

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR
EXPERIMENTAL TIPO FILTRO PRENSA PARA OBTENCIÓN
ELECTROLÍTICO DE ZINC A PARTIR DE SULFURO
POLIMETÁLICO (BLENDA)**

Por:

EDWIN LOPEZ MOYA

Modalidad de graduación: “Investigación Aplicada” presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química.

Septiembre de 2018

Tarija-Bolivia

V°B°

M.Sc. Ing. Ernesto Álvarez Gozávez
DECANO FAC. CS. Y TECN.

Lic. Elizabeth Castro Figueroa
VICEDECANA FAC. CS. Y TECN.

APROBADO POR:

TRIBUNAL:

M.Sc. Ing. Ignacio E. Velásquez Soza

M.Sc. Ing. René E. Michél Cortés

Ing. Alberto Sossa Morales

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

A mis abuelos Luís Moya (†) y Pedro Lopez (†) ex mineros, quienes me transmitieron y enseñaron, a enfrentar los obstáculos de la vida; con constante esfuerzo y sabiduría.

A mis padres terrenales Bernardino Lopez Isla y Victoria Moya Santos por su apoyo constante, su gran amor y paciencia, ya que sin ellos sería un galeón sin timón, en este maravilloso mundo.

*...voluntad digno, esfuerzo propio
hacen dueño de ti mismo, un
hombre avaluado; con preciado
conocimiento y sabiduría...*

NDICE

	Página
Advertencia	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Pensamiento	iv
Resumen	v

INTRODUCCIÓN

Antecedentes	1
Justificación.....	3
Objetivos	7
Objetivo General	7
Objetivos específicos	7

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1. Consideraciones teóricas.....	8
1.1 Fundamentos de electroquímica	8
1.2. Termodinámica de los procesos electroquímicos	9
1.2.1. Potencial y corriente.....	9
1.2.2. Electrodo y celda en equilibrio.....	10
1.3 Leyes de Faraday.....	12
1.4 Cinética de los procesos electroquímicos	13
1.5 Mecanismos de transporte.....	15
1.5.1 Control por transferencia de masa.....	15
1.5.2 Control por transferencia de carga	17
1.6 Tecnología de los Reactores Electroquímicos	18
1.6.1 Reactores experimentales de macroelectrólisis.....	18
1.6.2 Parámetros operacionales de los reactores electroquímicos	19

1.6.3 Propiedades de los reactores electroquímicos.....	20
1.7 Reactor de flujo pistón	21
1.7.1 Modelo matemático para un reactor de flujo pistón con recirculación	22
1.8 Flujo a través de una sección rectangular	23
1.9 Membranas de intercambio iónico	27
1.10 El zinc.....	29
1.10.1 El proceso electrolítico de obtención de zinc.....	30
1.10.2 Extracción de mineral	32
1.10.3 Molienda	32
1.10.4 Lixiviación atmosférica.....	33
1.10.5 Neutralización	34
1.10.6 Separación sólido - líquido	34
1.10.7 Purificación y concentración de la solución.....	35
1.10.8 Electrólisis.....	35

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Descripción y caracterización de la materia prima.....	37
2.2 Descripción del método de investigación	38
2.3 Diseño del prototipo experimental.....	41
2.3.1 Preparación de la solución electrolítica	41
2.3.2 Diseño preliminar de la celda.....	46
2.3.2.1 Parámetros característicos de los compartimentos de la celda.....	46
2.3.2.2 Dimensionamiento de la placa distribuidor de flujo.....	47
2.3.4 Electrodo o material catalítico	47
2.4 Materiales utilizados para la construcción del prototipo	48
2.4.1 Material de los compartimentos y el distribuidor de flujo.....	48
2.4.2 Material de electrodos.....	49
2.4.3 Material de membrana	50
2.5 Instalación eléctrica.....	51

2.6 Diseño factorial del experimento.....	53
2.6.1 Factores en estudio.....	53

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados obtenidos.....	55
3.2 Análisis del funcionamiento del reactor.....	57
3.3 Análisis de las principales variables que influyen en el reactor	61
3.4 Calidad del producto obtenido del reactor experimental	64
3.4 Análisis estadístico del diseño factorial	65
3.4.1 Análisis de la varianza	65
3.4.2 Análisis de regresión	68
3.5 Diseño definitivo del reactor.....	70
3.5.1 Cálculo de las dimensiones internas de los compartimentos de la celda	71
3.5.2 Cálculo de los parámetros geométricos característicos	72
3.5.3 Cálculo de dimensiones de la placa distribuidor de flujo.....	73
3.6 Especificaciones técnicas del reactor experimental	77

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones	83
4.2 Recomendaciones.....	84
Referencias bibliográficas.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla I-1 Potenciales de electrodo estándar.....	11
Tabla I-2 Coeficientes de difusión de electrolitos a diferentes concentraciones....	16
Tabla I-3 Densidades de corriente de intercambio	17

Tabla I-4 Clasificación de los reactores electroquímicos.....	20
Tabla I-5 Reactores electroquímicos según modo de operación	21
Tabla I-6 Grupos adimensionales utilizados en transporte de materia.....	25
Tabla I-7 Correlaciones de números adimensionales	25
Tabla I-8 Coeficiente de descarga para platos perforados y boquillas	27
Tabla I-9 Fuerza impulsora de transporte a través de membranas	28
Tabla I-10 Tamaños típicos de menas para lixiviación	32
Tabla I-11 Métodos de lixiviación	33
Tabla I-12 Impurezas en la disolución de lixiviación del zinc.....	35
Tabla II-1 Descripción y características físicas de Sulfuro Polimetálico	38
Tabla II-2 Cuantificación Química del Sulfuro Polimetálico (Blenda)	38
Tabla II-3 Condiciones para la preparación de la solución electrolítica.....	41
Tabla II-4 Características fisicoquímicas de la solución electrolítica.....	45
Tabla II-5 Datos preliminares de diseño de la celda.....	46
Tabla II-6 Dimensiones internas de los compartimentos de la celda	46
Tabla II-7 Parámetros geométricos de los compartimentos de la celda.....	47
Tabla II-8 Dimensionamiento del distribuidor de flujo de la celda.....	47
Tabla II-9 Propiedades fisicoquímicas de Politetrafluoroetileno	49
Tabla II-10 Características fisicoquímicas del electrodo de trabajo.....	49
Tabla II-11 Características fisicoquímicas del contra electrodo.....	50
Tabla II-12 Características de la membrana de intercambio catiónico	50
Tabla II-13 Factores de diseño en estudio	53
Tabla II-14 Matriz de diseño con unidades codificadas de los factores en estudio ...	53
Tabla II-15 Diseño factorial 2^3 con niveles operativos de los factores y su réplica...54	54
Tabla III-1 Resultados obtenidos de cada combinación y su respectiva réplica	56
Tabla III-2 Resultados obtenidos de la aplicación del reactor experimental que representa mayor eficiencia.....	58
Tabla III-3 Coeficiente de transferencia de masa	61
Tabla III-4 Resultado del análisis del zinc electrolítico obtenido.....	64
Tabla III-5 Datos con unidades codificadas de los factores de entrada y el valor	

de variable respuesta para el análisis de varianza	65
Tabla III-6 Factores inter-sujetos.....	66
Tabla III-7 Análisis de varianza (ANOVA).....	66
Tabla III-8 Variables introducidas para el análisis de regresión	68
Tabla III-9 Resumen del modelo de análisis de regresión	68
Tabla III-10 Análisis de varianza para el análisis de regresión	69
Tabla III-11 Coeficientes del modelo matemático.....	69
Tabla III-12 Datos experimentales para el diseño definitivo.....	70
Tabla III-13 Dimensiones internos de los compartimentos de la celda para diseño final	71
Tabla III-14 Parámetros geométricos de los compartimentos de la celda para diseño final.....	73
Tabla III-15 Dimensionamiento del distribuidor de flujo de la celda para diseño final	74
Tabla III-16 Especificaciones del reactor experimental tipo filtro prensa para obtención electrolítico de zinc	77
Tabla III-17 Análisis económico del proyecto	79

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1-1 Sobrepotencial de evolución de hidrógeno en diferentes materiales catódicos.....	14
Figura 1-2 Escala de la tecnología electroquímica	18
Figura 1-3 Proceso electroquímico con recirculación	22
Figura 1-4 Flujo a través de una sección rectangular	23
Figura 1-5 Caída de presión para flujo canal.....	24
Figura 1-6 Membrana de intercambio iónico	29
Figura 1-7 Diagrama de flujo del proceso electrolítico de obtención de zinc	31
Figura 2-1 Ubicación geográfica del yacimiento de sulfuro polimetálico	37
Figura 2-2 Descripción de Sulfuro Polimetálico (Blenda)	37

Figura 2-3 Diagrama Flujo de Proceso (DFP) del sistema experimental.....	39
Figura 2-4 Diagrama de flujo que muestra la secuencia para determinar variables respuesta.....	40
Figura 2-5 Reactor INFORS para la disolución del metal de interés.....	42
Figura 2-6 Diagrama de predominancia Eh - pH del sistema Zn - H ₂ O.....	43
Figura 2-7 Diagrama de predominancia Eh - pH del sistema Fe - H ₂ O	43
Figura 2-8 Diagrama de bloques preparación de la disolución electrolítica	44
Figura 2-9 Disolución electrolítico obtenido	45
Figura 2-10 Compartimentos de la celda concluida	51
Figura 2-11 Conexión eléctrica del sistema experimental.....	52
Figura 2-12 Montaje del sistema experimental	52
Figura 3-1 Morfología depósitos obtenidos de los ensayos	55
Figura 3-2 Funcionamiento del reactor experimental.....	57
Figura 3-3 Diagrama de contorno, perfil de concentración en función del potencial medido y el tiempo	59
Figura 3-4 Comparación de los perfiles de concentración	60
Figura 3-5 Flujo hidrodinámico a través de una sección rectangular	61
Figura 3-6 Coeficiente de transferencia de masa.....	62
Figura 3-7 Densidad de corriente en función del sobre potencial catódico.....	63
Figura 3-8 Zinc electrolítico obtenido	64
Figura 3-9 Gráfico normal de efecto estándar para Eficiencia de corriente	67
Figura 3-10 Despiece del reactor experimental tipo filtro prensa de obtención electrolítico de zinc	78

ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
Anexo 1 Proceso hidrometalúrgico para preparación de disolución electrolítica ..	87
Anexo 2 Parámetros fisicoquímicos de electrolito base y de electrolito soporte ...	94
Anexo 3 Construcción de los compartimentos de la celda electrolítico.....	95
Anexo 4 Funcionamiento del reactor experimental de obtención electrolítico de	

NOMENCLATURA, ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA UTILIZADA**Símbolos Latinos.**

A	Área del electrodo [cm^2]
A_e	Área específica del electrodo [cm^2]
A_{td}	Área total de distribuidor [cm^2]
a_i	Diámetro efectivo del ion [Å]
a	Ancho del compartimento [cm]
B	Base del compartimento [cm]
CLIVAJE	Manera a dividirse cuando se aplica una fuerza sobre mineral.
c_0	Concentración inicial [g/l]
c_t	Concentración a un intervalo de tiempo [g/l]
$c_{SO_4^{2-}}$	Concentración de sulfato [g/l]
$c_{Zn^{2+}}$	Concentración de zinc [g/l]
D_i	Coefficiente de difusión de la especie [cm^2/s]
d_{or}	Diámetro de orificio [cm]
E^0	Potencial estándar [V]
E_e	Potencial de equilibrio o reversible [V]
E_m	Potencial medido [V]
F	Constante de Faraday, [96487 C/mol]
HÁBITO	Forma o figura que el mineral adopta durante su formación.
I	Corriente faradéica [mA]
I_m	Corriente medido [mA]
i	Densidad de corriente [mA/cm^2]
k_n	Coefficiente de transferencia de masa [cm/s]
L	Longitud del electrodo [cm]
m	Masa faradéica [g]
m_r	Masa real [g]
m_t	Masa teórico [g]

N_{or}	Número de orificios
N_{for}	Número de fila de orificio
P_W	Eficiencia energética de la celda
Q	Flujo volumétrico [cm^3/s]
RAYA	Finísimas partículas que muestran el color del mineral.
R	Resistencia eléctrica [Ω]
R	Constante Universal de los gases 8.31434 [J /mol K]
T	Temperatura absoluta [K]
t	Tiempo [s]
u	Movilidad iónica de la especie [cm/s]
V_n	Potencial medido [V]
V	Volumen en el reactor [cm^3]
V_r	Volumen en el tanque receptor [cm^3]
v_f	Velocidad del fluido [cm/s]
v_{for}	Velocidad del fluido en orificios [cm/s]
W	Consumo energético [W]

Símbolos Griegos.

α	Actividad [mol/l]
β	Coefficiente de transferencia de carga
Φ_{metal}	Potencial del metal [V]
γ	Factor de corrección geométrico
ΔP	Caída de presión en flujo canal [bar]
ΔP_d	Caída de presión en el distribuidor [bar]
γ_i	Coefficiente de actividad
η	Sobre potencial [V]
η_i	Eficiencia de corriente
μ	Viscosidad [g/cm s]
ρ_f	Densidad del fluido [g/cm^3]
C_{or}	Coefficiente de descarga
τ	Tiempo de residencia en el reactor [s]
τ_r	Tiempo de residencia en el tanque receptor [s]