo de energía para llevarse a cabo.

Atkins y De Paula (2010) explican que "esta relación muestra que un potencial de celda positivo corresponde a una disminución de la energía libre, indicando una reacción espontánea" (p. 884). En otras palabras, cuando el potencial de la celda es favorable, el sistema avanza de manera natural hacia la transformación electroquímica, liberando energía y permitiendo que el proceso ocurra sin resistencia. Sin embargo, cuando el potencial de la celda es menor que cero y la energía libre de Gibbs toma valores positivos ($E_{celda} < 0$; $\Delta G > 0$), la reacción deja de ser espontánea y requiere necesariamente la aplicación de un potencial externo para poder desarrollarse. Esto se define mediante la ecuación (2.3).

$$\Delta G = -nFE_{celda} \quad (2.3)$$

Donde:

n : Numero de moles (mol)

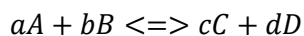
F : Constante de Faraday (96 485 C/mol)

E : Potencial de la celda (Voltios)

2.2.5.3. Ecuación De Nernst

Nernst nos permite comprender como el potencial de un electrodo o de la celda electroquímica no es un valor fijo, sino una magnitud viva que responde a las condiciones reales del sistema. A diferencia del potencial estándar, definido para una concentración de 1 M y una temperatura de 25 °C. Este se representa mediante la ecuación (2.4), que se deriva de la relación entre la energía libre y el cociente de reacción.

Para una reacción general:



Donde, $Q = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b}$

Ahora utilizamos la ecuación de Gibbs y sustituimos

$$E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad (2.4)$$

Donde:

E : Potencial de reducción

E° : Potencial estándar

Q : Cociente de reacción

R : Constante de gases universal

T : Temperatura

F : constante de Faraday (96485 C/mol)

n : Numero de moles (mol)

2.2.6. Fundamentos Electroquímicos

2.2.6.1. Capa De Difusión De Nernst Y Transporte De Masa

La velocidad de electrodeposición está limitada frecuentemente por la difusión de iones a través de la capa límite de Nernst (δ). La teoría de la capa límite establece que el espesor de esta capa es inversamente proporcional a la velocidad del fluido (Newman, J. & Thomas-Alyea, 2012). Para cuantificar la transferencia de masa, se utiliza el número adimensional de Sherwood (Sh), definido por la ecuación 2.5, el cual correlaciona el transporte convectivo con el difusivo. En celdas de flujo turbulento tipo vórtice, la correlación de Chilton-Colburn modificada suele emplearse para estimar el coeficiente de transferencia de masa (k):

$$Sh = a \cdot Re^b \cdot Sc^b \quad (2.5)$$

Donde Sc es el Número de Schmidt, que relaciona la viscosidad cinemática con el coeficiente de difusión del ion metálico (Pletcher & Walsh, 1990).

2.2.6.2. Teoría De Electro cristalización De Polvos Metálicos

La morfología del depósito de cobre (liso, nodular o dendrítico) está gobernada por la relación entre la densidad de corriente aplicada (j) y la densidad de corriente límite difusional (i_L).

a) Densidad De Corriente Límite (i_L)

El corriente límite representa la velocidad máxima de reacción permitida por el transporte de masa antes de que la concentración de iones en la superficie del cátodo descienda a cero. Se define mediante la ecuación 2.6.

$$i_L = n \cdot F \cdot k_m \cdot C_b \quad (2.6)$$

Donde:

n es el número de electrones

F la constante de Faraday

C_b la concentración en el seno de la solución.

b) Criterio de Formación de Dendritas

Para la obtención de polvos metálicos, es necesario operar en condiciones donde el transporte de masa sea el paso controlante. Según la teoría fundamental de deposición de polvos establecida por Ibl, N. (1980) y profundizada por Popov, K. I. (2002), la formación de crecimientos dendríticos (polvos) ocurre cuando la densidad de corriente aplicada excede a la densidad de corriente límite, o se acerca significativamente a ella. El factor de deposición (j/i_L) es el indicador crítico de diseño; valores de $j/i_L > 1$ garantizan una nucleación rápida y crecimiento dendrítico inestable, características esenciales para la producción de polvos finos.

2.2.6.3. Reacciones De Oxidación Y Reducción

Las reacciones de oxidación y reducción, denominadas reacciones redox, corresponden a procesos electroquímicos en los cuales se produce la transferencia de electrones entre especies químicas, como resultado del cambio en sus estados de oxidación. Estas reacciones son cruciales para sustentar todos los fenómenos que ocurren en las celdas galvánicas y electrolíticas, desde la generación de electricidad hasta la síntesis de compuestos químicos.



La oxidación (2.7) implica la pérdida de electrones por parte de un elemento, mientras que la reducción (2.8) implica la ganancia de electrones, y este fenómeno ocurre simultáneamente durante la reacción redox. Del mismo modo Atkins y De Paula (2010) explica que "en una reacción redox, el oxidante es la especie que acepta electrones y se reduce, mientras que el reductor es la especie que dona electrones y se oxida" (p. 870).

Así mismo las reacciones redox poseen implicaciones cinéticas y termodinámicas.

Termodinámicamente, la espontaneidad de una reacción redox está relacionada con la energía libre de Gibbs. Y cinéticamente, la velocidad de estas reacciones depende de factores como la concentración de reactivos, la temperatura y el potencial aplicado en el electrodo. En sistemas electroquímicos, la cinética se complica por la necesidad de que los electrones se transfieran a través de la interfaz electrodo-electrolito, un proceso que puede ser rápido (reversible) o lento (irreversible) según la barrera de activación. Bard y Faulkner (2001) explican que "la velocidad de una reacción redox en un electrodo está influenciada por la estructura electrónica de las especies reactivas y las propiedades del electrodo" (p. 88).

2.2.6.4. Ley De Faraday

La Ley de Faraday, desarrollada por Michael Faraday durante la década de 1830, indica que la masa de sustancia depositada en un electrodo guarda una proporción directa con la carga eléctrica que atraviesa el electrolito. Este principio es fundamental en los procesos electrometalúrgicos, ya que determina la cantidad de cobre que puede ser depositada en el cátodo durante el proceso electrolítico.

La ley de Faraday se divide en dos, de las cuales una se basa en la conservación de la carga y otra en la estequiometría de las reacciones redox. Según Atkins, P., y De Paula, J. (2010), "las leyes de Faraday son un puente entre la electricidad y la química, permitiendo cuantificar cómo la corriente eléctrica impulsa transformaciones materiales en un sistema electroquímico" (p.873). Conexión que

explica su enorme relevancia no solo en el ámbito académico, sino también en procesos industriales como la electrodeposición, la refinación de metales y la producción de sustancias químicas.

Según la primera ley de Faraday, la cantidad de material que se deposita o se disuelve en un electrodo durante la electrólisis depende directamente de la carga eléctrica que ha circulado por el sistema. Expresado por la ecuación 2.9, permite estimar de manera directa la cantidad de cobre que puede recuperarse bajo determinadas condiciones de corriente y tiempo de operación.

$$m = \frac{I \cdot t \cdot M}{n \cdot F} \quad (2.9)$$

Donde:

m: masa del metal depositado (g).

I: Intensidad de corriente (A).

t: tiempo de electrodeposición (s).

M: masa molar del metal (g/mol).

n: número de electrones transferidos.

F: constante de Faraday (96485 C/mol)

2.2.6.5. Cinética Electroquímica

La cinética de las reacciones electroquímicas es importante para entender la eficiencia de la deposición de cobre en una celda electrolítica. Factores como la concentración de iones, la temperatura y el potencial eléctrico aplicado afectan la velocidad de la reacción y, por lo tanto, la tasa de formación de cobre en el cátodo. Sin embargo, se centra especialmente en la velocidad de las reacciones electroquímicas, específicamente en la transferencia de electrones entre un electrodo y un electrolito. Aspecto crucial que nos permite entender cómo se comportan los sistemas electrolíticos, donde el ánodo se oxida y el cátodo se reduce. Bard y Faulkner (2001), reafirman en su libro que “la cinética de las reacciones en electrodos implica el estudio de las velocidades a las que ocurren estos procesos y los factores que controlan esas velocidades” (p.87), afirmación que resalta la importancia de analizar la interfaz electrodo – electrolito en un proceso electroquímico.

Bard y Faulkner (2001), comenta que en este proceso: “las reacciones en electrodos suelen implicar la transferencia de electrones entre un electrodo y una especie en solución, a menudo requiriendo el transporte de esa especie hacia o desde la superficie del electrodo” (p.3). Así mismo mencionan que la cinética electroquímica involucra tres etapas:

- **Transporte de reactivos:** El transporte de los iones metálicos que llegan al electrodo por difusión, convección o migración.
- **Transferencia de electrones:** Proceso de oxidación o reducción de los electrodos.
- **Transporte del producto:** El distanciamiento entre los iones metálicos y los electrodos.

La cinética electroquímica está influenciada por diversos elementos. Uno de los más relevantes es el sobrepotencial (η), energía adicional que empuja la reacción fuera de su estado de equilibrio, funcionando como un motor para el proceso. Bard y Faulkner (2001) define "el sobrepotencial, η , como la diferencia entre el potencial aplicado y el potencial de equilibrio" (p.94). Este factor se entrelaza con la concentración del electrolito, ya que un aumento en la cantidad de CuSO_4 disuelto eleva la disponibilidad de iones Cu^{2+} , acelerando la reacción al facilitar su acceso a las superficies de los electrodos. Chang, R., y College, W. (2008) destacan del mismo modo que, "la velocidad de una reacción electroquímica depende de las concentraciones de los reactivos en la superficie del electrodo".

Además, las características propias de los electrodos desempeñan un papel importante. Mientras que el cobre, gracias a su alta conductividad, permite una transferencia rápida de los electrones, el acero inoxidable, puede llegar a ralentizar el proceso debido a su naturaleza pasivada. Bard y Faulkner (2001) explican en su libro que, “la naturaleza de la superficie del electrodo puede tener un efecto profundo en la cinética de la transferencia de electrones”. A esto se suma el efecto de la temperatura, que al incrementarse mejora la movilidad de los iones en el electrolito, potenciando la difusión y, por ende, la velocidad de las reacciones en tu sistema. Chang, R., y College, W. (2008) lo reafirman “un aumento en la temperatura incrementa la velocidad de la mayoría de las reacciones”.

Sin embargo, todo este proceso dinámico puede llegar a verse limitado por la transferencia de masa; si la difusión de Cu^{2+} hacia el cátodo o desde el ánodo es demasiado lenta, la reacción es frenada,

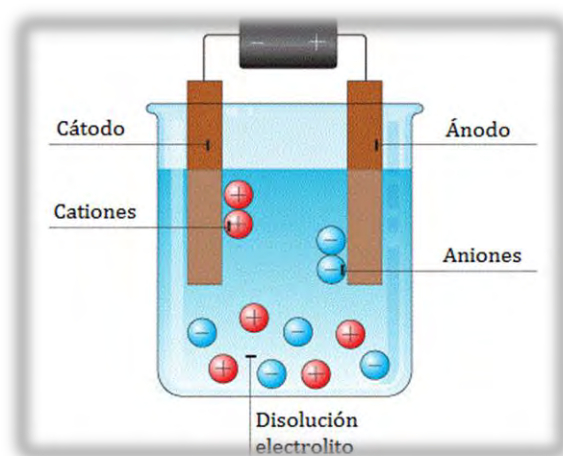
independientemente de otros factores. Bard y Faulkner (2001) lo puntualizan: “el transporte de masa puede volverse limitante cuando su velocidad es menor que la de la transferencia de electrones” (p. 88).

2.2.7. Celda Electrolítica

Las celdas electrolíticas son dispositivos electroquímicos diseñados para realizar procesos de electrólisis (Figura 3), donde una fuente externa de energía eléctrica impulsa reacciones de oxidación-reducción no espontáneas, caracterizadas por un cambio de energía libre ($\Delta G > 0$). Estas celdas constan de un ánodo, donde ocurre la oxidación, un cátodo, donde tiene lugar la reducción, y un electrolito, que puede ser una solución acuosa, un líquido iónico o una sal fundida, encargado de facilitar el transporte de iones entre los electrodos. La corriente eléctrica aplicada genera reacciones específicas, como la reducción de iones metálicos ($\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$) para depositar metales de alta pureza en el cátodo o la descomposición de compuestos iónicos en el electrolito, como en la electrólisis de cloruros para producir cloro gaseoso. (Ballester, Verdeja, & Sancho, 2000)

El principio de funcionamiento de las celdas electrolíticas se basa en la transferencia de electrones a través de un circuito externo y el movimiento de iones en el electrolito, regulados por la ley de Faraday, que establece que la cantidad de sustancia transformada en los electrodos es proporcional a la carga eléctrica transferida. Proceso fundamental en aplicaciones industriales, como la electroobtención y electrefinación de metales, aunque los diseños tradicionales presentan limitaciones en su eficiencia. La polarización de concentración, causada por la acumulación o depleción de iones cerca de los electrodos, reduce la velocidad de reacción y puede incrementar el potencial requerido hasta en un 20 % en sistemas mal agitados. Asimismo, las pérdidas energéticas, derivadas de la resistencia óhmica del electrolito y la corrosión de los electrodos, disminuyen los rendimientos energéticos a un rango típico de 65–80 % en celdas convencionales.

En este contexto, la celda electrolítica tipo vórtice emerge como una solución innovadora que optimiza el transporte de masa mediante un flujo vorticial, reduciendo la polarización de concentración y mejorando la eficiencia energética hasta en un 10–15 % en comparación con celdas estándar Wang, et al. (2022). Este diseño es particularmente relevante para la producción de polvos de cobre de alta pureza (>99.9 %), cuya morfología y tamaño pueden controlarse con precisión.

Figura 3*Celda electrolítica*

Nota: Se muestra la imagen referencial de una celda electrolítica. Tomado de: (Gutierrez C., 2023)

2.2.7.1. Componentes De La Celda Electrolítica

Las partes de una celda electrolítica tipo vórtice incluyen el ánodo, cátodo, bomba, rectificador, así como se muestra en la Figura 4. El ánodo es donde ocurre la oxidación del metal, mientras que en el cátodo se produce la reducción y deposición del cobre. El electrolito, compuesto generalmente por una solución de sulfato de cobre, facilita la transferencia de iones cobre (Cu^{2+}) entre los electrodos. Además, en las celdas de tipo vórtice, se requiere un sistema adicional que induzca el movimiento del electrolito, generando el efecto de vórtice.

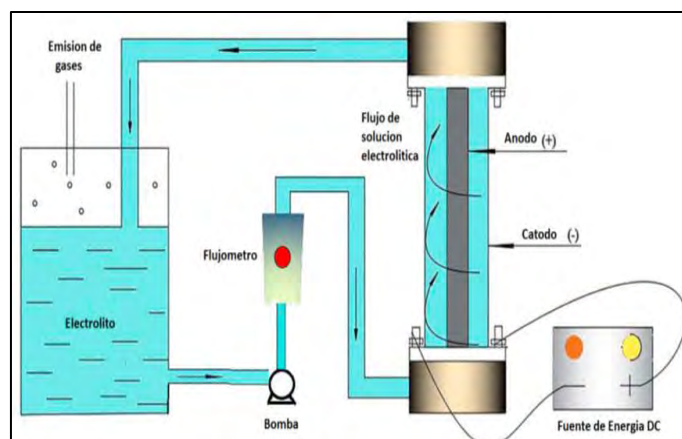
A continuación, describiremos los elementos clave que componen una celda electrolítica, cada uno con un rol específico en el proceso de electrólisis.

a) Electrolito.

Es la solución o medio iónico que permite la conducción de electricidad mediante el movimiento de iones. Puede ser una sal fundida o una solución acuosa, como sulfato de cobre en procesos hidrometalúrgicos (Ballester, Verdeja, & Sancho, 2000). La composición del electrolito es crítica para controlar la calidad y uniformidad de los depósitos metálicos, ya que actúa como medio conductor que facilita el transporte de iones entre el ánodo y el cátodo, permitiendo el desarrollo de las reacciones de oxidación-reducción.

Figura 4

Partes de una celda electrolítica tipo vórtice



Nota: En la imagen se muestra las partes y equipo de una celda electrolítica tipo vórtice. Tomado de: (Gutierrez C., 2023)

b) Fuente De Alimentación.

Proporciona la energía eléctrica necesaria para superar la barrera energética de las reacciones no espontáneas. Generalmente es una fuente de corriente continua, una imagen referencia del equipo se muestra en la Figura 5. Este componente es crucial para controlar la cinética de las reacciones electroquímicas y garantizar la estabilidad del proceso, evitando sobrecalentamientos o fluctuaciones que puedan afectar la calidad de los depósitos metálicos.

c) Reactor Electrolítico.

Es el recipiente donde ocurre la electrólisis, diseñado para resistir condiciones químicas agresivas, con geometrías que pueden incluir entradas tangenciales para flujo vorticial en diseños avanzados. Su función crucial es contener las reacciones de oxidación-reducción, manteniendo una distribución uniforme de la corriente eléctrica y minimizando gradientes de concentración.

Reactor generalmente construido en materiales resistentes a la corrosión como polímeros de alta densidad (polipropileno) o vidrio borosilicato, proporciona un entorno robusto que soporta las condiciones químicas agresivas del electrolito, como soluciones ácidas de sulfato de cobre (CuSO_4) con pH de 1–2. Su diseño cilíndrico o cónico favorece la generación de un flujo vorticial, inducido por un

sistema hidráulico (bomba o impulsor), que optimiza la mezcla del electrolito y mejora el transporte de iones hacia los electrodos.

Figura 5

Fuente de alimentación



Nota: En la imagen se muestra una fuente de alimentación o fuente de laboratorio que permite transformar y rectificar la corriente alterna. Tomado de: (Gómez, 2022)

d) Electrodos.

Conductores metálicos sumergidos en el electrolito. El ánodo, usualmente fabricado de materiales resistentes a la corrosión como grafito o titanio recubierto de óxidos metálicos, es el electrodo donde ocurre la reacción de oxidación. En el contexto de la electroobtención de metales, el ánodo facilita la liberación de electrones, oxidando especies presentes en el electrolito, como el agua ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$) o iones metálicos de sacrificio, dependiendo del sistema. Este componente debe soportar altas densidades de corriente ($200\text{--}500 \text{ A/m}^2$) para garantizar un proceso eficiente. El cátodo, usualmente de cobre, acero inoxidable u otro material conductor, es el sitio donde ocurre la reducción, permitiendo la deposición de iones metálicos en forma de metal puro. En la celda tipo vórtice, la reacción típica implica la reducción de iones de cobre ($\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$), formando depósitos metálicos con purezas superiores al 99.9 %. La morfología de los depósitos, que puede variar desde estructuras dendríticas hasta partículas finas, depende de parámetros como la densidad de corriente y la agitación del electrolito. Además, en el capítulo 3, según Nasirpouri, F. (2016), se explica cómo la selección del material de los electrodos afecta la eficiencia y la selectividad de la electrólisis.

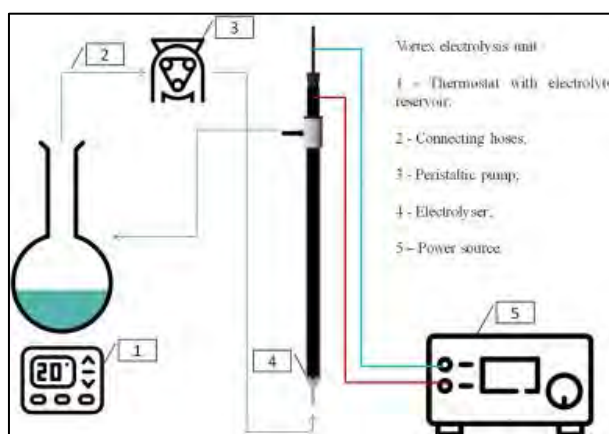
2.2.7.2. Celda Electrolítica Tipo Vórtice

Las celdas electrolíticas tipo vórtice o ciclónica (Figura 6), representa una innovación significativa en el campo de la electroquímica, específicamente en procesos como la electrodeposición y la electrorefinación. Distinguiéndose por incorporan principios de dinámica de fluidos al generar un flujo ciclónico controlado del electrolito mediante sistemas hidráulicos o mecánicos. Este movimiento no solo renueva constantemente la solución electrolítica, sino que transforma profundamente la interacción entre el electrolito y la superficie del electrodo, optimizando de forma significativa la transferencia de masa iónica. (JXSC Machine., 2024).

Desde el punto de vista técnico, el flujo ciclónico disminuye la polarización por concentración en la interfaz electrodo-electrolito, al promover una renovación constante de la capa límite. Gracias a ello, los iones metálicos, en particular los iones Cu^{2+} , llegan al cátodo de manera más rápida y uniforme, lo que acelera la cinética de la reducción electroquímica. Esta ventaja permite operar con éxito incluso con soluciones de baja concentración, superando uno de los principales obstáculos de los sistemas electrolíticos convencionales (JXSC Machine., 2024).

Figura 6

Celda electrolítica tipo vórtice



Nota: En la imagen se muestra como es el diseño de una celda electrolítica tipo vórtice construida para obtención de polvos de cobre. Tomado de Shokobayev et al. (2022)

Pero los beneficios de las celdas de tipo vórtice van mucho más allá de la mera eficiencia operativa. El movimiento ciclónico distribuye los iones de forma homogénea sobre la superficie del

electrodo, dando lugar a depósitos metálicos más densos, compactos y uniformes. Este aspecto cobra especial importancia en la producción de polvos de cobre, donde la morfología, la pureza y la homogeneidad del producto final son determinantes para su rendimiento en aplicaciones industriales de alto valor Shokobayev et al. (2022)

2.2.7.3. Parámetros Operacionales

Aquí se analizan factores como la velocidad del flujo, la concentración del electrolito, la temperatura y el voltaje aplicado. Estos parámetros determinan la eficiencia de la transferencia de masa y la tasa de reacción en la celda.

a) Densidad De Corriente.

La densidad de corriente, expresada en amperios por metro cuadrado (A/m^2), es un parámetro determinante en la electrodeposición, ya que regula la velocidad y la calidad del depósito metálico al controlar la cantidad de corriente eléctrica que atraviesa el electrolito. Según Shokobayev et al. (2022), en una celda tipo vórtice para obtener polvos de cobre, la densidad de corriente óptima se estableció en 150 mA/cm^2 (equivalente a 1500 A/m^2), logrando una eficiencia de corriente del 95.5% y partículas de $5\text{-}10 \text{ }\mu\text{m}$, como se observa en la Figura 7.

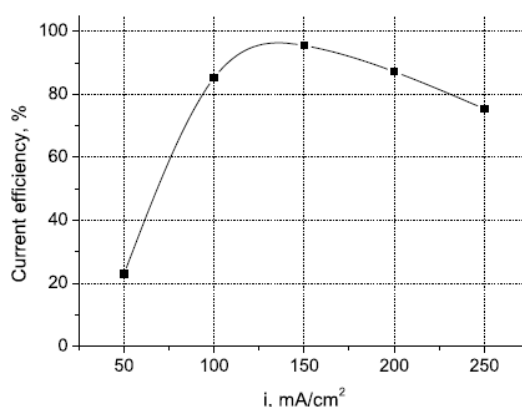
Una densidad alta acelera la deposición, pero si excede el valor límite, puede inducir defectos como dendritas o porosidad debido a la inestabilidad en la interfaz electrodo-electrolito.

b) Concentración Del Electrolito.

La composición y concentración del electrolito son esenciales para la disponibilidad de iones metálicos y la eficiencia del proceso. Shokobayev et al. (2022) determinaron que una concentración de Cu^{2+} de 10 g/L , combinada con 100 g/L de H_2SO_4 y 7 g/L de ácido nitrilotrimetilfosfónico (NTP), maximiza la eficiencia de corriente al 95.5%. Un aumento en la concentración de Cu^{2+} mejora la conductividad y la densidad de corriente límite, pero concentraciones elevadas incrementan el tamaño de las partículas y reducen la dispersión (Figura 8). Esto resalta la necesidad de un equilibrio para evitar reacciones secundarias o depósitos no deseados.

Figura 7

Gráfico de eficiencia del proceso vs densidad de corrientes



Nota: En la imagen se muestra el rango de densidades de corriente de 50 a 250 mA/cm², encontrándose que la eficiencia de corriente para la obtención de cobre tiene un máximo de 150 mA/cm² con una eficiencia de 95.5%. Tomado de Shokobayev et al. (2022).

c) Temperatura.

La temperatura influye en la cinética de las reacciones electroquímicas y la solubilidad del electrolito. Shokobayev et al. (2022) encontraron que a 40 °C se obtiene la mayor eficiencia de corriente (95.5%) y alta dispersión de polvos de cobre, mientras que a 60 °C las partículas crecen debido a una menor depleción de iones cerca del electrodo. Temperaturas altas aceleran la deposición al aumentar la energía cinética, pero pueden degradar aditivos o generar burbujas, afectando la estabilidad. A bajas temperaturas, la uniformidad mejora, aunque la viscosidad del electrolito aumenta, ralentizando el proceso, como se detalla en la Figura 9.

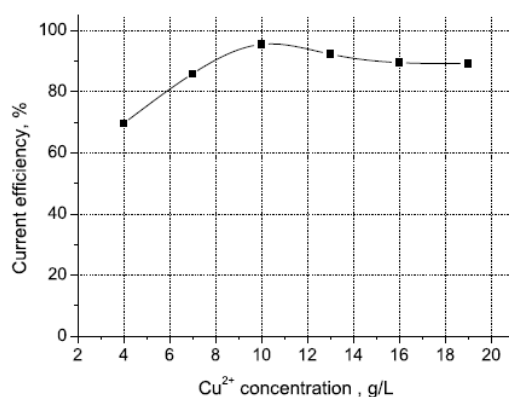
d) Tiempo.

El tiempo de electrodeposición afecta el espesor y la calidad del depósito. Shokobayev et al. (2022) realizaron experimentos de 13.3 a 73 minutos según la densidad de corriente, y en una prueba de 2.5 horas lograron 27.9 g de polvo con 90.3% de eficiencia.

Tiempos cortos pueden dejar depósitos incompletos, mientras que tiempos prolongados, aunque aumentan la cantidad, pueden generar granos más grandes o defectos si el electrolito se agota, requiriendo un equilibrio óptimo.

Figura 8

Gráfico de eficiencia del proceso vs concentración del electrolito



Nota: En la imagen se muestra el rango de concentración de 4 a 19 g/L, encontrándose que la eficiencia de corriente para la obtención de cobre tiene un máximo de 150 mA/cm² con una concentración de 10g/L. Tomado de Shokobayev et al. (2022).

e) Caudal.

El caudal del electrolito en celdas tipo vórtice es crucial para generar y mantener el flujo vorticial, mejorando la transferencia de masa. Shokobayev et al. (2022) usaron un caudal de 1,2 L/min, asegurando una mezcla intensiva que evita la depleción de iones cerca del cátodo y favorece los polvos finos. Un caudal insuficiente reduce la homogeneidad, mientras que uno óptimo renueva el electrolito, minimiza los productos secundarios y estabiliza la densidad de corriente.

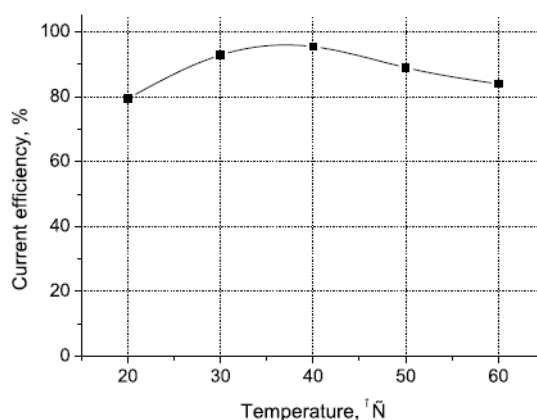
2.2.7.4. Geometría Y Diseño Del Reactor Electrolítico

La forma y configuración del reactor son cruciales para generar el flujo vorticial y mejorar el contacto entre el electrolito y los electrodos. Según Shokobayev, et al. (2022), los diseños avanzados de reactores electrolíticos buscan maximizar la turbulencia controlada, capaz de mejorar la eficiencia del proceso sin comprometer la estabilidad.

El movimiento vorticial dentro del reactor se induce y se mantiene principalmente a través de la geometría del recipiente y de la disposición de los elementos internos. Esta configuración permite que el electrolito siga trayectorias circulares bien definidas, favoreciendo una mezcla más homogénea y reduciendo la formación de gradientes de concentración cerca de los electrodos.

Figura 9

Gráfico de eficiencia del proceso vs temperatura



Nota: En la imagen se muestra el diagrama eficiencia del proceso vs temperatura, donde se tiene un rango de temperatura de 20 a 60 °C, encontrándose que la eficiencia de corriente para la obtención de cobre tiene un máximo de 150 mA/cm² con una temperatura de 40 °C. Tomado de Shokobayev et al. (2022).

Para inducir el movimiento circular del electrolito, se usa boquillas tangenciales, ubicadas en las paredes de la celda, en un ángulo adecuado de 20 a 30 grados respecto a la tangente de la pared del recipiente, logrando así asegurar que el electrolito siga un patrón circular uniforme, sin generar turbulencias excesivas.

Adicionalmente es necesario considerar cuidadosamente el espesor de las paredes del recipiente, el cual debe ser lo suficientemente resistente a la presión generada por los fluidos en movimiento, así como las fuerzas ejercidas durante el proceso. Sin embargo, para determinar este valor, es necesario analizar varios factores como el material, presión del electrolito, la altura y diámetro del recipiente.

2.2.7.5. Distancia Entre Electrodo

La distancia entre los electrodos influye en la resistencia del electrolito, el campo eléctrico, y la eficiencia de la transferencia de masa. En las celdas electrolíticas, reducir esta distancia puede disminuir la resistencia interna y mejorar la eficiencia del proceso. Sin embargo, es esencial equilibrar esta reducción con la necesidad de mantener el flujo adecuado del electrolito.

En el caso de la obtención de polvos de cobre a partir de una celda tipo vórtice, esta relación debe ser especialmente cuidadosamente calculada para maximizar la transferencia de masa y asegurar la deposición del cobre. Además, esta disposición tiene un impacto directo en la eficiencia energética, la calidad del producto y la minimización de problemas como la formación de depósitos irregulares o la evolución de gases indeseables.

Las referencias bibliográficas mencionan que una celda electrolítica tipo vórtice, la distancia debe estar en el rango de 2 a 5 cm. Esta separación asegura que se mantenga una resistencia controlada, permitiendo que la densidad de corriente se distribuya de manera eficiente sin generar sobrecalentamientos o disfunciones en el proceso.

2.2.7.6. Geometría De Los Electrodo

La geometría de los electrodos es fundamental para inducir y mantener un flujo turbulento y la formación del vórtice. Los electrodos con formas cilíndricas o helicoidales están diseñados específicamente para generar un movimiento que favorece la creación del vórtice dentro de la celda. Esta configuración no solo facilita una mezcla homogénea del electrolito, sino que también maximiza la superficie activa del electrodo, optimizando la transferencia de masa y la eficiencia del proceso electroquímico.

La elección de la geometría del electrodo ya sea cilíndrica, plana o adaptada específicamente, influye directamente en la calidad del depósito. La superficie del electrodo debe estar configurada para minimizar la formación de puntos calientes y optimizar la distribución del campo eléctrico. Esto ayuda a asegurar una deposición uniforme y de alta calidad al reducir las irregularidades y mejorar la homogeneidad del depósito metálico.

La orientación de los electrodos también influye considerablemente en el comportamiento de la celda electrolítica. En una celda tipo vórtice, la disposición de los electrodos suele ser paralela, lo que ayuda a generar un campo eléctrico uniforme a lo largo de la superficie del cátodo y mejora la distribución del electrolito alrededor de los electrodos. Esta configuración paralela es especialmente importante en un proceso donde el electrolito debe fluir de manera continua y estable para evitar zonas

de acumulación o estancamiento. Además, para lograr un flujo eficiente, los electrodos deben estar alineados de forma tal que el vórtice formado favorezca la circulación uniforme del líquido.

El material y el diseño de las superficies de los electrodos también son factores clave en el rendimiento de la celda. El cátodo es el lugar donde se lleva a cabo la reducción de iones metálicos y la formación del cobre metálico. Para maximizar la eficiencia de la deposición, la superficie del cátodo debe ser amplia y presentar características que fomenten una distribución homogénea de la corriente. Algunas estrategias incluyen el uso de superficies rugosas, que incrementan el área de contacto y, por lo tanto, mejoran la eficiencia de la deposición.

En cuanto al ánodo, que es el sitio de la oxidación, en el caso de la electrodeposición de cobre, se utilizan ánodos solubles de cobre que aportan iones cúpricos (Cu^{2+}) al electrolito. Sin embargo, también se pueden utilizar ánodos inertes (grafito o platino) que no se consumen durante el proceso, lo que mantiene constante la concentración de cobre en el electrolito.

2.2.8. Fundamentos En Dinámica De Fluidos

Esta sección proporciona el marco teórico para entender el comportamiento del fluido en la celda tipo vórtice.

2.2.8.1. Flujo Y Turbulencia

El flujo del electrolito desempeña un papel crucial en las celdas electrolíticas al facilitar el transporte continuo de iones metálicos hacia los electrodos, un proceso que se ve potenciado por la dinámica del vórtice. Este fenómeno, caracterizado por el movimiento helicoidal o circular de partículas alrededor de un eje central, puede generarse mediante fuerzas centrífugas o la configuración geométrica del sistema, como ocurre en las celdas tipo vórtice (Eftekhari, 2003, pág. 2).

En las celdas tipo vórtice, se persigue una turbulencia controlada que optimiza la transferencia de masa, renovando constantemente el electrolito cerca de la superficie del electrodo y reduciendo la formación de capas entre este y el medio líquido. Este movimiento en espiral no solo acelera la cinética de deposición, sino que también mejora la calidad del recubrimiento metálico al evitar la acumulación de productos de reacción y garantizar una distribución homogénea de iones. Además, la turbulencia

inducida contribuye a una densidad de corriente más uniforme a lo largo del electrodo, lo que resulta en depósitos de espesor consistente y un control más preciso del tamaño de las partículas, aspectos esenciales para la obtención eficiente de polvos en este tipo de sistemas.

2.2.8.2. Régimen de Flujo y Número de Reynolds

En reactores electroquímicos de geometría cilíndrica, el comportamiento del fluido se caracteriza mediante el Número de Reynolds (Re). Un régimen turbulento es deseable en procesos de alta velocidad para minimizar el espesor de la capa de difusión. Según Walsh (1993), la turbulencia promueve la mezcla radial y mejora el suministro de iones al cátodo. Para flujos en espacios anulares con componentes rotacionales, el Reynolds se define considerando la velocidad resultante y el diámetro hidráulico (D_h), como se detalla en la ecuación 2.10.

$$Re_{base} = \frac{\rho \cdot v_t \cdot D_h}{\mu} \quad (2.10)$$

Donde:

ρ es la densidad del electrolito

v_t la velocidad del fluido

μ la viscosidad dinámica.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Alcance De Investigación

3.1.1. *Exploratorio - Descriptivo*

Según Sampieri y Mendoza (2023), una investigación de alcance exploratorio se orienta al estudio de fenómenos poco investigados o de carácter novedoso, con la finalidad de obtener una comprensión general del objeto de estudio y establecer bases conceptuales para investigaciones posteriores. Por su parte, el alcance descriptivo permite detallar las características, componentes y condiciones del fenómeno analizado, sin pretender establecer relaciones causales ni comprobar hipótesis estadísticas.

En la presente investigación, el alcance es exploratorio–descriptivo, debido a que se aborda el diseño y la construcción de una celda electrolítica tipo vórtice a nivel de laboratorio, un sistema cuya aplicación para la obtención de polvos metálicos presenta limitada documentación en el ámbito académico local. El estudio se centra en describir de manera técnica las características constructivas del sistema, la geometría del reactor, los materiales empleados, así como los criterios básicos de diseño eléctrico, electroquímico e hidráulico necesarios para su funcionamiento.

Asimismo, la investigación tiene como finalidad establecer una base técnica y conceptual que sirva como referencia para futuros trabajos orientados a la evaluación del desempeño electroquímico, la optimización de parámetros operativos o la comparación del sistema propuesto con celdas electrolíticas convencionales.

3.2. Diseño De Investigación

3.2.1. *No Experimental*

De acuerdo con Sampieri y Mendoza (2023), una investigación no experimental es aquella en la que las variables no son manipuladas deliberadamente con el propósito de analizar relaciones de causa–efecto, sino que se observan y describen conforme se presentan.

En este contexto, la presente investigación adopta un diseño no experimental, ya que no se busca modificar de forma sistemática variables electroquímicas tales como la densidad de corriente, el potencial eléctrico o la concentración del electrolito para evaluar su influencia en el proceso, ni realizar análisis estadísticos comparativos de desempeño. El trabajo se enfoca en el diseño conceptual, la construcción y la validación funcional de una celda electrolítica tipo vórtice, aplicando principios teóricos establecidos, criterios de ingeniería y condiciones operativas controladas a nivel de laboratorio.

La validación del equipo se realiza mediante la verificación de su operatividad, la estabilidad del flujo vorticial y el funcionamiento general del proceso de deposición electrolítica, sin intervenir experimentalmente sobre variables independientes, lo que corresponde a un enfoque propio de los proyectos de ingeniería aplicada y tecnológica.

CAPÍTULO IV

INGENIERÍA DEL PROYECTO

4.1. Investigación y Descubrimiento

La etapa de investigación y descubrimiento representó el verdadero punto de partida del presente proyecto, se comprendió la necesidad. Orientándonos al diseño y construcción de una celda electrolítica tipo vórtice de laboratorio para la obtención de polvos de cobre, iniciamos con la identificación de la carencia en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco: la ausencia de equipos especializados que permitieran fortalecer la enseñanza práctica, la investigación aplicada y el desarrollo tecnológico en las áreas de electrometalurgia y pulvimetalurgia.

Constatamos con cierta preocupación que, a pesar de la enorme relevancia del cobre en la economía peruana y del creciente potencial de los polvos metálicos en industrias de alto valor agregado (electrónica, automotriz, fabricación de componentes avanzados), nuestro laboratorio carecía de equipos adecuados para estudiar procesos de electrodeposición orientados a la producción de polvos. Esta limitación no solo restringía las oportunidades de investigación e innovación, sino que también afectaba directamente la formación integral de los estudiantes, impidiéndonos generar conocimiento aplicable al aprovechamiento más eficiente de nuestros recursos minerales.

Motivados por esta realidad, realizamos una exhaustiva revisión bibliográfica de antecedentes nacionales e internacionales sobre tecnologías de electrodeposición ciclónica y celdas tipo vórtice. Los estudios consultados Shokobayev et al. (2022), Wang et al. (2022), Xu & Wei (2020) demostraron consistentemente que los sistemas con flujo vorticial ofrecen ventajas significativas respecto a las celdas convencionales: mayor transferencia de masa, reducción de la polarización por concentración, mejor eficiencia de corriente y un control superior sobre la morfología del depósito metálico. Asimismo, se evidenció que parámetros clave como la densidad de corriente, la temperatura, la concentración de iones de cobre y la velocidad de circulación del electrolito influyen de manera directa en la calidad y el tamaño de partícula del polvo obtenido.

4.2. Ideación y Conceptualización

Identificada la necesidad, comenzamos a dar forma a posibles soluciones, con el firme propósito de crear una celda electrolítica funcional para el uso académico en un entorno universitario.

El concepto central que desarrollamos consistió en una celda electrolítica de geometría cilíndrica vertical, diseñada para generar un flujo rotacional interno mediante la recirculación forzada del electrolito. Para lograrlo, propusimos incorporar una boquilla helicoidal en la zona inferior de ingreso de la solución, con el objetivo de inducir un movimiento vorticial continuo y estable dentro de la cámara de reacción. Este patrón hidrodinámico, según nuestra comprensión, permitiría mejorar la mezcla del electrolito, renovar constantemente la concentración de iones Cu^{2+} en la proximidad de la superficie catódica y favorecer la formación de depósitos metálicos en forma de polvo.

4.2.1. *Propuesta Del Diseño.*

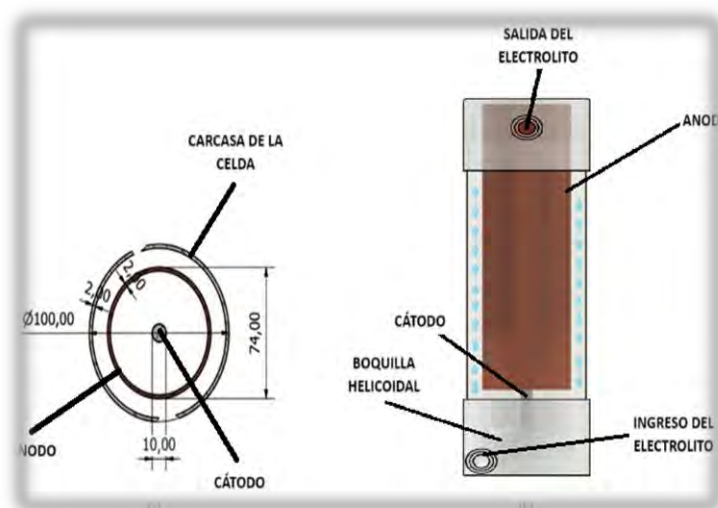
El proyecto propone el diseño y construcción de una celda electrolítica tipo vórtice (Figura 10) para producir polvos de cobre, enfocándose en la eficiencia energética, control del proceso y calidad del producto final. Este enfoque integra cinco disciplinas de la ingeniería: electroquímica, mecánica de fluidos, ingeniería de materiales, termodinámica y transferencia de masa, cuya sinergia optimiza la deposición electroquímica y controla la morfología de los polvos metálicos.

La celda electrolítica tipo vórtice aprovecha las ventajas del flujo rotacional, que favorece la distribución homogénea de los iones de cobre en el electrolito. Este fenómeno mejora la transferencia de masa, reduce la formación de depósitos compactos en el cátodo y favorece la producción de polvos con tamaño y morfología uniformes. Según Newman y Thomas-Alyea (2012), “el flujo vorticial incrementa la eficiencia de los procesos electroquímicos al reducir las resistencias de difusión y mejorar el acceso de los iones al electrodo”. Además, el diseño minimiza la formación de dendritas al estabilizar la densidad de corriente y el potencial eléctrico en la interfaz electrodo-electrolito. Shokobayev et al. (2022) respaldan esta idea al afirmar que "debido a la mezcla intensiva del electrolito, no hay un agotamiento profundo de la capa cercana al cátodo con iones de cobre, lo que crea condiciones favorables para el desarrollo de granos grandes," pero también señalan que ajustando parámetros como

la densidad de corriente y la duración de la electrólisis, "el polvo se vuelve de grano fino," logrando un control efectivo sobre la morfología del producto.

Figura 10

Celda electrolítica tipo vórtice



Nota: En la figura se detalla la propuesta de la celda electrolítica tipo vórtice. (a) vista superior, (b) vista lateral.

El flujo generado por el vórtice renueva constantemente el electrolito en la superficie del cátodo, evitando las zonas de agotamiento iónico y mejorando la cinética de reacción. Pletcher y Walsh (1990) afirman que la “renovación continua es clave para mantener condiciones operativas estables y obtener productos de alta calidad en procesos de electrodeposición”. En este sentido, Shokobayev et al. (2022) destacan que su celda electrolítica, con un flujo de vórtice del electrolito y una tasa de bombeo de "1.2 L/min, permite alcanzar una eficiencia de corriente del 90.3% para una masa de polvo de 27.9025 g, lo que confirma la capacidad del diseño para optimizar la eficiencia energética y la calidad del producto final. Además, el artículo especifica que "la densidad de corriente óptima establecida durante el experimento es 150 mA/cm²," un parámetro que estabiliza el proceso y reduce efectos secundarios como la evolución de hidrógeno, contribuyendo a la uniformidad del polvo de cobre con un tamaño de partícula de 5 -10 μm y una pureza de 99.5%.

4.2.2. Descripción Del Diseño.

La celda electrolítica tipo vórtice está diseñada para mejorar la producción de polvos de cobre mediante la inducción de un flujo rotacional controlado (Anexo. C). Su estructura consta de un cuerpo

cilíndrico translucido, dentro del cual se generará el vórtice, impulsado desde la parte inferior por una bomba y una boquilla helicoidal ubicada en la entrada inferior, que imparte al electrolito un patrón de flujo ascendente y giratorio.

El diseño incorpora una cubierta superior e inferior donde consta de un sistema de entrada y salida del electrolito (figura 10). La entrada inferior distribuye el electrolito de manera uniforme, reduciendo los gradientes de concentración y zonas de agotamiento iónico cerca del cátodo (Anexo. A) La salida superior, por su parte, permite la extracción del electrolito agotado, permitiendo una renovación constante del flujo (Anexo. B).

Los electrodos están fijados en la cubierta superior para uniformizar el campo eléctrico y simplificar el mantenimiento. El ánodo, de forma cilíndrica y fabricado en cobre de alta pureza, se alinea paralelo al cuerpo de la celda, maximizando la superficie activa para la disolución anódica. El cátodo, una barra cilíndrica sólida y delgada de acero inoxidable, se ubica en el eje central de la celda, optimizando la captura de iones de cobre en suspensión y la formación de polvos. Esta disposición mejora la eficiencia de la electrodeposición al reducir las distancias de difusión y homogeneizar el depósito.

De esta manera, consolidamos un diseño integral que combina el sistema electroquímico, el hidráulico y la estructura de soporte, orientado no solo a la obtención controlada de polvos de cobre, sino también a convertirse en una herramienta valiosa y duradera para futuras investigaciones en nuestra Escuela.

4.3. Cálculos de Ingeniería

4.3.1. Área Efectiva Del Cátodo.

El cátodo es cilíndrico y macizo (varilla):

Longitud: 350 mm = 35 cm

Diámetro: 10 mm = 1 cm

Radio: 0.5 cm

$$A = 2 \times \pi \times 0.5 \times 35$$

$$A = 109.96 \text{ cm}^2$$

4.3.2. *Área Efectiva Del Ánodo.*

Ánodo tipo tubo cilíndrico, con:

Diámetro interno: 70 mm = 7.0 cm

Radio interno $r=3.5$ cm

Altura: 300 mm = 30 cm

Área interna:

$$A_i = 2 \times \pi \times 3.5 \times 30$$

$$A_i = 659.73 \text{ cm}^2$$

Para el presente proyecto el área efectiva se considera el área interna. Siendo un área efectiva de 659.73 cm^2 .

4.3.3. *Masa Teórica Depositada.*

Considerando la intensidad de corriente máxima entregada por la fuente de alimentación, que son 10 amperios, hallamos la masa teórica depositada mediante la Ley de Faraday:

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

Se toma como valores constantes:

Masa molar del cobre $M_{Cu} = 63.546 \text{ g/mol}$

Intensidad de corriente $I = 10 \text{ A}$

Tiempo de operación $t = 3600 \text{ s}$

Constante de Faraday $F = 96485 \text{ C/mol}$.

Numero de electrones $n = 2$

$$m = \frac{63.546 \times 10 \times 3600}{2 \times 96485}$$

$$m = 11.85 \text{ g}$$

4.3.4. Densidad De Corriente.

Para obtener polvos de cobre se necesita altas densidades de corriente. Se obtiene la densidad de corriente mediante la siguiente formula:

$$j = \frac{I}{A}$$

Se toma lo siguientes valores:

Área del cátodo A = 109.96 cm².

Intensidad de corriente I = 10 A

$$j = \frac{10}{109.96}$$

$$j = 99.47 \text{ mA/cm}^2$$

4.3.5. Número de Reynolds

Para garantizar la formación de polvos y evitar la pasivación por falta de iones, se analiza el régimen de flujo dentro del espacio anular comprendido entre el cátodo (varilla) y el ánodo (tubo interior).

Se toma lo siguientes valores:

Caudal de diseño (Q):

$$9.5 \text{ L/min} = 1.583 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Diámetro del inyector (Din): 17 mm = 0.017 m

Diámetro Ánodo (Dext): 70 mm = 0.07 m

Diámetro Cátodo (Dint): 10 mm = 0.01 m

diámetro hidráulico (Dh):

$$D_h = D_{ext} - D_{int} = 0.07 - 0.01 = 0.06$$

El área del flujo dentro de la celda (A_{flujo})

$$A_{flujo} = \frac{\pi}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2)$$

$$A_{flujo} = \frac{\pi}{4} (0.07^2 - 0.01^2)$$

$$A_{flujo} = 0.00377 \text{ m}^2$$

Velocidad axial v_{axial}

$$v_{axial} = \frac{Q}{A}$$

$$v_{axial} = \frac{1.583 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{0.00377 \text{ m}^2}$$

$$v_{axial} = 0.042 \text{ m/s}$$

El área de la sección transversal de entrada (A_{in}) es:

$$A_{in} = \frac{\pi}{4} (D_{in}^2)$$

$$A_{in} = \frac{\pi}{4} (0.017)^2$$

$$A_{in} = 2.27 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

La velocidad de inyección resultante es:

$$v_{in} = \frac{Q}{A_{in}}$$

$$v_{in} = \frac{1.583 \times 10^{-4}}{2.27 \times 10^{-4}}$$

$$v_{in} = 0.697 \text{ m/s}$$

Una velocidad de entrada de ~0.7 m/s es adecuada para iniciar el movimiento rotacional sin generar una caída de presión excesiva que dañe la bomba de diafragma seleccionada.

Velocidad tangencial Inicial ($v_{\theta,0}$)

Dado que el inyector tiene un ángulo de inclinación vertical de $\alpha = 16^\circ$

$$v_{\theta,0} = v_{in} \cdot \cos(16^\circ)$$

$$v_{\theta,0} = 0.697 \cdot 0.961$$

$$v_{\theta,0} = 0.67 \text{ m/s}$$

Intensidad del vórtice (Número de Swirl - S)

Radio medio de la espiral (R_s): 50 mm = 0.05 m.

Radio hidráulico de la celda (R_h): 30 mm = 0.03 m (promedio entre ánodo y cátodo).

$$S \approx \frac{v_{\theta,0}}{v_{axial}}$$

$$S \approx \frac{0.67 \text{ m/s}}{0.042 \text{ m/s}}$$

$$S \approx 15.9$$

Un número de Swirl $S > 1$ indica un flujo fuertemente dominado por la rotación. Con un valor de 15.9, se garantiza que el fluido dará múltiples vueltas antes de salir de la celda, maximizando el contacto con el cátodo

Velocidad total (v_{total})

$$v_{total} = \sqrt{v_{\theta,0}^2 + v_{axial}^2}$$

$$v_{total} = \sqrt{0.67^2 + 0.042^2}$$

$$v_{total} = 0.671 \text{ m/s}$$

Cálculo del número de Reynolds resultante (Re_{res})

$$Re_{base} = \frac{\rho \cdot v_{total} \cdot D_{in}}{\mu}$$

$$Re_{base} = \frac{1150 \cdot 0.671 \cdot 0.017}{0.0012}$$

$$Re_{base} = 10,930$$

El valor de $Re = 10,930$ confirma un Régimen Turbulento Pleno en la entrada de la celda. Esta turbulencia es la responsable de romper la capa límite laminar sobre el cátodo, permitiendo trabajar a altas densidades de corriente (100 mA/cm²) sin pasivar el electrodo.

4.3.6. El Factor de Deposición de Polvo

Para los cálculos teóricos, se asumen las siguientes condiciones típicas para la obtención de polvos de cobre (electrolito con baja concentración de cobre para favorecer el agotamiento iónico en la interfaz):

Concentración de cobre ($[Cu^{2+}]$): 10 g/L (valor propuesto para polvos).

$$C_b = 10 \text{ g/L} / 63.55 \text{ g/mol} = 0.157 \text{ mol/L} = 157 \text{ mol/m}^3.$$

Coeficiente de difusión del cobre (D_{Cu}): $\approx 6.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ (a 25°C).

Viscosidad cinemática (ν): $\approx 1.04 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Número de electrones (n): 2.

Constante de Faraday (F): 96485 C/mol.

Número de Schmid (Sc)

$$Sc = \frac{\nu}{D_{Cu}}$$

$$Sc = \frac{1.04 \times 10^{-6}}{6.5 \times 10^{-10}}$$

$$Sc = 1600$$

Número de Sherwood (Sh)

Correlación para flujo turbulento en vórtice usaremos la correlación generalizada para transferencia de masa en flujo turbulento (analogía de Chilton-Colburn modificada para flujo rotacional/anular). Dado que calculamos un Reynolds (Re) alto de 10,930

$$Sh = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Sc^{0.33}$$

Sustituyendo los valores:

$$Re^{0.8} = (10930)^{0.8} = 1715$$

$$Sc^{0.33} = (1600)^{0.33} = 11.45$$

$$Sh = 0.023 \cdot 1715 \cdot 11.45$$

$$Sh = 451.6$$

Coeficiente de transferencia de masa (k_m)

$$Sh = \frac{k_m \cdot D_h}{D_{Cu}} \Rightarrow \text{despejamos } k_m$$

$$k_m = \frac{Sh \cdot D_{Cu}}{D_h}$$

Donde:

$D_h = 0.06$ m (Diámetro hidráulico calculado previamente).

$$k_m = \frac{451.6 \cdot 6.5 \times 10^{-10}}{0.06}$$

$$k_m = 4.89 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

Cálculo de la densidad de corriente límite

Esta es la máxima corriente que el sistema soportaría si buscáramos un depósito liso. Superar este valor garantiza la formación de polvo.

$$i_L = n \cdot F \cdot k_m \cdot C_b$$

$$i_L = 2 \cdot 96485 \cdot (4.89 \times 10^{-6}) \cdot 157$$

$$i_L = 14.8 \text{ mA/cm}^2$$

Validación de la formación de polvos

Comparamos la densidad de corriente aplicada

Densidad de corriente aplicada $j \approx 100 \text{ mA/cm}^2$ (aproximando de los 99.47 mA/cm^2)

Densidad de corriente límite $i_L \approx 22.3 \text{ mA/cm}^2$. Relación de Operación (j/i_L):

$$\frac{j}{i_L} = \frac{100}{22.3} \approx 4.48$$

Según la teoría, cuando la relación $j/i_L > 1$, el proceso está controlado completamente por transferencia de masa, lo que genera un agotamiento rápido de iones en la superficie del cátodo, formando estructuras dendríticas y ramificadas que se desprenden fácilmente.

Conclusión: Con un factor de 4.48, el diseño garantiza teóricamente la producción de polvo de cobre fino y valida el dimensionamiento de la celda.

4.3.7. Estimación del Voltaje y Consumo Energético

Voltaje de equilibrio

Para la reacción global ($Cu \rightarrow Cu^{2+}$ en ánodo y $Cu^{2+} \rightarrow Cu$ en cátodo), teóricamente es 0V si las concentraciones fueran iguales. Pero como hay sobrepotenciales:

$$E_{celda} \approx 0.34 \text{ V (potencial estándar)}$$

Caída óhmica en el electrolito (IR_{sol})

La resistencia del electrolito suele ser el mayor consumidor de voltaje.

Conductividad específica del electrolito ácido (κ): $\approx 20 \text{ S/m}$ (Siemens por metro, típico para electrolitos industriales).

Distancia entre los electrodos (d): $30 \text{ mm} = 0.03 \text{ m}$.

Resistencia por unidad de área (R_A):

$$R_A = \frac{d}{\kappa}$$

$$R_A = \frac{0.03}{20}$$

$$R_A = 0.0015 \Omega \cdot m^2$$

Caída de voltaje óhmica (V_{IR}):

$$V_{IR} = j \cdot R_A$$

$$V_{IR} = 1000 \text{ A/m}^2 \cdot 0.0015 \Omega \cdot m^2$$

$$V_{IR} = 1.5 \text{ V}$$

Voltaje total de celda estimado (V_{total})

$$V_{total} = \eta_{anodo} + \eta_{catodo} + V_{IR} + V_{contactos}$$

$$V_{total} = 0.1 + 0.1 + 1.5 + 0.8$$

$$V_{total} = 2.5 \text{ Voltios}$$

4.4. Desarrollo Del Diseño

4.4.1. Planos

Como parte del proceso de diseño, se elaboraron planos de los principales componentes del equipo, empleando como herramienta Autodesk Inventor. Estos planos permitieron establecer dimensiones exactas, tolerancias, ubicación de perforaciones, uniones mecánicas y detalles necesarios para la construcción del prototipo.

Se desarrollaron los siguientes planos:

- Plano de la boquilla helicoidal de inducción de vórtice (Anexo A)
- Plano de proyección de vistas de la celda (Anexo B)
- Plano de conjunto general de la celda electrolítica tipo vórtice (Anexo C)

4.4.2. Geometría Del Sistema

La geometría seleccionada para la celda fue de configuración cilíndrica vertical, debido a que favorece la distribución uniforme del flujo interno y permite una mejor formación del vórtice durante la recirculación del electrolito. Asimismo, la geometría cilíndrica mejora el aprovechamiento del volumen útil y facilita la instalación concéntrica de los electrodos.

Se optó por una relación altura-diámetro adecuada para mantener estabilidad hidráulica, evitar zonas muertas dentro del reactor y promover una circulación continua del electrolito. Esta configuración también simplifica la adquisición de la carcasa y reduce puntos críticos de acumulación de material depositado.

4.4.2.1. Dimensionamiento Del Ánodo.

El ánodo tiene una geometría cilíndrica con las siguientes dimensiones:

- Diámetro externo: 74 mm
- Espesor: 2 mm
- Diámetro interno: 70 mm

- Altura: 300 mm

4.4.2.2. Dimensionamiento Del Cátodo.

El cátodo es un tubo sólido cilíndrico con:

- Diámetro: 10 mm
- Altura: 350 mm

4.4.2.3. Dimensionamiento De La Carcasa De La Celda.

La carcasa tiene una forma cilíndrica con:

- Diámetro exterior: 100 mm
- Espesor: 2 mm
- Diámetro interno: 96 mm
- Altura: 300 mm

4.4.2.4. Volumen Útil Del La Celda

La carcasa principal de la celda electrolítica tiene una geometría cilíndrica vertical, para favorecer la generación del flujo vorticial, mejorar la distribución del electrolito y facilitar la fabricación del equipo.

$$V = \pi \times 4.8^2 \times 35 \text{ cm}^3$$

$$V = 2533.38 \text{ cm}^3$$

Por lo tanto, la capacidad total de la carcasa es equivalente a:

$$V=2.53 \text{ L}$$

4.4.2.5. Dimensionamiento De La Cubierta De La Celda.

La cubierta es un componente circular diseñado para cerrar la carcasa y soportar el cátodo y el ánodo, con las siguientes dimensiones según el plano (Anexo A y Anexo B):

- Diámetro: 100 mm (igual al diámetro exterior de la carcasa)
- Orificio central: 20 mm de diámetro, para el paso del cátodo

- Altura total: 32 mm, incluyendo un puerto saliente en el lateral

4.4.3. Ubicación De Electrodo

La disposición de los electrodos fue diseñada de manera concéntrica dentro de la celda electrolítica. El ánodo se ubicó en la zona periférica interna mediante un tubo de cobre, mientras que el cátodo se posicionó en la parte central mediante una varilla de acero inoxidable.

Esta configuración fue seleccionada para mantener una distancia uniforme entre electrodos, mejorar la distribución del campo eléctrico y favorecer una deposición homogénea del cobre. Además, la ubicación central del cátodo permite aprovechar el movimiento vorticial del electrolito, incrementando la transferencia de masa hacia la superficie de deposición.

La separación entre ánodo y cátodo fue establecida considerando eficiencia eléctrica, caída de voltaje y facilidad de mantenimiento.

4.4.4. Sistema De Recirculación

El sistema hidráulico fue diseñado para permitir la recirculación continua del electrolito desde la salida de la celda hacia la bomba y nuevamente hacia el ingreso tangencial del reactor. Para ello, se emplearon tuberías y accesorios resistentes a medios corrosivos, de fácil instalación y bajo costo.

El diámetro de tubería fue seleccionado en función del caudal requerido para generar el vórtice interno, minimizando pérdidas de carga y garantizando flujo estable. Se incorporaron conexiones desmontables, válvulas y uniones roscadas que permiten el desmontaje rápido para limpieza o reemplazo de componentes.

El ingreso del electrolito se diseñó mediante una conexión acoplada a la base helicoidal, responsable de transformar el flujo en un movimiento rotacional dentro de la celda. Esta integración fue fundamental para lograr el comportamiento hidráulico requerido por el sistema.

4.4.5. Diseño Del Sistema De Inducción De Vórtice

La boquilla helicoidal (Figura 11) ha sido diseñada para inducir un flujo vorticial eficiente dentro de la celda, y con ayuda de una impresora 3D de resina Phrozen Sonic Mighty 4K (Figura 12) se construyó la boquilla helicoidal.

Figura 11*Boquilla helicoidal de la celda electrolítica*

Nota: En la figura se detalla el diseño de la base de la celda, donde consta de una boquilla helicoidal, que se diseñó con el objetivo de mejorar el ciclo vorticial en la celda.

Sus características principales son las siguientes:

Geometría: La boquilla presenta una estructura helicoidal con 1 vuelta y media, permitiendo una transición fluida del flujo lineal a un flujo rotacional.

Dimensiones:

- Diámetro interno: 100 mm
- Diámetro externo: 106 mm
- Altura total: 80 mm

Ángulo de inclinación: Las aletas de la hélice están inclinadas a -16 grados respecto al eje Z.

4.4.6. Diseño Del Sistema De Circulación Del Electrolito

El sistema de circulación del electrolito está diseñado para garantizar un flujo continuo y controlado a través de la celda electroquímica. Este sistema es especialmente relevante en configuraciones como la celda tipo vórtice mencionada previamente, donde se busca inducir un flujo rotacional para mejorar la mezcla y la eficiencia del proceso.

4.4.6.1. Tubería De Circulación

Las tuberías tienen un diámetro interno de 15 mm y un espesor de 2.5 mm. El circuito de circulación tiene una longitud total estimada de 1 metro (incluyendo ida y retorno), aunque este valor debe ajustarse según la disposición física del equipo en el laboratorio.

Figura 12

Impresión de la boquilla helicoidal



Nota: En la figura se detalla la impresión de la boquilla helicoidal, mediante la impresora 3D de resina Phrozen Sonic Mighty 4K.

4.4.6.2. Bomba.

La bomba seleccionada para el sistema de circulación del electrolito desempeña un papel crítico al garantizar un flujo continuo y controlado del fluido a través de la celda electroquímica.

La bomba por utilizar es una bomba de diafragma de la marca CEELPEOPAR (Figura 13) de 12 voltios con una capacidad de 2.5 GPM (9.5 L/min), construido con un colector de polipropileno reforzado con fibra de vidrio resistente a la corrosión. Presenta un sistema de autocebado y un

interruptor de presión integrado para apagado automático, protegiéndolo del trabajo en seco. A continuación, se describen sus dimensiones:

- Longitud: 200.7 mm
- Ancho: 135 mm
- Altura: 120 mm

Figura 13

Bomba de la marca CEELPEOPAR



Nota: En la figura se detalla la bomba de diafragma de la marca CEELPEOPAR.

4.4.7. Selección De Materiales

La selección de materiales para la celda electrolítica tipo vórtice se basa en los requisitos funcionales y operativos del sistema, considerando factores como la resistencia a la corrosión química, la compatibilidad con el electrolito (una solución acuosa de sulfato de cobre y ácido sulfúrico), la resistencia mecánica y la durabilidad. Además, se prioriza la transparencia en ciertos componentes para facilitar la monitorización visual del proceso, así como la disponibilidad de los materiales en el mercado. A continuación, se detalla la selección de materiales para cada componente de la celda, incluyendo las razones por las cuales se descartaron otras alternativas comunes.

4.4.7.1. Ánodo.

El ánodo (Figura 14) es donde ocurre el proceso de oxidación, donde se libera iones de cobre (Cu^{2+}) al electrolito mediante la reacción $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$. Dado que el objetivo es la producción de polvos de cobre, el ánodo debe ser cobre de alta calidad y resistir la disolución controlada sin degradarse.

Figura 14

Ánodo de cobre T2



Nota: En la figura se detalla la geometría tubular del ánodo de cobre, utilizado en el presente proyecto

Para lo cual se seleccionó el cobre T2 (Anexo. D), también conocido como cobre desoxidado de alta conductividad (C11000 ASTM), debido a su pureza del 99.9 %, excelente conductividad eléctrica (58 mS/m) y buena resistencia a la corrosión en el medio ácido.

Se descartaron aleaciones de cobre con menor pureza porque podrían contaminar el electrolito con impurezas que afectarían la calidad de los polvos. Asimismo, el uso de ánodos inertes (como platino o titanio recubierto), fueron descartadas principalmente por su limitada disponibilidad y alto costo. La adquisición de cobre T2 resultó ser la alternativa más viable, accesible y económica que cumplía con los requisitos técnicos para un prototipo de laboratorio, permitiendo mantener el balance iónico del electrolito mediante disolución anódica controlada.

Las propiedades físicas, químicas y mecánicas del cobre T2 se detallan en las Tablas 2, 3 y 4.

Tabla 2*Propiedades físicas del cobre T2*

DENSIDAD	PUNTO DE FUSIÓN	PUNTO DE EBULLICIÓN	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
8.89 g/cm ³	1083 °C	2567 °C	58 mS/m	390 – 401 W/m·K

Nota: En la tabla se detallan las propiedades físicas del cobre T2, utilizado como ánodo en el presente proyecto.

Tomado de (ANEXO D)

Tabla 3*Propiedades químicas del cobre T2*

PUREZA	CONTENIDO DE OXÍGENO	RESISTENCIA A LA CORROSIÓN
99.9 %	0.02 – 0.04 %	Alta

Nota: En la tabla se detallan las propiedades físicas del cobre T2, utilizado como ánodo en el presente proyecto.

Tomado de (ANEXO D)

Tabla 4*Propiedades mecánicas del cobre T2*

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	LÍMITE ELÁSTICO	MÓDULO DE ELASTICIDAD	ALARGAMIENTO	DUREZA
220 MPa	80 MPa	110 – 130 GPa	30 – 40 %	45 – 80 HB

Nota: En la tabla se detallan las propiedades físicas del cobre T2, utilizado como ánodo en el presente proyecto.

Tomado de (ANEXO D).

Mecánicamente, el cobre T2 tiene una resistencia a la tracción de aproximadamente 220 MPa y una ductilidad que permite fabricarlo en forma de cilindro hueco.

Su conductividad eléctrica de 58 mS/m (mili siemens por metro) a 20 °C, lo que minimiza las pérdidas óhmicas durante la disolución anódica. Así mismo, su resistividad eléctrica es de $1.72 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$, lo que asegura una transferencia eficiente de corriente

4.4.7.2. Cátodo.

El cátodo (Figura 15) es donde ocurre el proceso de reducción de los iones Cu^{2+} ($\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$), donde se forman los polvos de cobre. El acero inoxidable AISI 304 (Anexo. E), un acero

austenítico, tiene una resistencia a la corrosión adecuada para el electrolito ácido, por su contenido de cromo, que forma una capa pasiva de óxido de cromo (Cr_2O_3).

Figura 15

Cátodo de acero inoxidable AISI 304



Nota: En la figura se detalla el cátodo de geometría tubular sólida (varilla), utilizado en el presente proyecto.

Su resistencia a la corrosión en soluciones de ácido sulfúrico diluido es moderada, pero suficiente para un prototipo de laboratorio con tiempos de operación controlados. Su conductividad eléctrica es de 1.4 mS/m, significativamente menor que la del cobre, pero adecuada para el proceso, ya que la corriente requerida para la electrodeposición es moderada. Además, su superficie lisa facilita el desprendimiento de los polvos de cobre, con una rugosidad superficial de $R_a = 0.4 \mu\text{m}$, reduciendo la adherencia del depósito.

Se evaluó el acero inoxidable AISI 304L, el cual ofrece ligeramente mejor resistencia a la corrosión intergranular en ambientes ácidos. No obstante, se optó por el AISI 304 porque presenta propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión suficientes para las condiciones de operación del prototipo (tiempos limitados y concentraciones moderadas de ácido sulfúrico), a un costo significativamente más bajo y con mayor disponibilidad en el mercado local.

Otras alternativas como acero al carbono fueron descartadas por su baja resistencia a la corrosión, que habría generado contaminación por iones de hierro en el electrolito. Materiales más

nobles como titanio o platino resultaron inviables debido a su elevado costo. El AISI 304 representó el mejor equilibrio entre rendimiento, costo y practicidad para este proyecto académico.

Las propiedades físicas, químicas y mecánicas del AISI 304 se detallan en las Tablas 5, 6 y 7

Tabla 5

Propiedades físicas del acero Inoxidable AISI 304

DENSIDAD	PUNTO DE FUSIÓN	RESISTENCIA ELÉCTRICA	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
7.90 g/cm ³	1450 °C	$7.2 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$	1.4 mS/m	14 – 16 W/m·K

Nota: En la tabla se detallan las propiedades físicas del acero Inoxidable AISI 304, utilizado como cátodo en el presente proyecto. Fuente: (ANEXO E)

Tabla 6

Propiedades químicas del acero Inoxidable AISI 304

COMPOSICIÓN	FORMACIÓN DE CAPA PASIVA	RESISTENCIA A LA CORROSIÓN
18–20 % Cr, 8–10.5 % Ni	Óxido de cromo (Cr ₂ O ₃)	Muy alta

Nota: En la tabla se detallan las propiedades químicas del del acero Inoxidable AISI 304, utilizado como cátodo en el presente proyecto. Fuente: (ANEXO E)

Tabla 7

Propiedades mecánicas del acero Inoxidable AISI 304

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	LÍMITE ELÁSTICO	MÓDULO DE ELASTICIDAD	ALARGAMIENTO	DUREZA
560 MPa	205 MPa	193 GPa	40 %	201 HB

Nota: En la tabla se detallan las propiedades mecánicas del acero Inoxidable AISI 304, utilizado como cátodo en el presente proyecto. Fuente: (ANEXO E)

4.4.7.3. Carcasa De La Celda.

La carcasa debe ser translúcida (Figura 16) para permitir la monitorización visual el vórtice generado y resistente al electrolito corrosivo. El PMMA tiene una transmitancia de luz del 92%, superior a la del vidrio (89%), lo que facilita la observación del proceso. Su resistencia química a soluciones de H₂SO₄ (hasta 30%) y CuSO₄ es buena, con una tasa de degradación mínima (0.01-0.05 mm/año a 25

°C), aunque es susceptible al agrietamiento por tensión en presencia de solventes orgánicos o tensiones mecánicas prolongadas (Ashby & Jones, 2005, pág. 238).

El vidrio, aunque químicamente resistente, es frágil y difícil de mecanizar, aumentando el riesgo de rotura. El PVC, aunque económico y resistente a la corrosión, es opaco, lo que impediría observar el comportamiento del vórtice, aspecto fundamental del estudio. El PMMA ofreció el mejor balance entre transparencia, trabajabilidad y resistencia mecánica para un prototipo de laboratorio. Sus propiedades se detallan en las Tablas 8, 9 y 10.

Tabla 8

Propiedades físicas del polimetilmetacrilato

DENSIDAD	PUNTO DE REBLANDECIMIENTO	RESISTENCIA ELÉCTRICA	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
1.2 g/cm ³	100 °C	$10^{13} - 10^{15} \Omega \cdot m$	$10^{-14} - 10^{-16} S/m$	14 – 16 W/m·K

Nota: En la tabla se detallan las propiedades físicas del PMMA - polimetilmetacrilato, utilizado para elaborar la carcasa de la celda electrolítica.

Tabla 9

Propiedades químicas del polimetilmetacrilato

COMPOSICIÓN	RESISTENCIA A LA CORROSIÓN
$(C_5O_2H_8)_n$	Excelente

Nota: En la tabla se detallan las propiedades químicas el PMMA - polimetilmetacrilato, utilizado para elaborar la carcasa de la celda electrolítica

Tabla 10

Propiedades mecánicas del polimetilmetacrilato

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	MÓDULO DE ELASTICIDAD	ALARGAMIENTO	DUREZA
70 MPa	3.2 GPa	3 %	M90 – M100 Rockwell

Nota: En la tabla se detallan las propiedades mecánicas el PMMA - polimetilmetacrilato, utilizado para elaborar la carcasa de la celda electrolítica.

Figura 16

Carcasa de la celda de PMMA



Nota: En la figura se detalla la carcasa de la celda, el cual es de material PMMA, utilizado en el presente proyecto.

4.4.7.4. Cubierta De La Celda.

La cubierta superior (Figura 17) debe ser resistente al electrolito, soportar tensiones mecánicas (por la fijación de electrodos y conexiones), y permitir un sellado hermético. El ABS tiene una resistencia química aceptable a soluciones de H_2SO_4 diluido y CuSO_4 , con una tasa de degradación de 0.02-0.06 mm/año a 25 °C, aunque puede degradarse en exposiciones prolongadas a ácidos concentrados (Callister & Rethwisch, 2014, pág. 592).

El PMMA, aunque más transparente, es más frágil y menos adecuado para piezas con geometría compleja como la boquilla helicoidal. El acero inoxidable habría incrementado considerablemente el peso, el costo y la dificultad de fabricación. El ABS permitió producir rápidamente componentes funcionales con la impresora 3D disponible.

Así mismo, mecánicamente, el ABS tiene una resistencia a la tracción de 45 MPa, un módulo de elasticidad de 2.3 GPa, y una alta resistencia al impacto (energía de fractura de 200 J/m), lo que lo hace adecuado para soportar las tensiones de montaje.

En las Tablas 11 y 12, se detallan con mayor detalle sus propiedades.

Tabla 11

Propiedades físicas del ABS - Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno

DENSIDAD	PUNTO DE REBLANDECIMIENTO	RESISTENCIA ELÉCTRICA	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
1.05 g/cm ³	110 °C	10 ¹³ – 10 ¹⁵ Ω·m	10 ⁻¹⁴ – 10 ⁻¹⁶ S/m	0.17 – 0.20 W/m·K

Nota: En la tabla se detallan las propiedades físicas del ABS - Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno, utilizado para elaborar la cubierta de la celda electrolítica.

Su densidad es de 1.05 g/cm³, lo que contribuye a un diseño ligero. Además, el ABS puede moldearse por inyección o mecanizarse con precisión para incluir orificios y soportes

Tabla 12

Propiedades mecánicas del ABS - Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	MÓDULO DE ELASTICIDAD	ALARGAMIENTO	DUREZA
45 MPa	2.3 GPa	20 %	R95 – R110 Rockwell

Nota: En el cuadro se detallan las propiedades mecánicas del ABS - Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno, utilizado para elaborar la cubierta de la celda electrolítica.

Figura 17

Diseño de la cubierta superior de la celda



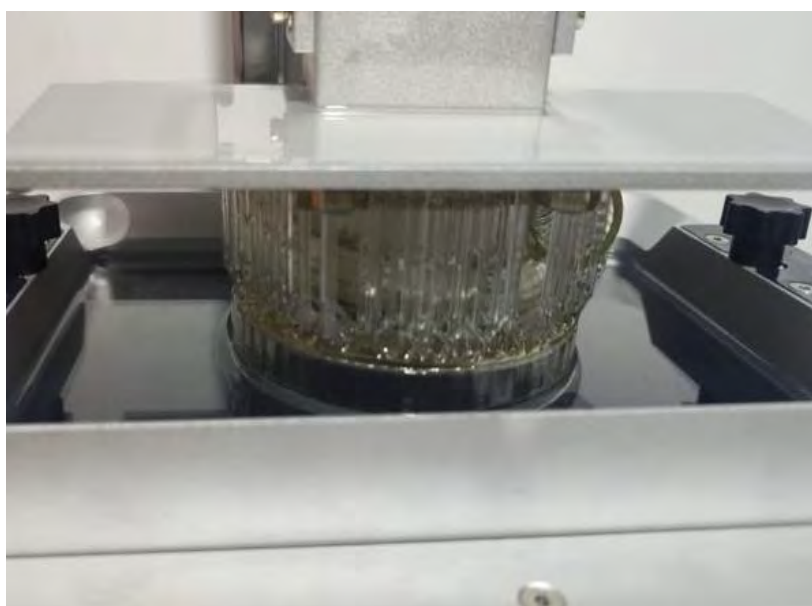
Nota: En la figura se detalla la geometría y detalles de la tapa superior de la celda, donde se tiene una serie de pernos del mismo material con el objetivo de sujetar el ánodo, así mismo un espacio en el centro donde irá el cátodo.

4.4.7.5. Boquilla Helicoidal.

La boquilla helicoidal genera el vórtice y debe resistir la corrosión y la erosión del flujo. También se utilizará material ABS para imprimir la boquilla (Figura 18), se selecciona el mismo material para mantener consistencia en la fabricación. Las propiedades químicas y mecánicas del ABS ya fueron descritas en la sección 3.2.4. Su resistencia a la erosión es moderada (tasa de desgaste de 0.1-0.3 mm/año bajo flujo de 1-2 m/s), pero suficiente para un prototipo de laboratorio.

Figura 18

Impresión de la boquilla helicoidal con material ABS



Nota: En la figura se detalla la impresión de la boquilla helicoidal con material ABS, mediante la impresora 3D de resina Phrozen Sonic Mighty 4K.

4.4.7.6. Tubería Y Accesorios.

Las tuberías deben ser resistentes al electrolito. El PVC tiene una excelente resistencia química a soluciones de H_2SO_4 (hasta 50%) y CuSO_4 , con una tasa de degradación negligible. Mecánicamente, el PVC tiene una resistencia a la tracción de 50 MPa y un módulo de elasticidad de 3 GPa, soportando las presiones del sistema (0.1-0.5 bar).

Se evaluó el Teflón, el cual ofrece mayor resistencia química, pero su alto costo lo hace innecesario para un prototipo. El polipropileno era viable, pero el PVC proporciona mejor rigidez

mecánica a un precio más bajo. Para las condiciones moderadas de operación en laboratorio, el PVC resultó la opción más práctica y eficiente.

En las Tablas 13, 14 y 15, se detallan con mayor detalle sus propiedades.

Tabla 13

Propiedades físicas del PVC – policloruro de vinilo

DENSIDAD	PUNTO DE REBLANDECIMIENTO	RESISTENCIA ELÉCTRICA	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
1.45 g/cm ³	85 °C	$10^{13} - 10^{15} \Omega \cdot m$	$10^{-13} - 10^{-15} S/m$	0.14 – 0.19 W/m·K

Nota: En la tabla se detallan las propiedades físicas del PVC – policloruro de vinilo, utilizado para las tuberías de conexión de la celda electrolítica.

Tabla 14

Propiedades químicas del PVC – policloruro de vinilo

COMPOSICIÓN	RESISTENCIA A LA CORROSIÓN
(C ₂ H ₃ Cl) _n	Excelente

Nota: En la tabla se detallan las propiedades químicas del PVC – policloruro de vinilo, utilizado para las tuberías de conexión de la celda electrolítica.

Tabla 15

Propiedades mecánicas del PVC – policloruro de vinilo

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	MÓDULO DE ELASTICIDAD	ALARGAMIENTO	DUREZA
50 MPa	3.0 GPa	3 %	R105 – R115 Rockwell

Nota: En la tabla se detallan las propiedades mecánicas del PVC – policloruro de vinilo, utilizado para las tuberías de conexión de la celda electrolítica.

4.5. Proceso de Construcción

Determinado el diseño de la celda electrolítica tipo vórtice, seleccionados los materiales en función de su resistencia química, conductividad y compatibilidad con el flujo vorticial y determinados los parámetros operacionales, se procede con la construcción y ensamblaje de los componentes. Esta etapa implica el ensamblaje preciso de los elementos estructurales y la verificación de las condiciones operativas para el funcionamiento de la celda. Los materiales por usar en la construcción de la celda electrolítica se detallan a continuación en la Tabla 16.

Tabla 16*Relación de materiales de la celda electrolítica*

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD
Tubo acrílico transparente	1	Unidad
Tapa inferior con salida helicoidal	1	Unidad
Tapa superior con salida	1	Unidad
Bomba	1	Unidad
Tubo PVC	1	Metro
Codo PVC	4	Unidad
Tee PVC	2	Unidad
Envase plástico 9 litros	1	Unidad
Melamina	1	Unidad
Ánodo de cobre	1	Unidad
Cátodo de acero inoxidable	1	Unidad
Conexiones eléctricas	2	Unidad
Unión universal	6	Unidad
Llaves de paso	2	Unidad
Pernos de sujeción	9	Unidad
Transformador de corriente 12 A	1	Unidad
Fuente de alimentación	1	Unidad
Interruptor	1	Unidad

4.5.1. Construcción De La Base.

Es importante la elaboración de la base de madera, para asegurar los componentes de la celda electrolítica y su fácil transporte. Para lo cual se realiza el corte de la plancha de fenólico (Figura 19), para obtener pedazos con dimensiones:

- 1 unidad de 50 cm x 80 cm
- 2 unidades de 15 cm x 12 cm
- 2 unidades de 20 cm x 30 cm.
- 2 unidades de 5 cm x 30 cm
- 2 unidades de 5 cm x 20 cm

Posteriormente, se realiza la unión de los pedazos de fenólico con ayuda de un taladro y autoperforantes, como se detalla en la figura 20. Así mismo se perfora el fenólico para fijar las piezas que lo componen.

Figura 19*Plancha de fenólico*

Nota: En la figura se muestra el fenólico con dimensiones de 50 cm x 80 cm.

Figura 20*Unión de planchas de fenólico*

Nota: En la figura se muestra donde se unirá las dos piezas de fenólico, según indica el plano.

4.5.2. Construcción De La Celda.

La celda consiste en un tubo acrílico transparente, una tapa superior y una tapa inferior, diseñados para contener el electrolito y los electrodos.

La tapa inferior se fija con adhesivo químico para acrílico, garantizando hermeticidad y previniendo derrames. Antes de instalar la tapa superior, se verifica la alineación precisa del ánodo y el

cátodo, los cuales se fijan con pernos de ABS, asegurando las rendijas con el mismo adhesivo químico, conforme se ilustra en la figura 21. Este diseño optimiza la estabilidad estructural y la funcionalidad de la celda, facilitando un entorno controlado para los procesos electroquímicos.

Figura 21

Fijación de la tapa superior con el ánodo



Nota: En la figura se muestra cómo se ensambla el ánodo con la tapa superior, donde se fija su posición con pernos ABS.

Antes de fijar la tapa superior, se realiza una prueba hidrostática llenando la celda con agua para confirmar que la unión entre el tubo acrílico y la tapa inferior carece de orificios o fugas, asegurando la integridad del sellado.

Figura 22

Ensamblaje del reactor de la celda electrolítica



Nota: En la figura se muestra cómo se ensambló el cátodo con la tapa superior e inferior.

Posteriormente, se instala la tapa superior, ajustándola cuidadosamente para posicionar el cátodo en el centro exacto del cuerpo de la celda, como se muestra en la Figura 22. Este procedimiento garantiza un ensamblaje preciso, optimizando la funcionalidad del sistema y minimizando riesgos de desalineación o fallos operativos.

4.5.2.1. Acondicionamiento De Accesorios Y Tuberías.

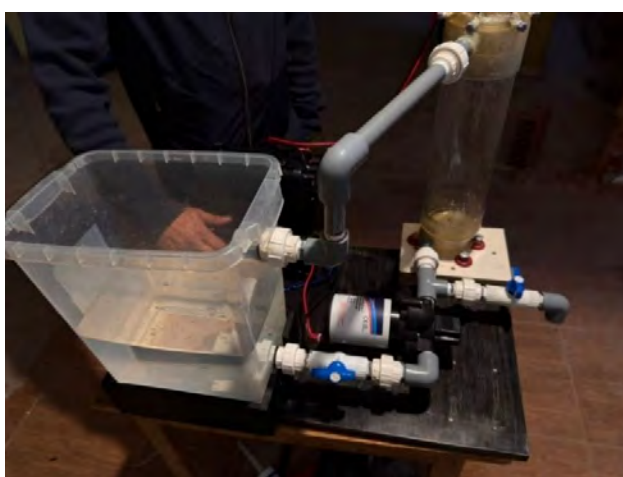
Este apartado describe la preparación de tuberías, llaves de conexión, uniones y la bomba para garantizar un sistema de circulación.

Las tuberías de PVC se cortaron según las longitudes especificadas en el plano correspondiente, lijando cuidadosamente los extremos para eliminar rebabas y asegurar un acabado liso que facilite conexiones herméticas. Las conexiones establecidas son las siguientes:

- Del tanque de almacenamiento a la entrada de la bomba y una salida de purga.
- De la salida de la bomba a la tapa inferior de la celda y una salida de purga.
- De la salida superior de la celda al tanque de almacenamiento, permitiendo la recirculación del fluido.

Figura 23

Bomba y uniones universales roscadas



Nota: En la figura se muestra cómo se ensambló la bomba mediante la instalación de uniones universales roscadas.

Para la instalación de la bomba, se emplearon uniones universales roscadas, selladas con adhesivo químico y cinta teflón para garantizar hermetismo, como se detalla en la figura 23. Asimismo,

se instalaron llaves de conexión en puntos estratégicos: a la salida del tanque de almacenamiento, a la salida del motor y en la salida de purga del sistema, utilizando uniones roscadas para facilitar el mantenimiento y control del flujo. Este procedimiento asegura una configuración robusta, eficiente y libre de fugas, optimizando el rendimiento del sistema de circulación.

4.5.3. Ensamblaje De La Celda Electrolítica

4.5.3.1. Fijación De La Celda A La Base.

El proceso comienza fijando la bomba a la placa de fenólico, seguida de la instalación de la tapa inferior y el tubo de acrílico, respetando estrictamente la distribución indicada en el plano (Figura 24). Esta secuencia garantiza una alineación precisa y una estructura robusta, asegurando la estabilidad y el correcto funcionamiento del sistema.

4.5.3.2. Integración Del Sistema De Circulación.

El sistema de circulación se integra conectando la bomba al tanque de almacenamiento y a la tapa inferior de la celda mediante uniones roscadas y correctamente alineado para garantizar un flujo preciso y sin obstrucciones.

Se conecta la salida del tanque de almacenamiento a la entrada de la bomba utilizando uniones roscadas de PVC, aplicando cinta de teflón en las roscas para garantizar un sellado hermético y prevenir fugas. Se verifica que la alineación sea precisa para evitar tensiones en las tuberías

Figura 24

Instalación de componentes sobre el fenólico



Nota: En la figura se muestra cómo se fijó la bomba, la base del reactor y la distribución de la tubería.

La salida de la tapa superior de la celda se conecta a la parte posterior del tanque de almacenamiento mediante una tubería de PVC con uniones roscadas. Se aplica cinta de teflón y adhesivo químico en las roscas para garantizar un sellado hermético, evitando pérdidas de fluido durante la recirculación. Asimismo, se verifica que la trayectoria de la tubería no presente curvas pronunciadas o restricciones que puedan reducir la eficiencia del flujo.

4.5.3.3. Conexiones Eléctricas.

En este paso, se realiza la conexión eléctrica del sistema, asegurando la conexión del ánodo y el cátodo con la fuente de alimentación, así mismo la instalación de la bomba de propulsión para garantizar el funcionamiento de la celda electroquímica.

Se seleccionan cables compatibles con la corriente y el voltaje requeridos por el sistema, verificando que estén en óptimas condiciones, sin cortes, desgastes o aislamiento dañado. Se inspeccionan los extremos de los cables para asegurar que estén libres de oxidación o residuos que puedan afectar la conductividad.

Los cables se introducen cuidadosamente a través de los orificios diseñados en la estructura de la celda, los cuales están estratégicamente ubicados para facilitar el acceso al ánodo y al cátodo. Estos orificios están dimensionados para evitar fricciones que puedan dañar el aislamiento de los cables y garantizar un ajuste seguro.

- Se conecta el cable positivo al ánodo.
- Se conecta el cable negativo al cátodo.

Una vez realizadas las conexiones, se aplican medidas de aislamiento, como cinta aislante, en los puntos de empalme para prevenir cortocircuitos o contactos accidentales. Además, se asegura que las conexiones estén protegidas contra la exposición al electrolito

Finalmente, los cables se conectaron a la fuente de alimentación, asegurando que los terminales positivo y negativo correspondan correctamente con los polos del ánodo y cátodo. Se ajustó la fuente de alimentación a los parámetros eléctricos especificados (potencial eléctrico y corriente).

4.6. Prueba de Operatividad

4.6.1. Prueba 1

Una vez construida la celda, se realiza una prueba inicial (Figura 25) para validar el correcto funcionamiento del sistema de circulación y la integridad de la celda. Mediante el siguiente procedimiento:

Figura 25

Prueba hidráulica de la celda electrolítica



Nota: En la figura se muestra cómo se realiza la prueba hidráulica de la celda electrolítica, para confirmar la continuidad del electrolito y la no presencia de fugas.

- **Formación del vórtice en la celda:** A través del tubo de acrílico transparente, se verifica la generación de un vórtice uniforme dentro de la celda, confirmando que la configuración del flujo y la posición del cátodo en el centro (como se detalla en la Figura 10) permitiendo un movimiento fluido.
- **Recirculación del fluido:** Se comprueba que el agua fluya desde la salida de la tapa superior de la celda hacia el tanque de almacenamiento, completando el ciclo de

recirculación sin interrupciones. Asimismo, se observa que el retorno al tanque sea continuo y sin acumulación excesiva en alguna sección del sistema.

- **Inspección de fugas:** Se realiza una inspección minuciosa de todas las uniones roscadas (en el tanque, la bomba, el flujómetro y la celda) y los sellos de adhesivo químico (en la tapa inferior y las rendijas) para detectar posibles fugas. Enfatizando la atención a las conexiones críticas, observando y utilizando un papel absorbente para identificar filtraciones mínimas.

4.6.2. *Prueba 2*

Validados los aspectos hidráulicos y mecánicos de la celda, se procedió a realizar la prueba electroquímica según los parámetros detallados en la Tabla 17.

Primeramente, se toma las medidas de seguridad, utilizando los EPP necesarios para evitar algún accidente. Se prepara 5 litros de solución electrolítica de sulfato de cobre con una concentración de 10 g Cu/L, con los siguientes componentes:

196 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

270 ml de ácido sulfúrico

5 L de agua destilada

Primero, vertimos 2.5 litros de agua destilada en un vaso de precipitados, posteriormente agregamos los 196 gr de sulfato de cobre pentahidratado, y con ayuda de una varilla disolvemos los sólidos hasta lograr una mezcla homogénea (Figura 26). Posteriormente vertimos los 270 ml de ácido sulfúrico y agitamos la mezcla con ayuda de la varilla, para finalmente agregar agua destilada hasta completar los 5 litros de solución de sulfato de cobre, y continuamos agitando para obtener una mezcla homogénea.

La solución preparada a temperatura ambiente se vierte en el tanque de recirculación y se enciende la bomba, una vez se pueda ver que la solución se encuentra en constante circulación por toda

la celda electrolítica, se enciende la fuente de alimentación, donde se tendrá el ingreso de 10 A y 2.56 V para energizar los electrodos.

Tabla 17

Resumen de parámetros de operación

PARAMETRO	VALOR	UNIDAD
Intensidad de Corriente	10	Amperios
Potencial eléctrico	2.56	voltios
Flujo	9.5	Litros por minuto
Concentración del electrolito	10	Gramos de cobre/litro
Tiempo	60	Minutos

Por un periodo de 1 hora se deja funcionando la bomba, así como también la fuente de alimentación, pasado el periodo de prueba, iniciamos a pagando la fuente de alimentación y luego la bomba. E iniciamos con el desagüe manual de la solución de sulfato de cobre de la celda electrolítica figura 27.

Figura 26

Preparación de la solución de sulfato de cobre



Nota: En la figura se muestra cómo se preparó la solución de sulfato de cobre con una concentración de 10 g Cu/L, para realizar la prueba de electrolisis.

4.7. Resultados

Finalizada la prueba experimental del funcionamiento de la celda. Desmontamos los cables y destapamos la celda electrolítica, logrado retirar con éxito los electrodos, como se muestra en la figura 28 y figura 29.

Figura 27

Proceso de vaciado de la solución de sulfato de cobre



Nota: En la figura se muestra cómo se desaguó la solución de sulfato de cobre de la celda electrolítica.

Figura 28

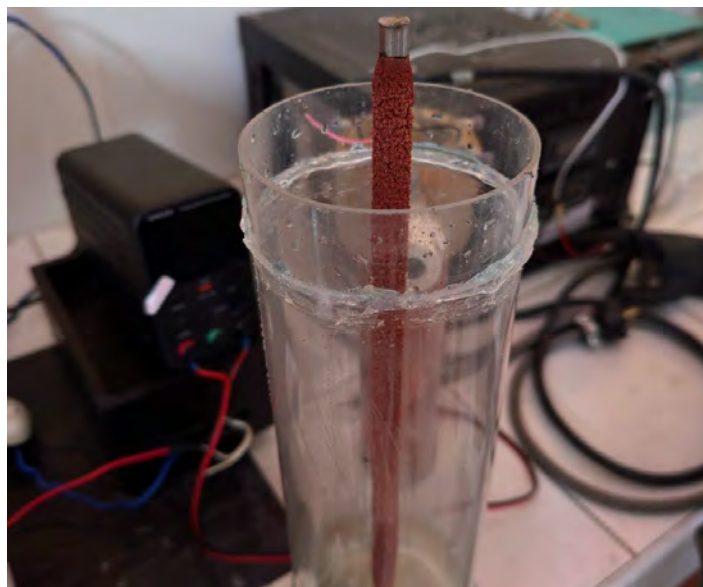
Proceso de retiro de los electrodos de la celda



Nota: En la figura se muestra cómo retiramos el ánodo junto con la tapa superior para poder observar mejor el depósito de cobre.

Figura 29

Cobre depositado en el cátodo



Nota: En la figura se muestra los polvos de cobre depositado en el cátodo de acero inoxidable.

Para determinar la efectividad de la electrodeposición, con ayuda de una varilla retiramos una parte del cobre depositado en el cátodo y lo colocamos en una luna de reloj de vidrio, figura 30.

Figura 30

Polvos de cobre depositado



Nota: En la figura se muestra una parte de los polvos de cobre depositados en el cátodo de acero inoxidable.

CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó una celda electrolítica tipo vórtice a nivel laboratorio para la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNSAAC, y se demostró su operatividad para la obtención de polvos de cobre y permitiendo la contribución en el desarrollo de nuevas investigaciones.

Se determinaron los siguientes materiales para la celda electrolítica tipo vórtice tomando en cuenta los criterios de compatibilidad electroquímica, resistencia mecánica y durabilidad frente a soluciones ácidas. Se utilizó cobre T2 para el ánodo garantizando la conductividad, acero inoxidable AISI 304 para el cátodo, ofreciendo resistencia a la corrosión y una superficie favorable para la formación de depósitos metálicos. El cuerpo de PMMA y las tapas de ABS proporcionando transparencia para la visibilidad del flujo operativo de la celda, estabilidad estructural y resistencia química, favoreciendo la observación del vórtice y la contención segura del electrolito. Complementariamente, las tuberías de PVC y una bomba de diafragma fabricada con polipropileno reforzado, asegura el funcionamiento adecuado del sistema hidráulico y la resistencia a la corrosión.

Se determinaron las dimensiones de la celda mediante criterios electroquímicos, hidráulicos y geométricos. La celda está compuesta por un ánodo cilíndrico de 74 mm de diámetro y 300 mm de altura, un cátodo de 10 mm de diámetro y 350 mm de altura, y un cuerpo cilíndrico de 100 mm de diámetro, complementado con una tapa superior y una boquilla helicoidal. El sistema se completó con una bomba de diafragma de 12 V con un caudal de 9.5 L/min.

Se definieron las siguientes condiciones operativas para el funcionamiento de la celda electrolítica tipo vórtice. Se trabajó con una intensidad de corriente de 10 A y un potencial eléctrico de 2.56 V, en una concentración del electrolito de 10 g Cu/L. Asimismo, la temperatura de operación fue de 20 °C (temperatura ambiente) para evitar la formación de cobre laminar, en conjunto con el flujo inducido por la bomba, cuyo caudal de 9.5 L/min mantuvo un vórtice constante que evitó el agotamiento de iones cerca del cátodo. La distancia entre electrodos de 3 cm contribuyó a mantener una resistencia interna controlada y un campo eléctrico uniforme.

RECOMENDACIONES

Concluido el diseño y construcción de la celda electrolítica tipo vórtice, se identificaron las siguientes recomendaciones orientadas a mejorar el desempeño del equipo, optimizar su operación y avanzar hacia su estandarización como herramienta de laboratorio en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNSAAC:

- **Optimización de parámetros operacionales:** Realizar ensayos modificando los parámetros operacionales de intensidad de corriente, potencial eléctrico, tiempo de electrólisis y temperatura del electrolito.
- **Incorporación de sistemas de monitoreo y control:** Implementar un termómetro digital o sensor de temperatura en la celda con el propósito de monitorear y controlar la temperatura del electrolito. De igual forma, se recomienda instalar un potenciómetro o variador de frecuencia en la bomba de diafragma para regular el caudal del electrolito.
- **Estandarización del equipo:** Desarrollar un manual técnico estandarizado que incluya especificaciones detalladas del diseño, operación estándar y mantenimiento preventivo de la celda electrolítica tipo vórtice.
- **Ampliación de la instrumentación:** Considerar la integración de medidores de pH, conductividad y flujo en el sistema, así como la posibilidad de incorporar un sistema de adquisición de datos (DAQ) básico.

REFERENCIAS

- Ashby, M. F., y Jones, D. R. H. (2005). *Materiales para ingeniería 1: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño*. REVERTE.
- Atkins, P., y de Paula, J. (2010). *Physical chemistry* (9th ed.). W. H. Freeman and Company.
- Avramović, L., Maksimović, V. M., Bašćarević, Z., Ignjatović, N., Bugarin, M., Marković, R., y Nikolić, N. D. (2019). *Influence of the shape of copper powder particles on the crystal structure and some decisive characteristics of the metal powders*. *Metals*, 9(1), Article 56. <https://doi.org/10.3390/met9010056>
- Ballester, A., Verdeja, L. F., y Sancho, J. P. (2000). *Metalurgia extractiva: Volumen 1. Fundamentos*. Editorial Síntesis.
- Bard, A. J., y Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Barragán, J. A., Ponce de León, C., Alemán Castro, J. R., Peregrina-Lucano, A., Gómez-Zamudio, F., y Larios-Durán, E. R. (2020). *Copper and antimony recovery from electronic waste by hydrometallurgical and electrochemical techniques*. *ACS Omega*, 5(21), 12355–12363. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01100>
- Budynas, R. G., y Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (8ª ed.). McGraw-Hill.
- Callister, W. D., y Rethwisch, D. G. (2014). *Ciencia e ingeniería de materiales*. REVERTE.
- Chang, R., y College, W. (2008). *Fisicoquímica para las ciencias químicas y biológicas* (3ª ed.). McGraw-Hill.
- Eftekhari, A. (2003). *Improving Cu metallization of Si by electrodeposition under centrifugal fields*. *Microelectronic Engineering*, 69(1), 17–25. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(03\)00224-7](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(03)00224-7)

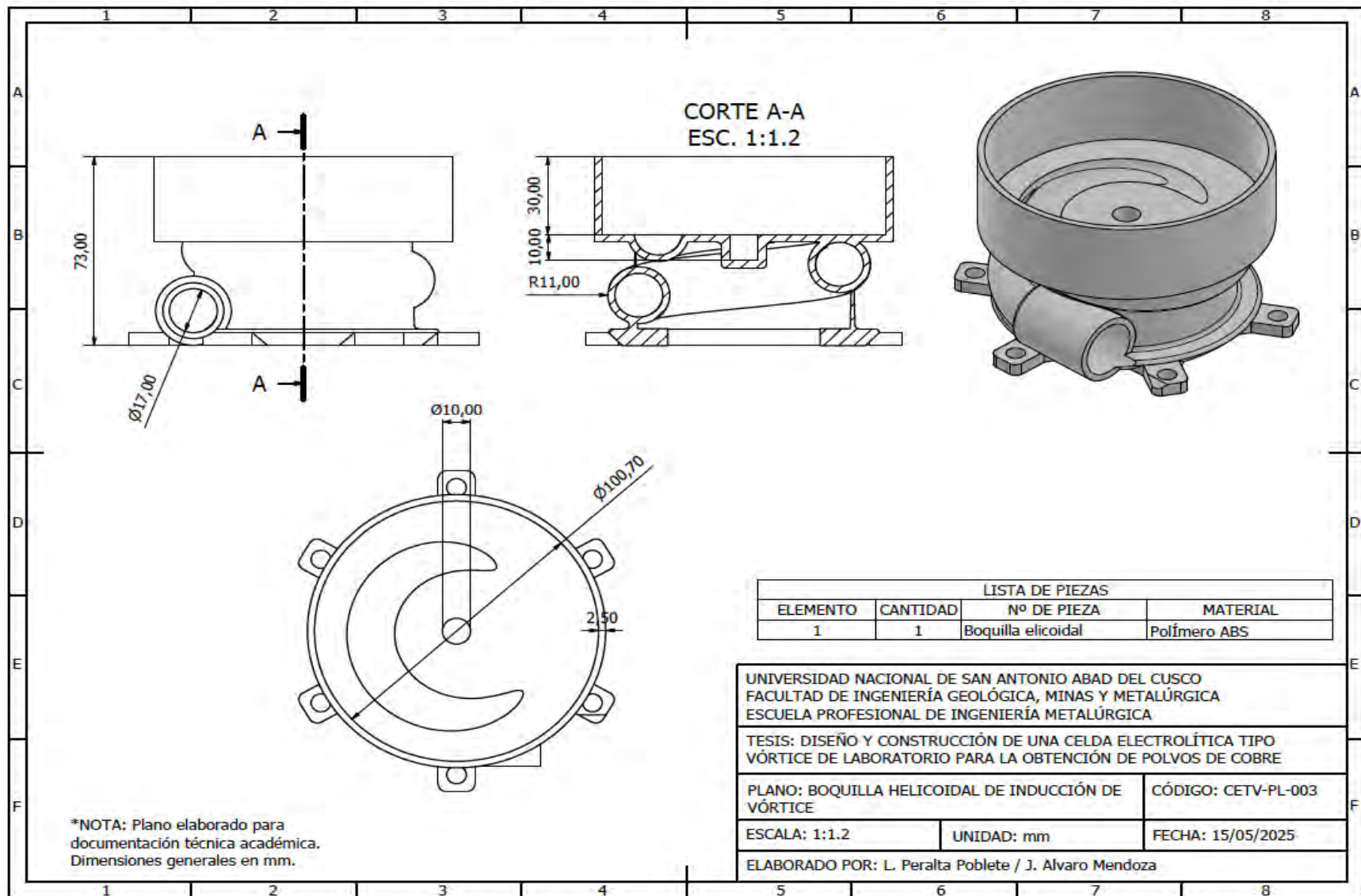
- Gómez, B. (2022, 30 de junio). *Qué es una fuente de alimentación regulable, cómo funciona y cómo hacer una*. *Profesional Review*. <https://www.profesionalreview.com/2022/06/30/fuente-de-alimentacion-regulable/>
- Gutiérrez Cuba, C. (2023). *Optimización de extracción de cobre de soluciones empleando electrodeposición ciclónica [Trabajo de investigación]*. Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ingeniería Química.
- Ibl, N. (1980). *Some theoretical aspects of pulse electrolysis*. *Surface Technology*, 10(2), 81–104. [https://doi.org/10.1016/0376-4583\(80\)90056-4](https://doi.org/10.1016/0376-4583(80)90056-4)
- JXSC Machine. (2024, 12 de septiembre). *Cyclonic electrolytic technology and copper recovery system*. <https://www.jxscmachine.com/>
- Nasirpouri, F. (2016). *Fundamentals and principles of electrodeposition*. In Springer series in surface sciences (pp. 75–121). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44923-4_3 (si tienes el DOI del capítulo; de lo contrario, omite el DOI).
- Newman, J., y Thomas-Alyea, K. E. (2012). *Electrochemical systems* (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- Pletcher, D., y Walsh, F. C. (1990). *Industrial electrochemistry* (2nd ed.). Springer Science+Business Media.
- Popov, K. I. (2002). *Fundamental aspects of electrometallurgy*. Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Sampieri, R. H., y Mendoza, C. P. (2023). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (2ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Serway, R. A., y Jewett, J. W. (2018). *Física para ciencias e ingeniería* (10ª ed., Vol. II). Cengage.
- Shokobayev, N. M., Nurtazina, A. E., Kholkin, O. S., Abilmagzhanov, A. Z., Ivanov, N. S., y Adelbaev, I. E. (2022). *Obtaining of copper powder by method of a vortex electrolysis from acid sulphate electrolytes*. *Results in Engineering*, 16, Article 100604. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100604>
- Vanegas U., L. V. (2018). *Diseño en ingeniería mecánica*. McGraw-Hill.

- Wang, X., Yang, H., Yu, X., Hu, C., Hu, J., Li, R., y Zhang, Y. (2022). *Functional metal powders: Design, properties, applications, and prospects*. *Materials Science and Engineering: B*, 280, Article 115708. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115708>
- Wang, Y., y Wei, Y. (2022). *Effect of Zn^{2+} on the extraction of copper by cyclone electrowinning from simulated copper-containing electrolyte*. *Separation and Purification Technology*, 282, Article 120014. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120014>
- White, F. M. (2004). *Mecánica de fluidos*. McGraw-Hill.
- Xu, H., y Wei, Y. (2020). *Extracting of copper from simulated leaching solution of copper-cadmium residues by cyclone electrowinning technology*. *Hydrometallurgy*, 194, Article 105298. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105298>

ANEXOS

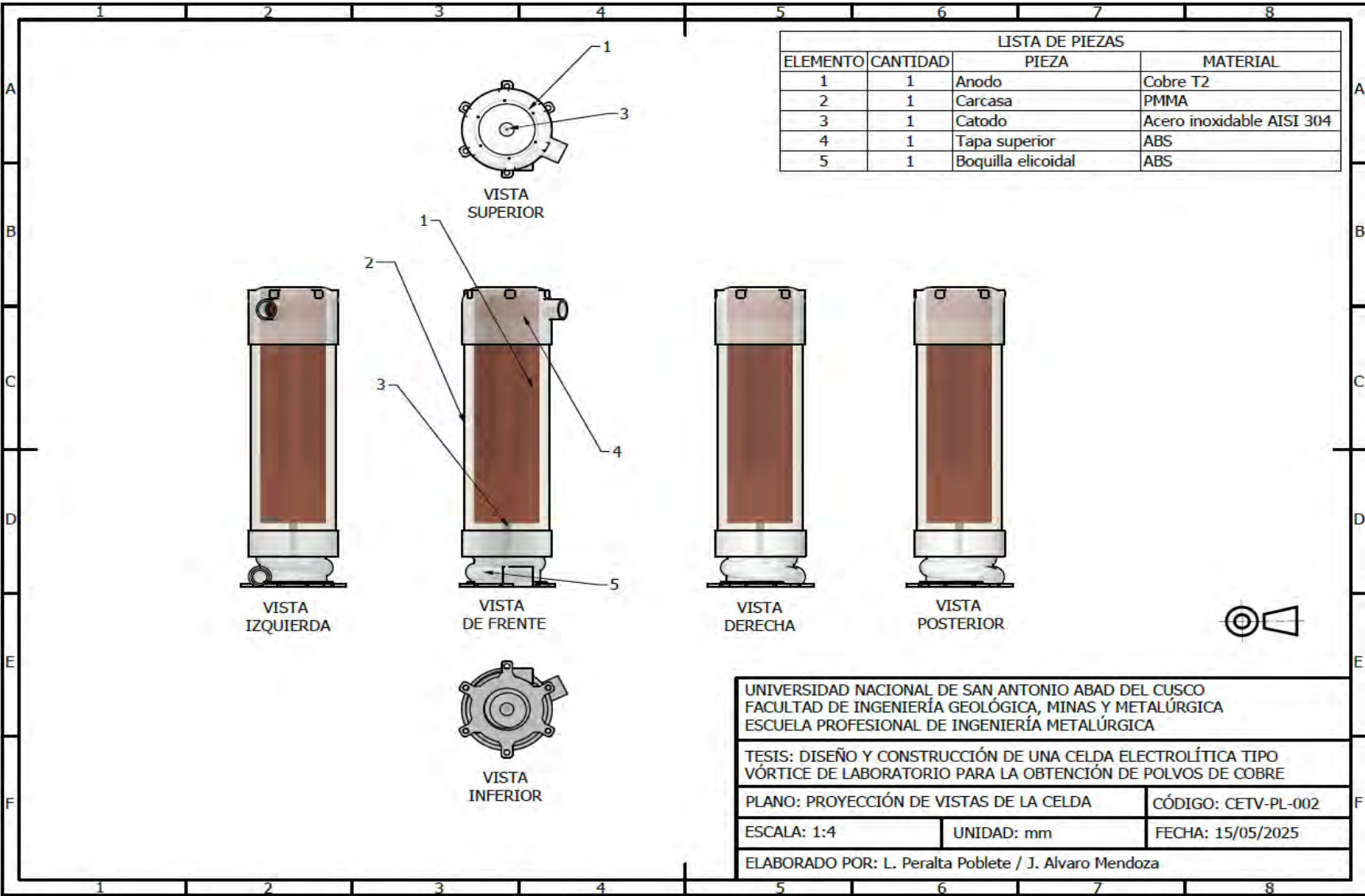
ANEXO. A

Boquilla helicoidal de inducción de vórtice



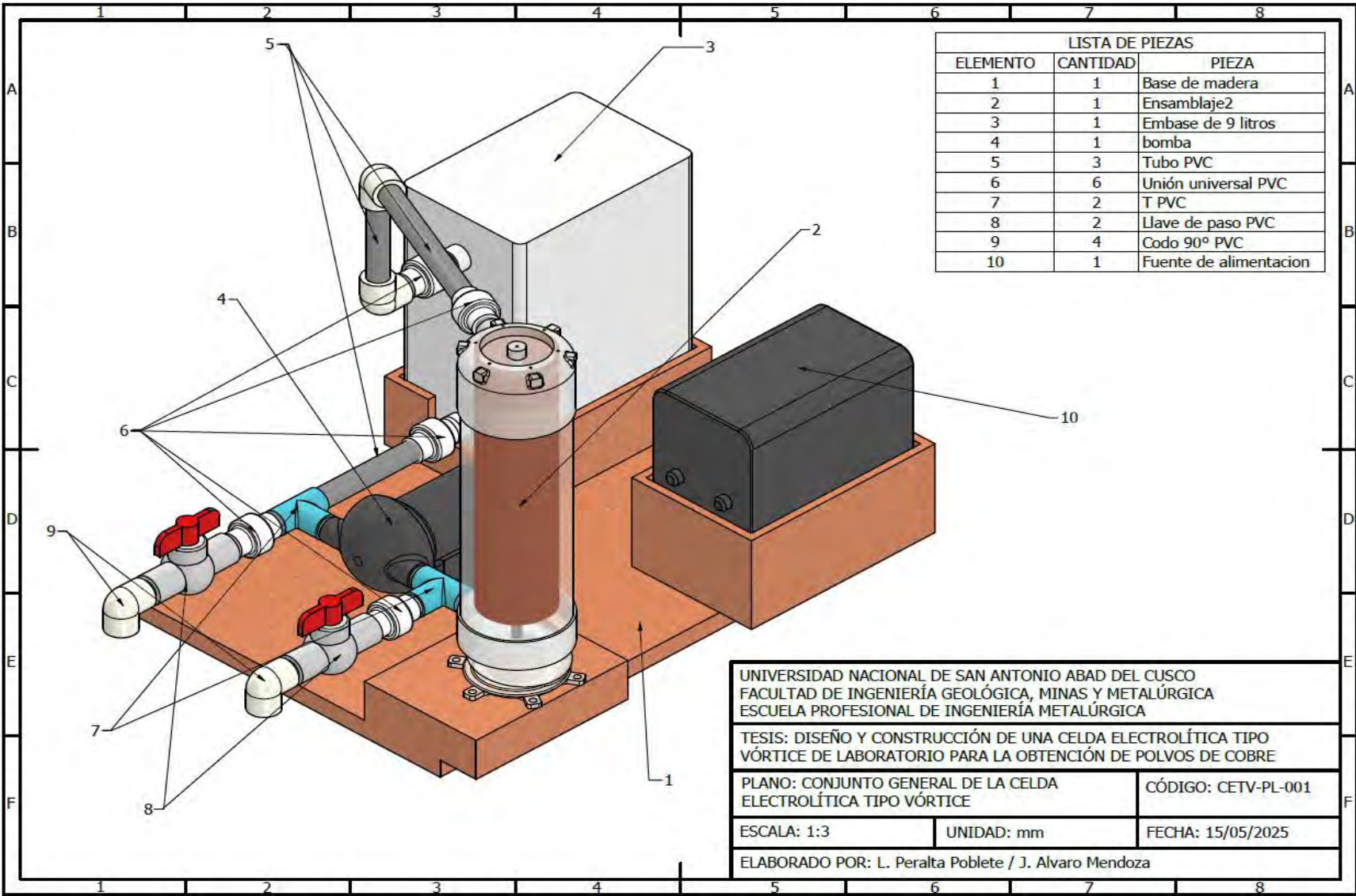
ANEXO. B

Proyección de vistas de la celda



ANEXO. C

Conjunto general de la celda electrolítica tipo vórtice



ANEXO. D

Ficha técnica del cobre para el ánodo

Technical Datasheet C11000



C11000 (Cu-ETP)

18 08 US

Comparable standards:

UNS C11000 • EN CW004A • JIS C110

Aurubis designations:

C110 • PNA211

Description

Electrolytic Tough Pitch Copper (ETP) is the most widely used of the coppers because of its combination of electrical and thermal conductivity, corrosion resistance, workability and aesthetic beauty. The superb corrosion resistance makes it a favored material for building applications and when exposed to weather for long periods, even centuries, this copper will develop a relatively impervious protective film which eventually becomes the familiar green patina of weathered copper. The beauty and ease of finishing make this copper a favorite for articles in the home.

Composition

Cu*
[%]
99.90 min
*) Incl. Ag

Physical properties

Melting point	Density	Specific heat cap. at 20°C	Electrical cond.	Thermal cond. at 20°C	Mod. of elasticity	Coef. of therm exp. at 20°C
[°F] [°C]	[lb/in ³] [g/cm ³]	[Btu/lb °F] [J/kgK]	[%IACS] [MS/m]	[Btu/ft h °F] [W/mK]	x1000 ksi [GPa]	[10 ⁻⁶ /°F] [10 ⁻⁶ /K]
1981 1083	0.323 8.9	0.092 0.384	100 58	226 381	17 117	9.8 17.6

The specified conductivity applies to the soft condition only

Mechanical properties

	Tensile strength Rm	Yield strength Rp0.2 nominal	Elongation 2" nominal	Hardness nominal HR30T HV	min. bend ratio 90°		min. bend ratio 180°	
	[ksi] [MPa]	[ksi] [MPa]	[%]		GW	BW	GW	BW
Soft	26-38 179-262	10 69	35		0.0	0.0	0.0	0.0
H02 (1/2H)	37-46 255-317	37 255	20	50 90	0.0	0.5	0.0	1.0
H04 (H)	43-52 297-359	45 310	8	58 100	1.0	2.0	2.0	3.0
H06 (EH)	47-56 324-386	50 349	3	60 105	2.0	3.0	2.5	
H08 (SH)	50-58 345-400	52 359	3	63 110	3.0		4.0	
H10 (ES)	52 min 358 min	54 373	2	61 min 112 min				

Other tempers are available upon request.

GW bend axis transverse to rolling direction. BW bend axis parallel to rolling direction

**Fabrication
properties**

Electrical and thermal conductivity	superior
Corrosion resistance	excellent
Formability	good

Typical uses

Architectural metal-work, gutters, flashing, roofing, downspouts, perforated metal screens, automotive and industrial radiators, electrical conductors, contacts, terminals, chemical process equipment, vats, kettles, pans, pots, cooking utensils, electric percolator bodies, lamps, dishes, and planters for home and office.

**Applicable
specifications**

ASTM B152, B370, ASME SB152

ANEXO. E

Ficha técnica del acero inoxidable para el cátodo

FICHA TECNICA

ACERO INOXIDABLE

304 / 304L



Aceros Inoxidables	Normas		
	AISI	W. Nr.	DIN
Austeníticos	304	1.4301	X5CrNi18-10
	304L	1.4306	X2CrNi19-11

Aplicaciones

Debido a su buena resistencia a la corrosión, conformado en frío y soldabilidad, este acero es usado extensivamente para la fabricación de utensilios domésticos, lavavajillas, cuchillería, bienes de consumo, arquitectura e industria automotriz. Además, es utilizado en la construcción de estructuras y/o contenedores para las industrias procesadoras de leche, cerveza, vino, alimentos, etc. así como en la industria química de producción del nitrógeno. Para la calidad 304L (bajo contenido de carbono) se puede aplicar en la producción de ácido nítrico, industria farmacéutica e ingeniería nuclear.



Composición Química (Valores Promedio, %)

Tipo Acero	C	Cr	Ni
AISI 304	≤0,07	17 - 19,5	8 - 10,5
AISI 304L	≤0,03	18 - 20	10 - 12

Características del Acero

Acero inoxidable austenítico, aleado con Cr y Ni y bajo contenido de C que presenta una buena resistencia a la corrosión. En la condición de suministro resiste a la corrosión intergranular en el rango de hasta 300°C y 350° C para la calidad 304L. No se requiere un tratamiento posterior al proceso de soldadura; tiene propiedades para embutido profundo, no es templeable ni magnético.

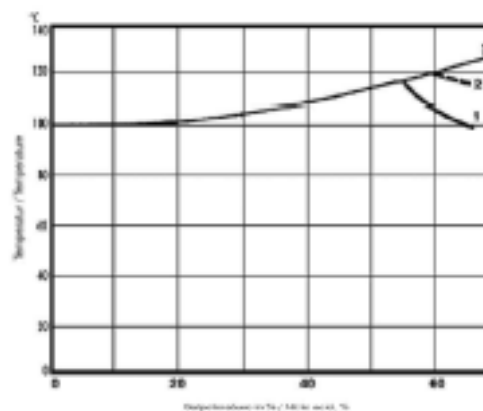
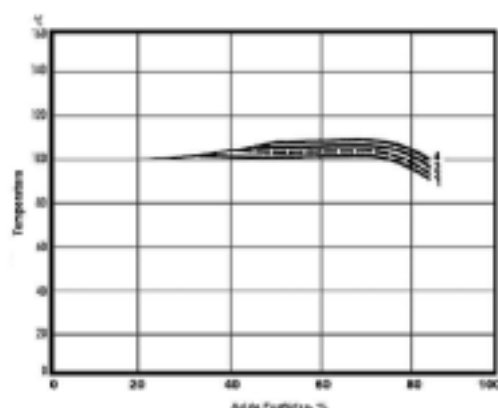
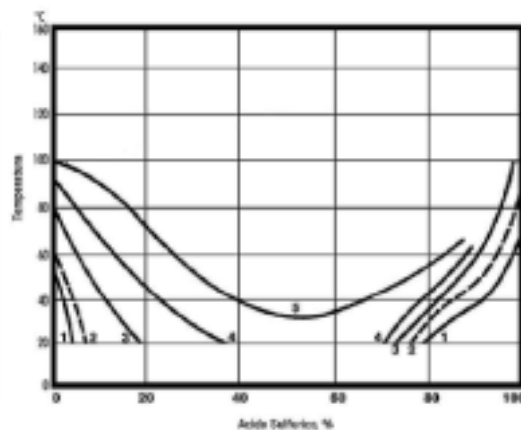
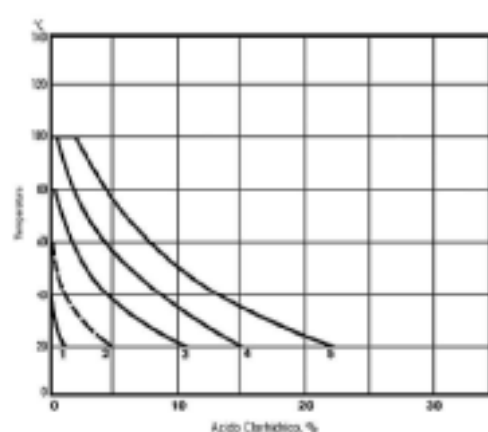
Puede ser fácilmente trabajado en frío (p.ej. doblado, cilindrado, embutido profundo, etc.). Sin embargo, el alto grado de endurecimiento que alcanza por trabajo en frío, comparado con aceros de baja aleación, hacen requerir de mayores



esfuerzos para su proceso de conformado.

Resistencia a la corrosión.

En los diagramas se observan las pérdidas de peso, determinadas experimentalmente para diferentes probetas atacadas con concentraciones variables para distintos ácidos en función de la temperatura. Las curvas representan la pérdida de peso de 0,1 0,3 1,0 3,0 y 10,0 gr/m²·Hr. Generalmente una pérdida de peso de 0,3 gr/m²·hr (línea segmentada) se considera en el límite para ser considerado económicamente viable un acero inoxidable.



Curva	Pérdida de peso
1	0,1 gr/m ² ·hr.
2	0,3 gr/m ² ·hr.
3	1,0 gr/m ² ·hr.
4	3,0 gr/m ² ·hr.
5	10,0 gr/m ² ·hr.

Propiedades del Acero

Propiedades mecánicas

Temperatura ambiente

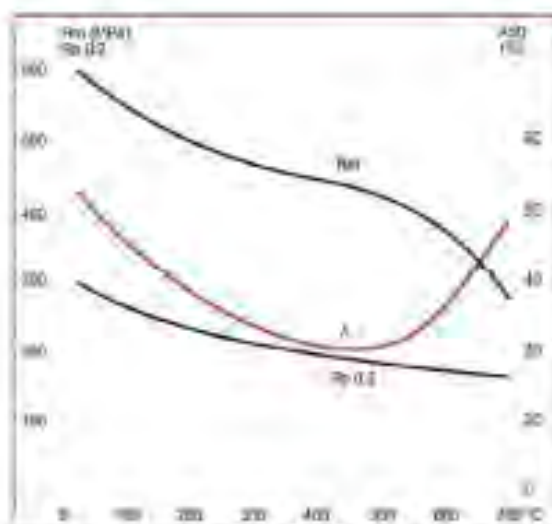
Tipo Acero	Rango de dimensiones	Límite Elástico 0,2% ($R_{p0.2}$) min. N/mm ²	Resistencia a la tracción (R_m) N/mm ²	Elongación (A_5) min. %
304	Laminado en frío e ≤ 6 mm.	≥ 230	540 - 750	≥ 45
	Laminado en caliente e ≤ 6 mm.	≥ 210	520 - 720	≥ 45
304L	Laminado en frío e ≤ 6 mm.	≥ 220	520 - 670	≥ 45
	Laminado en caliente e ≤ 6 mm.	≥ 200	520 - 670	≥ 45

Temperatura variable

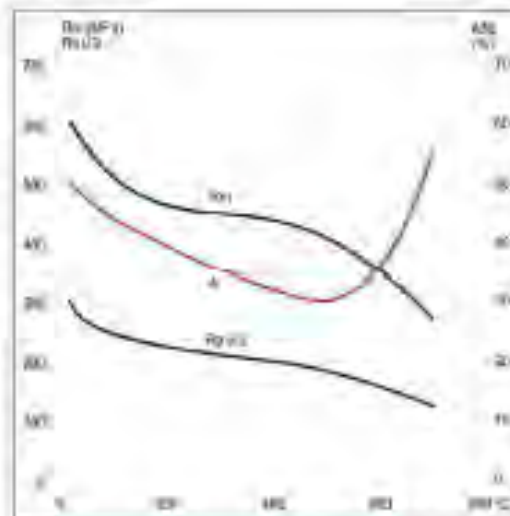
Tipo Acero	Temperatura °C	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
304	Límite elástico	157	142	127	118	110	104	98	95	92	90
304L	0,2% ($R_{p0.2}$) min. N/mm ²	147	132	118	108	100	94	89	85	81	80

Efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas

AISI 304

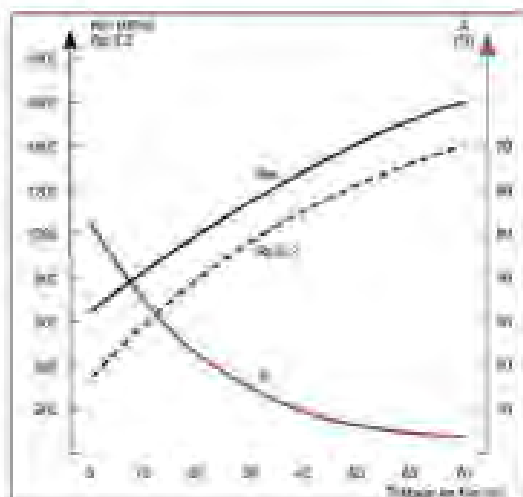


AISI 304L

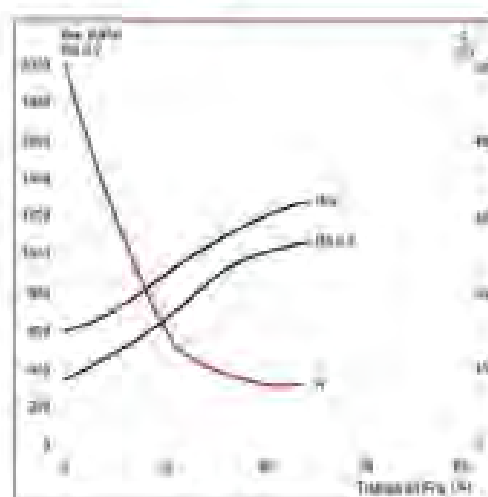


Efecto de trabajo en frío en las propiedades mecánicas

AISI 304



AISI 304L



Propiedades físicas

Densidad a 20°C kg/dm ³	Conductividad Térmica 20 °C W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Calor Específico 20°C J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Resistencia Eléctrica 20°C Ω·mm ² /m
7,9	15	500	0,73

Modulo de elasticidad kN/mm²

20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
200	194	186	179	172	165

Coefficiente de expansión térmica $\cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$ entre 20 °C y

	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
	16	17	17	18	18

Catálogo Comercial

Tratamiento Térmico

Trabajo en caliente °C	Enfriamiento	Tratamiento térmico °C	Enfriamiento	Estructura
1150 - 850	aire	1000 – 1100	Agua, aire forzado.	Austenita con un contenido menor de ferrita

Recomendaciones sobre mecanizado

Los parámetros de corte que se encuentran a continuación deben ser considerados como valores guía. Estos valores deberán adaptarse a las condiciones locales existentes.

TORNEADO

Parámetros de corte	Torneado con metal duro		Torneado con acero rápido
	Torneado de desbaste	Torneado fino	Torneado fino
Velocidad de corte (vc) m/min.	170 - 145	160 - 210	25 - 45
Avance (f) mm/r	0,2 - 0,4	0,1 - 0,2	0,1 - 0,5
Profundidad de corte (ap) mm.	1 - 4	0,5 - 1	0,5 - 3
Mecanizado grupo ISO	M20 - M30	M10	-

Fresado con metal duro

Parámetros de corte	Fresado con metal duro	
	Fresado de desbaste	Fresado en fino
Velocidad de corte(vc) m/min.	60 - 120	100 - 155
Avance (fz) mm/diente	0,2 - 0,3	0,2
Profundidad de corte (ap) mm.	≤ 4	≤ 0,6
Mecanizado grupo ISO	M20 - M30	M10

Taladrado con broca HSS

Diámetro	20	30	40
Velocidad de corte (vc) m/min.	200	200	200
Avance (f) mm/r	0,01	0,12	0,15