



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES

T E S I S

**RECONVERSIÓN DE MATERIALES PRESENTES EN ESCOMBRERAS
MINERAS PARA SU USO COMO MATERIAS PRIMAS ORIENTADAS A LA
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.**

Para obtener el título de:
Licenciada en Ingeniería de Materiales

P R E S E N T A:

Lucero Alejandra Curiel Canales

Director:
Dr. Juan Hernández Ávila

Codirector:
Dr. Luis Humberto Mendoza Huizar

Mineral De La Reforma, Hgo., México, marzo 2024.

Mineral de la Reforma, Hgo., a 24 de marzo de 2025

Número de control: ICBI-D/438/2025

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado a la Egresada de la Licenciatura en Ingeniería en de Materiales **Lucero Alejandra Curiel Canales**, quien presenta el trabajo de titulación **“Reconversión de materiales presentes en escombreras mineras para su uso como materias primas orientadas a la generación de energía eléctrica”**, después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Luis Humberto Mendoza Huizar

Secretario: Dr. Eleazar Salinas Rodríguez

Vocal: Dr. Juan Hernández Ávila

Suplente: Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz



Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
 “Amor, Orden y Progreso”

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
 Director de ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
 Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx
 vergara@uaeh.edu.mx



Resumen

Las escombreras minero-metalúrgicas constituyen un impacto medioambiental negativo en las zonas donde se almacenan. En busca de disminuir su impacto, ya que estos aún tienen propiedades fisicoquímicas y mineralógicas que pueden ser aprovechadas. Para ello se realizó la caracterización de las escombreras de Grupo México ubicado en el estado de San Luis Potosí, México utilizando técnicas de DRX, MEB-EDS, FTIR y XPS.

Encontrando la siguiente composición química de C 33.90 %, O 49.29 %, Mg 0.100 %, Al 0.260 %, Si 1.110 %, S 2.870 %, K 0.060 %, Ca 0.050 %, Fe 8.790 %, Cu 0.460 %, Zn 2.300 %, Pb 0.640 % As 0.150 % y Ag 0.010 %. Las fases mineralógicas determinadas Jarosita y Franklinita.

Por lo anterior en este trabajo se propone su uso como materia prima para la generación de energía. Es por ello, que se realizaron las evaluaciones del potencial eléctrico mediante diferentes ensayos, en los que se encontraron la concentración para su optimización y las curvas de descarga para identificar así su rendimiento. Los resultados más importantes encontrados, indican que, al construir el sistema eléctrico con este residuo, se puede generar la energía suficiente para encender un dispositivo que requiera de 1.5 V. En las curvas de descarga con un potencial eléctrico promedio de 0.769 V se reporta que al aumentar el valor de la resistencia incrementa el tiempo de descarga, los resultados fueron 1.22 M Ω - 32 h, 1.33 M Ω - 21 h, 1.56 M Ω - 21 h, 1.82 M Ω - 92 h, 2 M Ω - 110 h, 3.2 M Ω - 134 h y 4.3 M Ω - 131 h. De este modo, se puede concluir que el reaprovechamiento de desechos de la industria del zinc puede generar energía eléctrica y ser el punto de partida para posteriores estudios relacionados con la eficiencia y rendimiento de este tipo de dispositivos.

Palabras Clave: Jarosita industrial, baterías, generación de energía, reaprovechamiento de residuos.

Abstract

Mining-metallurgical waste dumps represent a negative environmental impact in the areas where they are stored. In an effort to reduce their impact, considering that they still possess physicochemical and mineralogical properties that can be utilized, a characterization study was conducted on the waste dumps of Grupo México, located in the state of San Luis Potosí, Mexico. The study employed techniques such as XRD, SEM-EDS, FTIR, and XPS.

The following chemical composition was found: C 33.90%, O 49.29%, Mg 0.100%, Al 0.260%, Si 1.110%, S 2.870%, K 0.060%, Ca 0.050%, Fe 8.790%, Cu 0.460%, Zn 2.300%, Pb 0.640%, As 0.150%, and Ag 0.010%. The identified mineralogical phases were Jarosite and Franklinite.

Based on these findings, this study proposes their use as raw materials for energy generation. To this end, electrical potential evaluations were conducted through various tests, identifying the optimal concentration and discharge curves to assess performance. The most significant results indicate that constructing an electrical system with this waste can generate enough energy to power a 1.5 V device. The discharge curves, with an average electrical potential of 0.769 V, show that increasing resistance extends discharge time, yielding the following results: 1.22 M Ω - 32 h, 1.33 M Ω - 21 h, 1.56 M Ω - 21 h, 1.82 M Ω - 92 h, 2 M Ω - 110 h, 3.2 M Ω - 134 h, and 4.3 M Ω - 131 h.

Thus, it can be concluded that repurposing waste from the zinc industry can generate electrical energy and serve as a starting point for further studies on the efficiency and performance of these types of devices.

Keywords: Industrial jarosite, batteries, energy generation, waste reutilization.

Agradecimientos

A mi familia

A mis abuelos y tíos que cuidaron a mis padres con los valores para poder construir una familia y mantenerla siempre fiel a ellos. A mis padres por todo su apoyo incondicional que me han brindado siempre, por su esfuerzo y dedicación para que sus hijos logren sus sueños. A mi hermano por demostrarme a su manera las cosas importantes que hay que tomar en cuenta para la vida. A mis hermanas por animarme siempre que lo necesito, vernos crecer me ha dado mucha alegría.

A mis profesores

Al M. Alberto Arenas Flores[†] por haber sido una gran persona y docente, sus enseñanzas las recordamos con mucho cariño. Al Dr. Juan Hernández por confiar en mí desde que me acerqué a su equipo de trabajo, por sus consejos y aprendizajes que me han aportado mucho de manera profesional y personal. Al Dr. Eleazar Salinas y el Dr. Eduardo Cerecedo por acompañarme en el proceso para realizar este trabajo, sus enseñanzas y consejos los valoro y conservo con cariño.

Al Dr. Luis Mendoza mejor conocido como Dr. Huizar, por recibirme en su equipo de trabajo para poder llevar a cabo la investigación, por sus enseñanzas y paciencia.

A mis amigos

A mis compañeros y amigos de la carrera por apoyarme y motivarme en los momentos más exigentes que surgieron en el camino. En especial a Leo, Pepe, Ernesto, Ari, Fati, Dani, Loyola, Peña, Kike y Max.

A mis amigos de la preparatoria porque no me han abandonado y a pesar de la distancia me han demostrado que su amistad es más que incondicional. Los llevo siempre en mi corazón, Ericka, Jaquelinee, Manuel y Enrique, gracias, por tanto.

Con cariño a la familia Curiel Canales

Tabla de Contenido

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Capítulo 1. Introducción.....	11
1.1 Planteamiento del problema.....	11
1.1.1 Antecedentes.....	13
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo general.....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Justificación.....	15
1.4 Hipótesis.....	16
1.5 Preguntas de Investigación.....	16
Capítulo 2. Marco Teórico.....	17
2.1 Los desechos en la industria minera en México.....	17
2.2 La generación de energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas.....	20
Capítulo 3. Material, equipo y desarrollo experimental.....	26
3.1 Localización y acceso al área de estudio.....	26
3.2 Muestreo.....	27
3.3 Cuarteo.....	27
3.4 Caracterización.....	27
3.4.1 Difracción de Rayos X.....	28
3.4.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB) y Microanálisis por dispersión de energías (EDS).....	29
3.4.3 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	30
3.4.4 Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS).....	30
3.4.5 Análisis granulométrico.....	31
3.5 Ensayos eléctricos.....	31
Capítulo 4. Resultados y Discusiones.....	35
4.1 Difracción de Rayos X.....	35
4.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB) y Microanálisis por dispersión de energías (EDS).....	36
4.3 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	38
4.4 Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS).....	39
4.5 Ensayos eléctricos.....	41
Discusión.....	59
Conclusiones.....	60
Referencias.....	61

Tabla de figuras

Figura 1. Presas de Jales en México por estado (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2023).	11
Figura 2. Esquema de una celda galvánica y celda electroquímica (Chaudhary & Khanuja, 2022).	20
Figura 3. Fotografía de localización de las escombreras de Grupo México, ubicadas en Carretera Charcas Santo Domingo Sn, 78597 Charcas, San Luis Potosí.	26
Figura 4. Difractómetro de rayos X marca INEL, modelo EQUINOX 2000.....	28
Figura 5. Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío marca JEOL, modelo JSM.	29
Figura 6. Espectrofotómetro de Infrarrojo Perkin Elmer Sytem 2000.....	30
Figura 7. W. S. Tyler modelo RX-812 tipo 110V 60 Hz serie 22710.	31
Figura 8 . Evolución de los prototipos de pilas elaborados. a) Con el principio de una pila alcalina; b) Adaptado en un tubo capilar; c) Considerando al residuo como electrolito; y d) Prototipo final encapsulado en resina.	33
Figura 9. Multímetro digital modelo XL830L.....	34
Figura 10. Difractograma de la jarosita industrial.....	35
Figura 11. Fotomicrografías tomadas por SEM (SE).	36
Figura 12. Espectro FTIR de la escombrera minera.	38
Figura 13. Espectro de XPS obtenido del análisis de la muestra de jarosita precipitada en la planta de zinc .	39
Figura 14. Grafica que muestra la diferencia de potencial eléctrico entre los diferentes electrolitos que se consideraron.	41
Figura 15. Diseño para optimizar la concentración entre el residuo industrial minero y el agua desionizada.	42
Figura 16. Resultados de la muestra con 0.10 g de residuo minero industrial.....	43
Figura 17. Resultados de la muestra con 0.20 g de residuo minero industrial.....	44
Figura 18. Resultados de la muestra con 0.30 g de residuo minero industrial.....	44
Figura 19. Resultados de la muestra con 0.40 g de residuo minero industrial.....	45
Figura 20. Resultados de la muestra con 0.50 g de residuo minero industrial.....	45
Figura 21. Resultados de la muestra con 0.60 g de residuo minero industrial.....	46
Figura 22. Resultados de la muestra con 0.70 g de residuo industrial minero.....	46
Figura 23. Resultados de la muestra con 0.80 g de residuo minero industrial.....	47
Figura 24. Resultados de la muestra con 0.90 g de residuo minero industrial.....	47
Figura 25. Resultados de la muestra con 1.00 g de residuo minero industrial.....	48
Figura 26. Resultados de las muestras con el residuo industrial minero y agua desionizada para una muestra pastosa.	50
Figura 27. Dispositivo para evaluar la capacidad batería.	51
Figura 28. Curva de descarga con una resistencia de 1.22 MΩ.....	52
Figura 29. Curva de descarga con una resistencia de 1.33MΩ.....	53
Figura 30. Curva de descarga con una resistencia de 1.56 MΩ.....	53
Figura 31. Curva de descarga con una resistencia de 1.82 MΩ.....	54
Figura 32. Curva de descarga con una resistencia de 2 MΩ.....	55
Figura 33. Curva de descarga con una resistencia de 3.2 MΩ.....	56
Figura 34. Curva de descarga con una resistencia de 4.3 MΩ.....	56
Figura 35. Dispositivo 1. Led rojo.....	58
Figura 36. Dispositivo 2. Calculadora básica.....	58

Tabla de tablas

Tabla 1. Composición promedio, semi cuantitativa y puntual de las partículas de jarosita industrial. Obtenida por SEM-EDS.....	37
Tabla 2. Resultados más importantes de la concentración.....	49
Tabla 3. Resultados más importantes de las curvas de descarga.	57

Capítulo 1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

La contaminación que generan los residuos en la industria minera es muy grande, no solo afectan el suelo en el que se almacenan sino también el entorno de sus alrededores.

En septiembre del 2021 se determinó en México una estimación de la cantidad de lugares en los que se concentran estos desechos, indicando que hasta ese momento eran alrededor de 585. Se actualizó la estadística reportando 568 depósitos en 22 estados del país, los cuales se muestran en la figura 1; entre los estados que destacan son Durango, Zacatecas, Sonora y Chihuahua, notando la presencia mayoritaria de esta actividad en el norte del país (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2023).

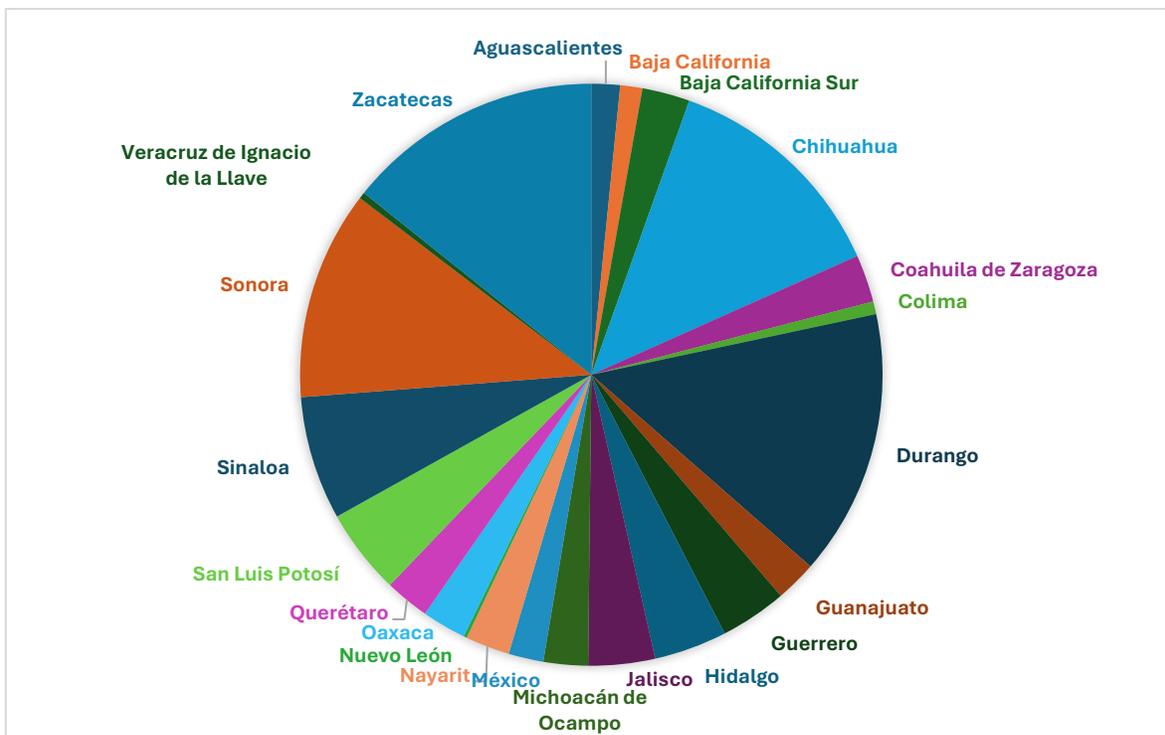


Figura 1. Presas de Jales en México por estado (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2023).

Estos depósitos, por su volumen de generación y sus características se han considerado como un riesgo desde dos perspectivas principales; la más importante es la ambiental ya que pueden influir de manera negativa a la flora y fauna, así como al aire de sus

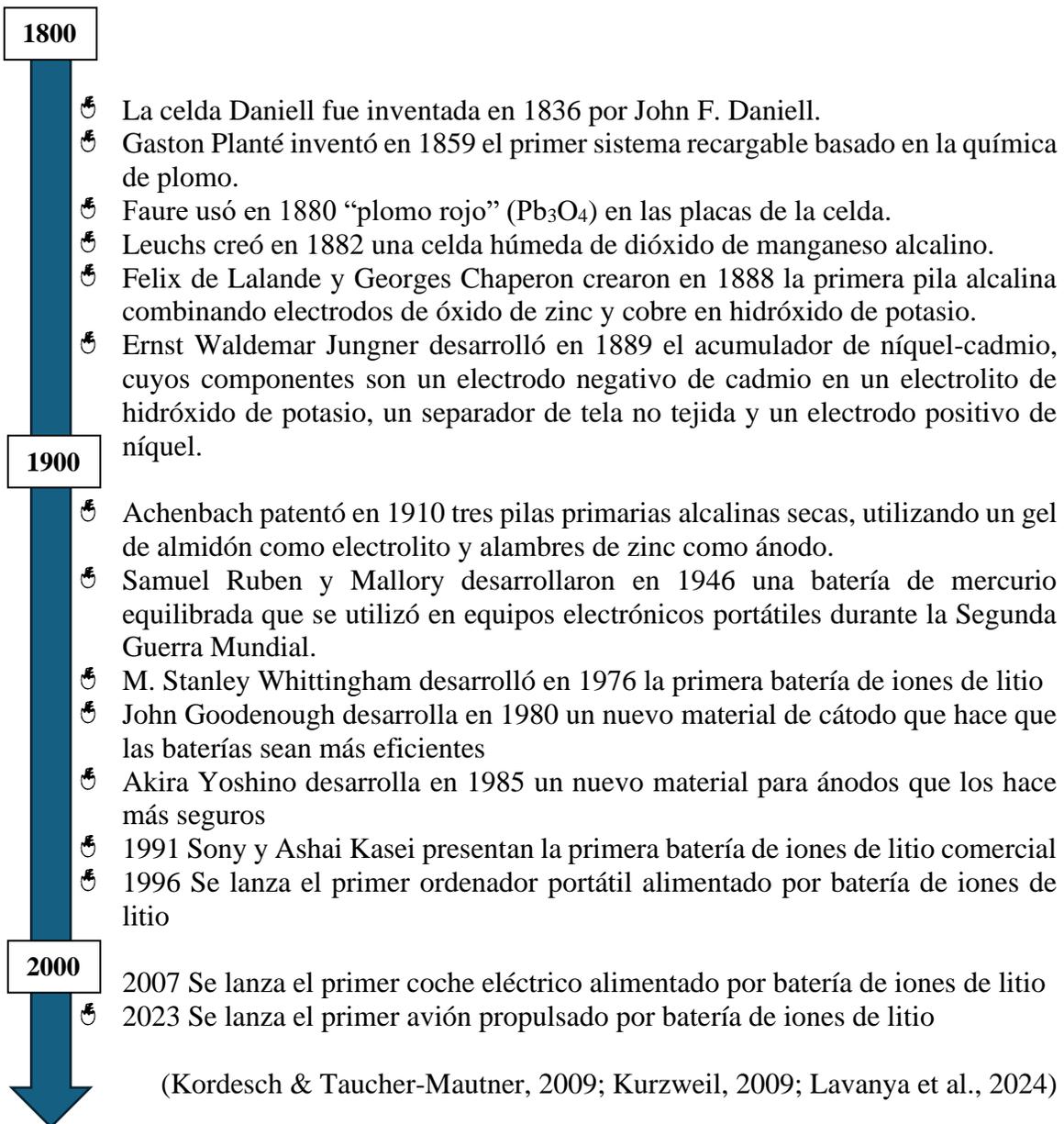
alrededores de donde han sido construidos; la segunda es en el aspecto ingenieril, el diseño, construcción y operación de las estructuras que están sujetas a posibles fallas. El grado de peligrosidad potencial de contaminación ocasionado por derrames de las presas de jales, depende principalmente de tres factores: la toxicidad del residuo, el volumen almacenado y su ubicación geoespacial dentro de la cuenca. Las posibles fallas de este tipo de presas pueden comprometer la seguridad hídrica, alimentaria y económica, así como la salud pública y ecosistémica de las cuencas hidrológicas (Instituto Mexicano de Agua y Minería, n.d.).

Dado lo anterior, se requieren de estrategias versátiles y eficientes para reaprovechar estos residuos mineros. En este sentido, se encuentra reportado que estos residuos se han utilizado primordialmente en el campo de la construcción. Sin embargo, al contener materiales metálicos nanoparticulados pueden utilizarse como materia prima en la fabricación de dispositivos generadores de energía (Hernández-Lazcano et al., 2021).

1.1.1 Antecedentes

Los primeros sistemas productores de energía eléctrica por medio de la electroquímica se remontan a Galvani, Volta, Daniell y Bunsen. En el siglo XIX, las celdas primarias de dióxido de manganeso y zinc, las celdas húmedas de Leclanché y las celdas secas de zinc y carbono ya se utilizaban para muchas aplicaciones domésticas (Kurzweil, 2009)

A continuación, se reportan los hechos históricos más importantes que han ayudado al desarrollo de lo que hoy conocemos como generación de energía a través de las reacciones electroquímicas.



Dada la importancia y necesidad del desarrollo de nuevas fuentes de energía, en el año 2019 se otorgó el premio Nobel de química a los científicos John B. Goodenough (1922, Alemania), M. Stanley Whittingham (1941, Reino Unido) y Akira Yoshino (1948, Japón) por el desarrollo de las baterías de iones de litio debido a su alta capacidad energética (*The Nobel Prize in Chemistry 2019 - Popular Information - NobelPrize.Org*, n.d.).

Recientemente, ha habido un interés creciente en el desarrollo, fabricación y comercialización de las baterías alcalinas (Zn-C) y litio, que no son recargables; de Li más polímero (LiPo) y baterías de hidruro metálico de níquel (NiMH, o NiCd) que si son recargables. Se siguen usando los diseños de celdas cilíndricas o tipo D (enrolladas), de botón o moneda; se crearon nuevos diseños como las celdas prismáticas y las celdas de bolsa o tipo pouch (Rosen & Farsi, 2023c).

En la actualidad, se continúan haciendo investigaciones con respecto a la mejora en la producción de generación de energía a través de la electroquímica, resaltando la importancia en la construcción de baterías en estado sólido por sus múltiples ventajas con respecto a las baterías que usan solución electrolítica alcalina. Sin embargo, es importante mencionar que la fabricación de estas pilas o baterías sigue siendo altamente contaminante con una huella de carbono que sigue impactando negativamente al ambiente. En este sentido, es necesario el reaprovechamiento de materiales para generar este tipo de dispositivos, por lo cual en el presente trabajo se propone el uso de residuos mineros como materia prima en la fabricación de pilas y baterías.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar residuos de la industria minero-metalúrgica de la industria del zinc a través de sus propiedades fisicoquímicas y mineralógicas para su posible uso como generador de energía.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Muestreo de los residuos de la industria minera metalúrgica de la industria del zinc ubicada en San Luis Potosí.
2. Caracterizar las escombreras por diferentes métodos (DRX, MEB-EDS, ASS, Granulometría, Eléctricos).
3. Evaluar la capacidad de los residuos de la industria minera como medios conductores para ser utilizados como electrolitos sólidos.
4. Determinar las curvas de descarga de baterías Al-Cu empleando residuos de la industria minera metalúrgica como puente salino.

1.3 Justificación

Es importante llevar a cabo esta investigación por el impacto del gran volumen de escombreras generadas por la actividad minera en México a lo largo de los años, y por ser una actividad histórica de gran impacto ambiental y económico. Estos residuos, se han convertido en verdaderos focos de contaminación, y a los cuales no se les ha dado actualmente la importancia adecuada, para ser una materia prima en nuevos procesos aprovechando sus propiedades en base a su composición química y mineralógica. De este modo, un posible uso alternativo puede ser como materia prima en la generación de energía, y es por lo que en este trabajo se propone la reutilización de dicho residuo, y darle un valor agregado logrando así un aprovechamiento racional y sustentable.

1.4 Hipótesis

Conociendo la composición química y mineralógica de las escombreras mineras, puede asumirse que con la presencia de los metales que contienen estos residuos, se pueden aprovechar sus propiedades para que tengan un uso alternativo, orientados a la generación de energía eléctrica mediante reacciones electroquímicas.

1.5 Preguntas de Investigación

- ¿Se pueden utilizar las escombreras mineras como materia prima para la generación de energía?
- ¿Qué se necesita para poder generar energía a través del uso de las escombreras como materia prima?
- ¿Es posible sustituir el material principal que se utiliza industrialmente para la construcción de pilas en generación de energía con escombreras mineras?

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Los desechos en la industria minera en México

La extracción de minerales se ha realizado en México, y tiene una importante tradición de más de 500 años, debido a la gran riqueza geológica que posee; la minería nacional produce 53 tipos de minerales, de los cuales, 11 son metálicos y 42 no metálicos. Esto le ha permitido tener un papel relevante en el entorno global del sector: en 2022, se posicionó como el principal productor de plata. En el segmento de los minerales metálicos, México ubica siete productos dentro de las primeras 10 posiciones a nivel internacional (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, 2024).

La industria minera se presenta en zonas áridas y semiáridas, donde la escasez hídrica es natural, por lo que esta actividad se cataloga como la de mayor consumo de agua local. Esta situación, incrementa considerablemente los riesgos identificados por la misma industria minera para que demuestre actividades seguras y continuas (Pedrozo Acuña, 2022)

Para el almacenamiento de los residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales, se construyen presas de jales en las que se depositan las mezclas de contaminantes después de llevarse a cabo el proceso de concentración y recuperación. Regularmente, se encuentran al aire libre con bordos de tierra sobre el terreno natural, donde ocurre el proceso de separación de materiales. La presa de jales debe contemplar sistemas de recuperación del agua para su recirculación al proceso o las medidas de tratamiento para su descarga a cuerpos receptores y bienes nacionales de acuerdo con la normatividad aplicable. Estas estructuras son diseñadas cuidadosamente, y cada presa es única, está construida y operada según las especificaciones que se adaptan a la naturaleza física del material, así como la normatividad que establece la gestión y manejo de estos (Peña Colorada, 2020).

La normatividad establece que los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros, actualizada en diciembre de 2023, clasifica a los residuos mineros en función al proceso que los genera en dos grupos. Los residuos generados en la minería y la metalurgia se clasifican en varias categorías. Los provenientes del minado incluyen terreros y tepetates. Los residuos del beneficio de minerales se dividen en varios

subtipos: los de concentración física, como jales de separación magnética o gravimétrica, y materiales de desagregación; los de concentración fisicoquímica, incluyendo jales de flotación y reactivos gastados; los de procesos químicos o bioquímicos, como jales cianurados; los de procesos pirometalúrgicos, como escorias y lodos de limpieza de gases; y los de procesos hidrometalúrgicos, como yesos de neutralización y lodos de precipitación. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011)

Esta clasificación permite manejar los residuos de manera adecuada, minimizando su impacto ambiental. Sin embargo, no es suficiente con poder almacenarlos. Por lo que es importante considerar que cada lugar en el que se almacenen tendrá un límite y encontrar un nuevo lugar para almacenamiento, creando más espacios en riesgo de contaminación por los mismos.

El desarrollo del sector minero en México en su progreso ha causado un gran impacto ambiental al generar grandes cantidades de escombreras que contienen metales en concentraciones que pueden representar un peligro a los lugares en los que se almacenan.

Los procesos convencionales químicos y electroquímicos para la recuperación de metales desde fuentes secundarias la cementación, por medio de soluciones acuosas; la recuperación electrolítica, por el principio de electrólisis; las resinas de intercambio iónico, en donde se extrae los iones del metal de la solución; y la precipitación química, que consiste en la adición de sulfuro de sodio a soluciones complejas con tiosulfatos, obteniendo sulfuro del metal recuperado de manera precipitada (Guillermo Juárez López, 2007).

Se han realizado trabajos de investigación en los que se busca darles un uso y beneficio a los desechos mineros. Como el desarrollo de materiales de construcción alternativos utilizando relaves y arcilla pesada, para darle al compuesto una buena resistencia en verde y plasticidad durante el desarrollo, pero sobre todo darle una resistencia a la compresión similar o superior a la de los productos derivados de procesos convencionales en las industrias de ingeniería civil y los materiales de construcción (Amrani et al., 2020; Flores Badillo et al., 2014; González-de-la-Fuente et al., 2023; Salinas et al., 2017).

Además, los relaves mineros se pueden utilizar como un reemplazo completo de los agregados naturales en la producción de hormigón (El Machi et al., 2021; Volpi-León et al., 2017). Hasta el momento, se siguen realizando investigaciones para el aprovechamiento de estos desechos mineros con el fin de disminuir el impacto negativo que han generado a lo

largo de los años. Particularmente, en el procesamiento de minerales de zinc para obtener este metal de forma electrolítica, se producen grandes cantidades de compuestos llamados jarositas cuya formula general es $MFe_3(OH)_6(SO_4)_2$ (Cruells & Roca, 2022).

En cualquier planta de zinc electrolítica, se producen anualmente miles de toneladas de este residuo, que por sus características es considerado un residuo toxico y peligroso (Zeng et al., 2023). Muchas investigaciones se han llevado a cabo, tratando de estabilizar este residuo, reprocesarlo, extraer metales de interés como Fe y aislar metales tóxicos tales como el As que llegan a estar presentes en el mismo (Grigg, Notini, et al., 2024; Grigg, Wisawapipat, et al., 2024; Jin et al., 2024; Zeng et al., 2023; S. Zhou et al., 2024; X. Zhou et al., 2024).

De igual modo, se encontró que la jarosita de hidronio-potasio puede ser utilizada como nuevo material de cátodo en aplicaciones de baterías de iones de litio, debido a que el voltaje nominal medido (1,3 V) es cercano al de la batería estándar (1,5 V) y un poco superior al de la batería recargable (1,2 V) (Hernández-Lazcano et al., 2021).

Este último trabajo, se basó en trabajos previos donde la jarosita sintética fue propuesta como ánodo y/o cátodo en baterías de ion litio para mejorar su rendimiento y prolongar la vida útil de estas baterías, logrando excelentes resultados (Ding et al., 2015; Sandineni et al., 2016; Xu et al., 2016; Zhao et al., 2016a).

En base a esto último, y a la similitud del comportamiento entre las jarositas sintéticas y las precipitadas en la industria del zinc, este trabajo se ha enfocado en el estudio de residuos de la industria minero-metalúrgica del zinc, para su evaluación como materia prima en elaboración de dispositivos que permitan la generación de energía mediante métodos eléctricos.

2.2 La generación de energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas

La electroquímica es la parte de la química que se dedica a estudiar las reacciones asociadas con la corriente eléctrica que circula en un circuito a través de la transferencia de electrones, también llamadas reacciones redox que se llevan a cabo en celdas electroquímicas; cuando son de tipo galvánico estos dispositivos pueden generar energía de manera espontánea. Los electrodos y el electrolito en este tipo de celdas pueden estar hechos de diversos materiales. Las variaciones en la composición del electrolito y los electrodos dan como resultado diferentes reacciones electroquímicas y de iones cargados. Estos influyen en la capacidad de generación y almacenamiento de energía, así como en el voltaje de funcionamiento y el rendimiento de la batería (Ball, 2004; Rosen & Farsi, 2023d).

Celda voltaica

Una celda voltaica consiste en un dispositivo en el que los electrones fluyen del reductor al oxidante a través de la conexión eléctrica tan pronto como progresa la reacción, creando así una corriente eléctrica que puede utilizarse para realizar trabajo. Mediante una reacción redox espontánea en el caso de una celda de tipo galvánica o, de manera equivalente, que utiliza carga eléctrica para ejecutar una reacción no espontánea, para una celda electroquímica. Como se muestra en la Figura 2, dos electrodos de metal sólido se unen a un circuito exterior que permite la conexión entre las dos partes de la celda voltaica. Las dos

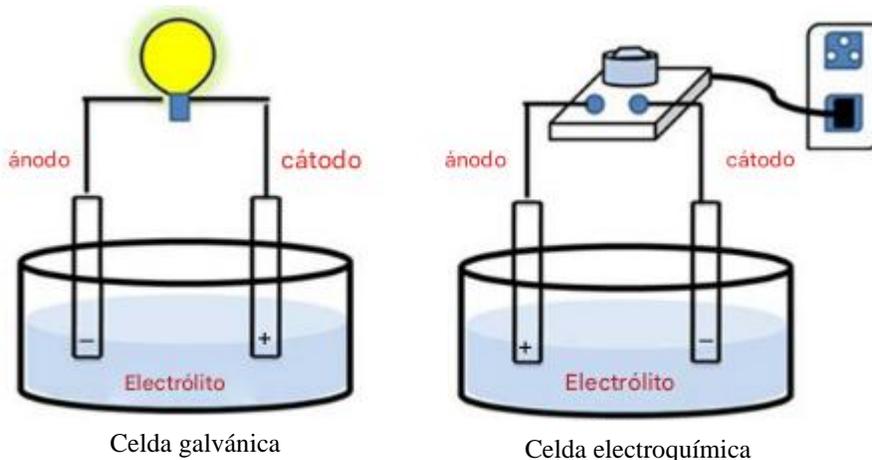


Figura 2. Esquema de una celda galvánica y celda electroquímica (Chaudhary & Khanuja, 2022).

reacciones que contienen la semirreacción oxidativa y la semirreacción reductora ocurren en el ánodo y el cátodo, respectivamente. Una sustancia iónica y un electrolito en solución conectan ambos electrodos que permiten la transferencia de electrones entre dos cámaras para mantener la neutralidad eléctrica del sistema (Chaudhary & Khanuja, 2022).

Energía libre de Gibbs

La energía libre de Gibbs describe el comportamiento de las reacciones químicas a través de términos matemáticos desde la perspectiva de la termodinámica, y nos ayuda a comprender la espontaneidad de una reacción, en este caso, de las reacciones redox. Si ΔG es negativa, la reacción redox será espontánea y puede generar el flujo de electrones del ánodo al cátodo en el sistema electroquímico.

El potencial de una celda electroquímica o fuerza electromotriz E se define como la diferencia de potencial eléctrico de la reacción de reducción y el potencial eléctrico de la reacción de oxidación para cualquier conjunto inmediato de condiciones, y es determinado por el cambio de la energía libre de Gibbs ΔG y la ecuación que nos permite calcularlo es la siguiente:

$$E = -\frac{\Delta G}{nF} \quad (1)$$

Se considera el número de moles de electrones transferidos en la reacción n y también la constante de Faraday F debido a que interviene la carga específica de un solo electrón y el número de partículas constituyentes de una sustancia que se pueden encontrar en un mol (Ball, 2004).

Potencial estándar

El potencial estándar de una reacción electroquímica se establece para entender el cambio que ocurre de la fuerza electromotriz de un sistema en el que ocurre la transferencia de electrones. Se han establecido condiciones para evaluar este valor y son las siguientes:

- Se consideran las semirreacciones separadas en lugar de las reacciones redox balanceadas.

- Se considera a la semirreacción expresada como reacción de reducción, al combinarse entre dos o más semirreacciones, una se debe invertir para considerarse como una reacción de oxidación cambiando a su vez, su signo.
- Las condiciones termodinámicas estándar de presión y concentración son supuestas y, generalmente se considera la temperatura de 25°C.
- Los potenciales estándar se definen con respecto a la semirreacción de reducción del electrodo de hidrógeno estándar.

(Ball, 2004)

Ecuación de Nernst

La relación entre la fuerza electromotriz estándar y no estándar de las reacciones electroquímicas, está dada por la ecuación de Nernst y es la siguiente:

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad (2)$$

En donde se considera Q como el cociente de la reacción expresado en términos de concentraciones instantáneas (no en equilibrio), presiones, actividades de reactivos y productos. Esta ecuación nos ayuda a calcular el voltaje de celdas electroquímicas en condiciones no estándar de concentración o presión (Ball, 2004).

Tipos de electrodos

En una celda electroquímica, el ánodo es el electrodo negativo, donde los electrones salen durante la descarga. El material del ánodo suele estar hecho de un metal como el litio, que puede liberar electrones al circuito. El cátodo es el electrodo positivo de la batería, donde los electrones fluyen hacia la batería durante la carga. El material del cátodo está hecho típicamente de un óxido metálico, tal como óxido de litio y cobalto, óxido de litio y manganeso o fosfato de litio y hierro (Ganachari, 2024).

Cualquier par de electrodos que tengan diferentes potenciales de reacción estándar pueden crear una celda electroquímica. El electrodo con mayor capacidad para absorber electrones (como sucede en el cátodo) tiene un potencial estándar más alto (es decir, más

potencial positivo), mientras que el electrodo con mayor tendencia a perder electrones (como sucede en el ánodo) tiene un potencial estándar más bajo (es decir, un potencial más negativo). Por lo tanto, una selección apropiada de materiales para el ánodo y el cátodo se basa en potenciales de reacción estándar más negativos y positivos, respectivamente.

Las características deseadas para el cátodo son alto potencial redox (agente oxidante eficiente), alta capacidad específica (cantidad total de electricidad generada en las reacciones electroquímicas por gramo de material del cátodo), reversibilidad y estabilidad en contacto con el electrolito. Para el ánodo, las características deseadas son bajo potencial redox (agente reductor eficiente), alta capacidad específica, reversibilidad y buena conductividad (Rosen & Farsi, 2023b).

Tipos de electrolitos

Se considera como un electrolito a aquellas disoluciones iónicas que tienen la capacidad de conducir la electricidad mediante los iones cargados que son transportados hacia los electrodos (Ball, 2004).

El electrolito puede ser líquido, sólido, polimérico o compuesto (híbrido) según el tipo de batería. El electrolito debe tener una alta conductividad iónica, ninguna conductividad eléctrica, no reactividad con los materiales del electrodo y un amplio rango de temperatura de funcionamiento. El electrolito líquido tradicional generalmente tiene una baja viscosidad, una alta densidad de energía, una alta capacidad de tasa de carga/descarga, una temperatura operativa relativamente baja (entre 40°C y 60°C) y baja inflamabilidad. El electrolito polimérico puede ser un gel o un sólido. El electrolito polimérico sólido tiene la ventaja de una alta flexibilidad, alta densidad de energía, aplicaciones multifuncionales, buenas propiedades mecánicas y de seguridad y estabilidad térmica/química. Pero los electrolitos poliméricos sólidos suelen tener conductividades iónicas bajas a temperatura ambiente.

Los electrolitos líquidos (LE) utilizados actualmente en las baterías de iones de litio, muestran altas conductividades iónicas y permiten una rápida transferencia iónica debido a la humectación eficiente de los electrodos porosos. Los electrolitos de estado sólido (SSE) podrían aliviar la mayoría de los problemas de seguridad asociados con los electrolitos líquidos (como la degradación térmica y electroquímica, su extrema inflamabilidad y el uso de separadores porosos que sean vulnerables a la formación de gases y fugas). El beneficio

clave de un electrolito de estado sólido es que no se corroe, no se quema ni tiene fugas. Además, ciertas familias de electrolitos sólidos son compatibles con el Li metálico y, por lo tanto, sirven como separadores que ayudan a suprimir la formación de dendritas (Torabi & Ahmadi, 2020a).

Baterías

Cuando se colocan dos materiales diferentes en un recipiente lleno de electrolito, debido a su diferente potencial de liberación de electrones, se produce una diferencia de potencial entre ellos. Este fenómeno da origen al concepto de baterías (Torabi & Ahmadi, 2020b).

Una batería puede estar compuesta por dos o más celdas electroquímicas. Cada celda electroquímica incluye dos electrodos que están separados por un electrolito. Durante la descarga, un electrodo del que fluyen los electrones se conoce como ánodo o electrodo negativo y un electrodo que recibe los electrones se conoce como cátodo o electrodo positivo. De hecho, el flujo de iones con carga positiva a través del electrolito equilibra el movimiento de los electrones negativos, lo que hace que la celda de la batería sea eléctricamente neutra durante su funcionamiento. Se suele utilizar un separador poroso y aislante electrónicamente entre el ánodo y el cátodo para mejorar el mecanismo (Rosen & Farsi, 2023a).

Las baterías se fabrican de dos maneras: se pueden recargar después de su uso o se pueden reciclar. Las baterías recargables se denominan baterías secundarias, mientras que las no recargables se denominan baterías primarias. Las baterías primarias se utilizan ampliamente en relojes, controles remotos, juguetes y muchas otras aplicaciones, mientras que las baterías secundarias se utilizan en teléfonos celulares, computadoras portátiles, afeitadoras, entre otros productos (Torabi & Ahmadi, 2020b).

Las baterías primarias o desechables se refieren a baterías en las que los electrones sólo pueden pasar del ánodo al cátodo durante la descarga. En otras palabras, las reacciones en el ánodo y el cátodo no pueden ocurrir en dirección inversa. Este tipo de batería almacena y entrega energía una sola vez. En las baterías primarias, la vida útil de la batería termina cuando los electrodos se agotan, ya que liberan todos los iones al electrolito o los productos cubren completamente la superficie del electrodo y no permiten que más reactivos lleguen a la interfaz, evitando así que la reacción vuelva a ocurrir (Rosen & Farsi, 2023c).

Las celdas que por sí mismas pueden recargarse mediante la acción de una corriente inversa, se llaman acumuladores porque acumulan el trabajo químico de una corriente eléctrica. Sinónimos son: batería reversible, batería de almacenamiento o batería secundaria. Las reacciones electroquímicas que ocurren en el ánodo y el cátodo durante la descarga se invierten durante la carga, lo que causa que pueden cargarse y descargarse muchas veces antes de llegar al final de su vida útil (Rosen & Farsi, 2023a).

Uno de los principales desafíos de las baterías de estado sólido, es el desarrollo de electrolitos adecuados con alta conductividad iónica y estabilidad en un amplio rango de temperaturas. La interfaz entre el electrolito y los electrodos es un componente crítico de las baterías de estado sólido y mantener la estabilidad en esta interfaz es un desafío importante. Las baterías de estado sólido tienen procesos de fabricación diferentes a los de las baterías tradicionales de electrolito líquido (Boaretto et al., 2021; Krishnan et al., 2021).

El costo de producción de baterías de estado sólido es actualmente más alto que el de las baterías tradicionales de electrolito líquido, lo que supone un desafío para la comercialización. Las dendritas son estructuras pequeñas con forma de aguja que pueden crecer desde el ánodo durante la carga. Pueden crear cortocircuitos y dañar la batería, reduciendo su rendimiento y seguridad. Las baterías de estado sólido son menos propensas al crecimiento de dendritas, que las baterías de electrolito líquido. En general, las baterías de estado sólido muestran un gran potencial para mejorar el rendimiento, la estabilidad y la seguridad de la batería (Ganachari, 2024).

Capítulo 3. Material, equipo y desarrollo experimental

En el presente capítulo se describen las características generales del mineral utilizado, su ubicación, muestreo y el procedimiento experimental realizado para caracterizarlo química, mineralógica y granulométricamente.

Por otra parte, también se describe la metodología para la determinación de sus propiedades eléctricas.

3.1 Localización y acceso al área de estudio

Dichas escombreras se encuentran ubicadas a un costado del parque bicentenario en San Luis Potosí, dentro de las instalaciones de Minera México, como se observa en la Figura 3.

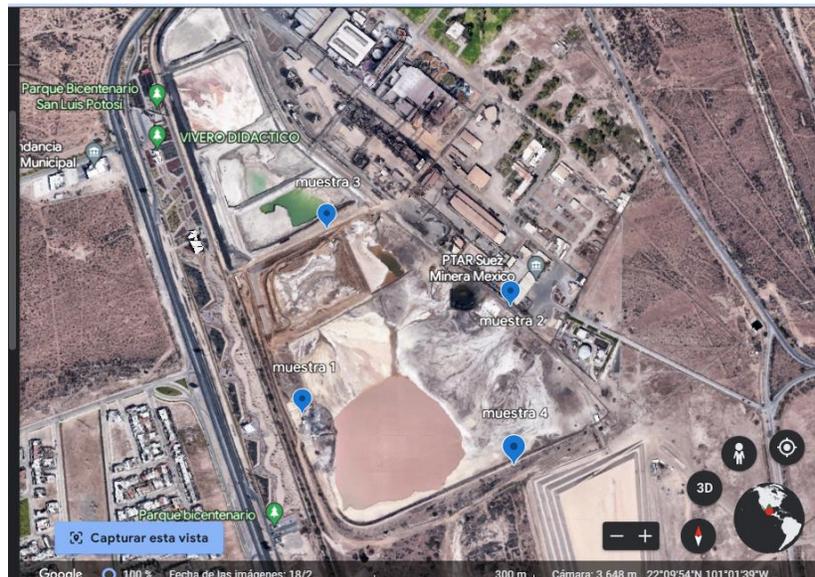


Figura 3. Fotografía de localización de las escombreras de Grupo México, ubicadas en Carretera Charcas Santo Domingo Sn, 78597 Charcas, San Luis Potosí.

3.2 Muestreo

El mineral utilizado para la realización de este trabajo fue un residuo jarosítico precipitado en la planta de zinc de la compañía Industrial minero México. El muestreo fue llevado a cabo por personal de la compañía, debido a restricciones ocasionadas por la pandemia. La muestra entregada fue de 20 kg y se muestreo después de los filtros prensa una vez precipitada la jarosita en los tanques de lixiviación.

El acondicionamiento del material fue mediante un proceso de secado, homogenización, y separación de muestras para su posterior caracterización.

3.3 Cuarteo

El cuarteo fue realizado con el objeto de homogenizar las muestras obtenidas en la planta, para lo cual se mezclaron las cuatro muestras y se procedió a realizar el cuarteo, donde se obtuvieron muestras para el análisis químico, Difracción de Rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido en conjunción con Microanálisis por Dispersión de Energías (MEB-EDS), granulometría.

3.4 Caracterización

De acuerdo con los protocolos usados para el análisis mediante técnicas analíticas de sólidos, la muestra fue preparada mediante secado, homogenización y tamizado para tener un tamaño promedio aproximado de 75 μm . El secado se llevó a cabo a una temperatura de 60 °C, durante 6 horas continuas para eliminar la humedad residual y evitar alteraciones en las técnicas utilizadas.

3.4.1 Difracción de Rayos X

Se utilizó un difractómetro INEL modelo Equinox 2000 (Figura 5), el cual se localiza en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH-AACTyM), México, fabricado por INEL en Artenary Centre Val de Loire, Francia. Se utilizó una fuente de radiación de $\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$ operando a 40 kV y 40 mA. Todos los espectros de DRX fueron obtenidos en un rango de 2θ desde 10° a 70° usando un incremento de paso de 0.03° . El tiempo de barrido utilizado fue de 10 minutos por cada muestra, y la caracterización de los espectros de difracción obtenidos, se llevó a cabo con la ayuda del programa MATCH versión 1.1 (desarrollado por Crystal Impact, Bonn, Alemania).



Figura 4. Difractómetro de rayos X marca INEL, modelo EQUINOX 2000

3.4.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB) y Microanálisis por dispersión de energías (EDS)

El estudio morfológico y de análisis semicuantitativo y puntual, se llevó a cabo utilizando un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL, modelo JSM-IT300, fabricado por JEOL Tokyo, Japón (localizado en la Escuela Superior de Apan-UAEH, México), Figura 6. El equipo fue operado empleando un voltaje de 30 kV y está equipado con un Espectrómetro de Dispersión de Energías de Rayos X (EDS), marca Oxford.



Figura 5. Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío marca JEOL, modelo JSM.

3.4.3 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Para completar y confirmar la presencia de los elementos constitutivos de la jarosita, se llevó a cabo un análisis de reflectancia total de espectrometría de infrarrojo mediante transformada de Fourier (ATR-IFTR). Este análisis fue completado utilizando un espectrómetro FTIR marca Perkin Elmer (Manufacturado en Watham, MA, USA), Figura 7. Para este análisis, 10 mg de muestra en forma de polvo fueron cuidadosamente colocados en la superficie de un cristal y cada espectro obtenido fue registrado como absorbancia por debajo del 75 %. Cada espectro fue escaneado entre 4000 y 500 cm^{-1} , de longitud de onda.



Figura 6. Espectrofotómetro de Infrarrojo Perkin Elmer Sytem 2000.

3.4.4 Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS)

Para el análisis efectuado por espectrometría de fotoelectrones de rayos – X (XPS), este se llevó a cabo en un equipo de análisis de superficie K ALPHA (Thermo Fisher), el cual cuenta con un analizador hemisférico (180°) de doble aproximación y un detector de 128 canales con una presión base de 2×10^{-9} mbar. El cañón de rayos X usa la línea $K\alpha$ monocromada del Al (1486.6 eV) a 12 kV y 40 W de potencia en un área oval de 400 un de diámetro, y esto afecta a la muestra con un ángulo relativo de 30° . En erosión, se emplea un haz de iones de argón acelerados a 3 kV con una potencia de 30 W, el cual incide en un área de 1 x 2 mm concéntrica al haz de rayos – X. El neutralizador genera una nube de iones de argón a casi 0 V de energía sobre la zona analizada. El espectro de XPS se obtuvo bajo 2

condiciones: en un barrido amplio (0 – 1350 V) con 1 eV/paso, y en modo de pequeña ventana, con 0.1 eV/paso, con una energía de paso de 50 eV.

3.4.5 Análisis granulométrico

Se realizó en el equipo de tamizado W. S. Tyler modelo RX-812 tipo 110V 60 Hz serie 22710, Figura 8, la clasificación de tamaño de partícula del material se efectuó a +325, -400, +500 y -500 y al final se optó por trabajar con la malla -400.

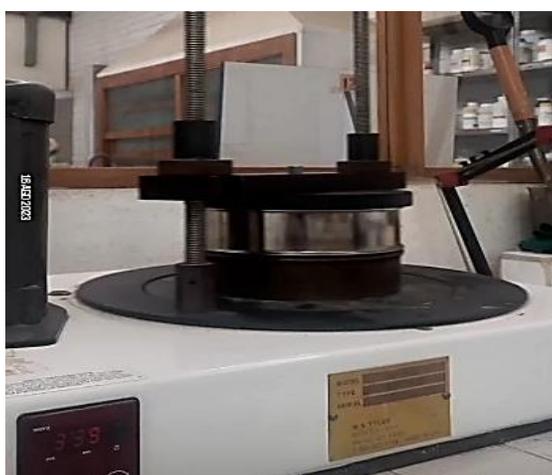


Figura 7. W. S. Tyler modelo RX-812 tipo 110V 60 Hz serie 22710.

3.5 Ensayos eléctricos

Para esta etapa del trabajo, se elaboraron dispositivos que fueron sometidos a ensayos eléctricos y determinar así su potencial para producir corriente eléctrica.

La elaboración de estos dispositivos se llevó a cabo de la siguiente manera: Se inició con el principio del diseño de una pila alcalina establecido en la industria de las pilas, que consiste en tres capas principales; la capa del electrodo positivo (cátodo), el electrodo negativo (ánodo) y una que los separa.

En este diseño, se consideró una capa de aluminio como ánodo, un papel filtro en el que se agregó el electrolito y una capa de residuo industrial minero, como cátodo. Este primer prototipo se muestra en la Figura 8a, con dos alambres de cobre en ambos extremos dónde

se midió el potencial eléctrico, siendo estos el contacto entre el ánodo y cátodo sin tocarse entre ellos. Aunque el sistema mostraba señales, no era fácil mantener estable el potencial eléctrico ya que el electrolito secaba muy rápido y no había manera de sellarlo y los resultados no fueron constantes.

Posteriormente, este diseño se adaptó en un capilar, tal como se muestra en la Figura 8b. Este sistema parecía más estable, ambos extremos se sellaban con silicón y se podían mantener las condiciones para poder medir el potencial eléctrico constante.

Al continuar experimentando, se determinó que el residuo minero no solo funcionaba como cátodo, sino que al descartar el papel filtro como transportador del electrolito, se agregó el electrolito directamente al residuo minero industrial, esta mezcla presenta las condiciones para actuar como un electrolito sólido. Se continuó considerando el aluminio como ánodo, pero ahora el cobre como cátodo. Este nuevo diseño mostró mejores resultados en el potencial eléctrico ya que no intervino el papel filtro en el intercambio iónico del sistema. En la Figura 8c, se muestra cómo se estableció el diseño.

Finalmente, se adaptó el último diseño en el tubo capilar obteniendo el prototipo final mostrado en la Figura 8d, en este se decidió mantener el sistema en una cápsula cubierta de resina para mantener estable el potencial eléctrico.

Los prototipos de baterías elaboradas descritos anteriormente, fueron sometidos a diferentes pruebas para verificar su comportamiento eléctrico.

Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- Comportamiento del potencial eléctrico con NaOH, KCl, Na₂SO₄ y agua desionizada.
- Optimización del potencial eléctrico mediante la variación de la concentración entre el electrolito y el residuo industrial.
- Curvas de descarga con un multímetro digital modelo XL830L, Figura 9.

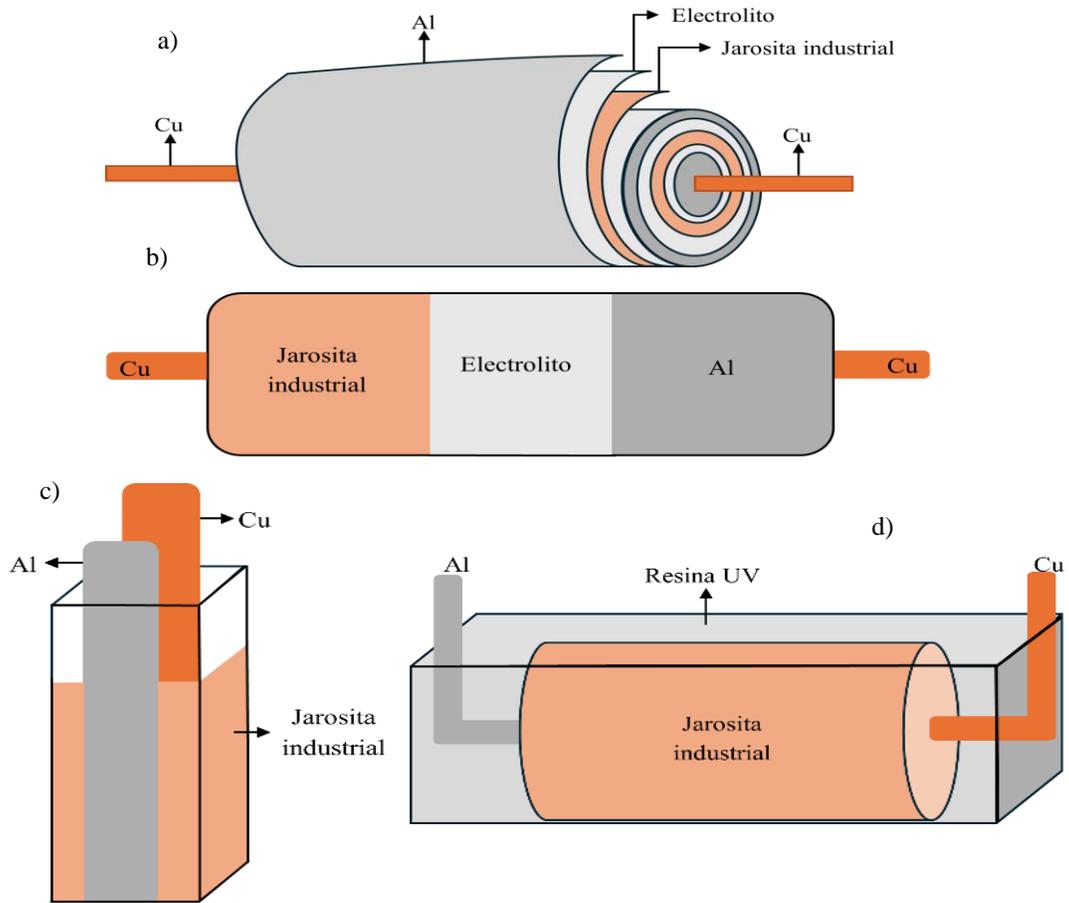


Figura 8 . Evolución de los prototipos de pilas elaborados. a) Con el principio de una pila alcalina; b) Adaptado en un tubo capilar; c) Considerando al residuo como electrolito; y d) Prototipo final encapsulado en resina.



Figura 9. Multímetro digital modelo XL830L

Capítulo 4. Resultados y Discusiones

4.1 Difracción de Rayos X

La Figura 10, muestra el espectro de Difracción de Rayos X (DRX), obtenido de la muestra de jarosita industrial, donde se puede apreciar las especies minerales mayoritarias que conforman a este residuo. Este espectro, fue caracterizado usando el software MATCH 3.0 (Desarrollado por Crystal Impact, en Bonn Alemania). Este software es de gran ayuda en la identificación de fases minerales utilizando datos de difracción de polvo.

De acuerdo con lo encontrado en esta muestra, se puede observar que el material consiste principalmente de dos fases minerales: Jarosita (PDF 96-900-7016), la cual es el producto de la eliminación de Fe a partir de las soluciones de lixiviación, y Franklinita (PDF 96-900-2497), fase formada durante la calcinación del mineral de Zn (esfalerita) y que no logró ser disuelta durante la etapa de lixiviación llevada a cabo a altas temperaturas y concentraciones de ácido.

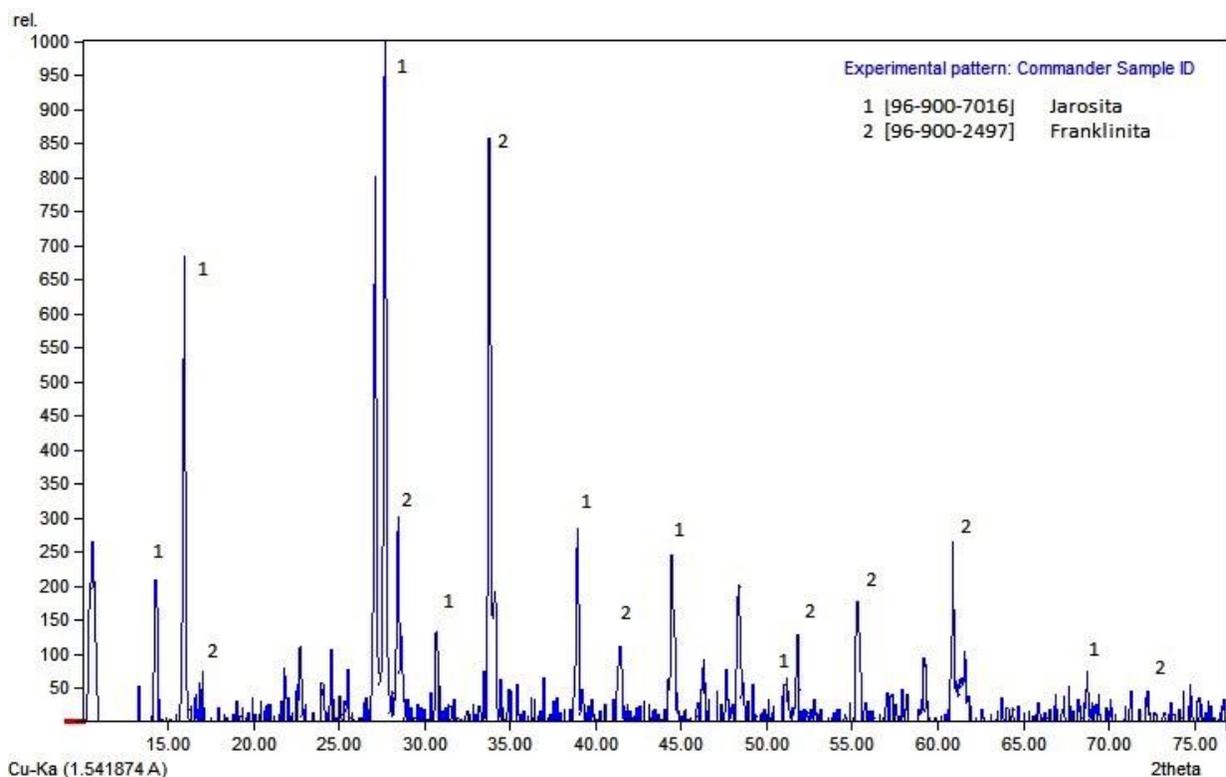


Figura 10. Difractograma de la jarosita industrial

4.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB) y Microanálisis por dispersión de energías (EDS)

La caracterización morfológica y de composición puntual de la muestra, se llevó a cabo mediante MEB-EDS. La Figura 11, muestra una imagen general de la distribución de partículas que conforman la muestra del residuo jarosítico (obtenida mediante Electrones Secundarios, SE), así como un detalle de la misma imagen. Se puede apreciar una morfología irregular, no bien definida, cristalina y con tamaños de partícula que van de 1 a 10 μm , aproximadamente.

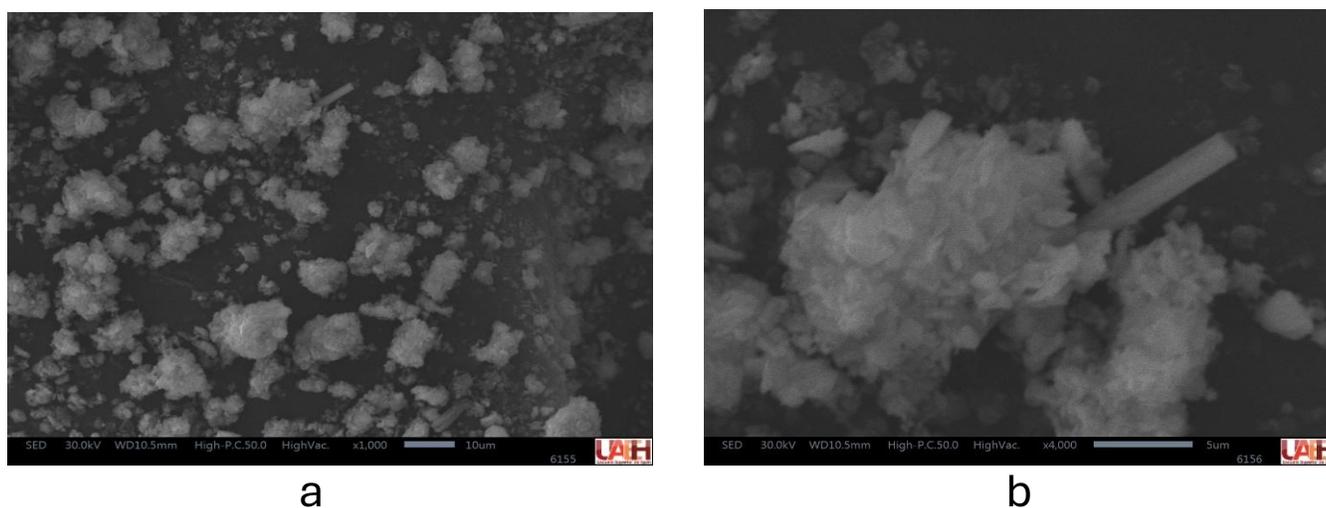


Figura 11. Fotomicrografías tomadas por SEM (SE).
a) Imagen general (x1000) y b) Detalle de una partícula (x4000).

Por otro lado, la Tabla 1 muestra el promedio de al menos 10 análisis puntuales realizados en la muestra de la jarosita industrial, mediante EDS. Este análisis se llevó a cabo en un volumen promedio de $1 \mu\text{m}^3$, y representa una aproximación semi cuantitativa de la composición promedio de las partículas de jarosita industrial. De esta forma, los contenidos elementales son solo orientativos y tendrán que confirmarse con técnicas más adecuadas para obtener una composición química más precisa.

Tabla 1, Composición promedio, semi cuantitativa y puntual de las partículas de jarosita industrial. Obtenida por SEM-EDS.

Elemento	% en peso
C	33.90
O	49.29
Mg	0.100
Al	0.260
Si	1.110
S	2.870
K	0.060
Ca	0.050
Fe	8.790
Cu	0.460
Zn	2.300
Pb	0.640
As	0.150
Ag	0.010

De los elementos más importantes que pueden observarse, resaltan el Fe, Cu, Zn, As y Pb. Estos pueden jugar un papel importante en los procesos electroquímicos que puedan tener lugar en este tipo de residuo, para la generación de energía. De igual modo, se observa la presencia de Fe, S, O, K, Ag, los cuales son elementos que forman o pueden formar parte de la estructura jarosítica.

4.3 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Para el caso del análisis realizado mediante FTIR, esta técnica puede ayudarnos a determinar parte de la composición química de sustancias, mediante el análisis de la interacción entre la radiación de infrarrojo y las moléculas de la muestra. Con esta técnica, se puede medir la absorbancia o transmitancia de la radiación de infrarrojo por la muestra en diferentes longitudes de onda, lo que permite identificar grupos funcionales y moléculas presentes en la misma. La Figura 12 muestra el espectro de FTIR obtenido al analizar la muestra de la jarosita industrial.

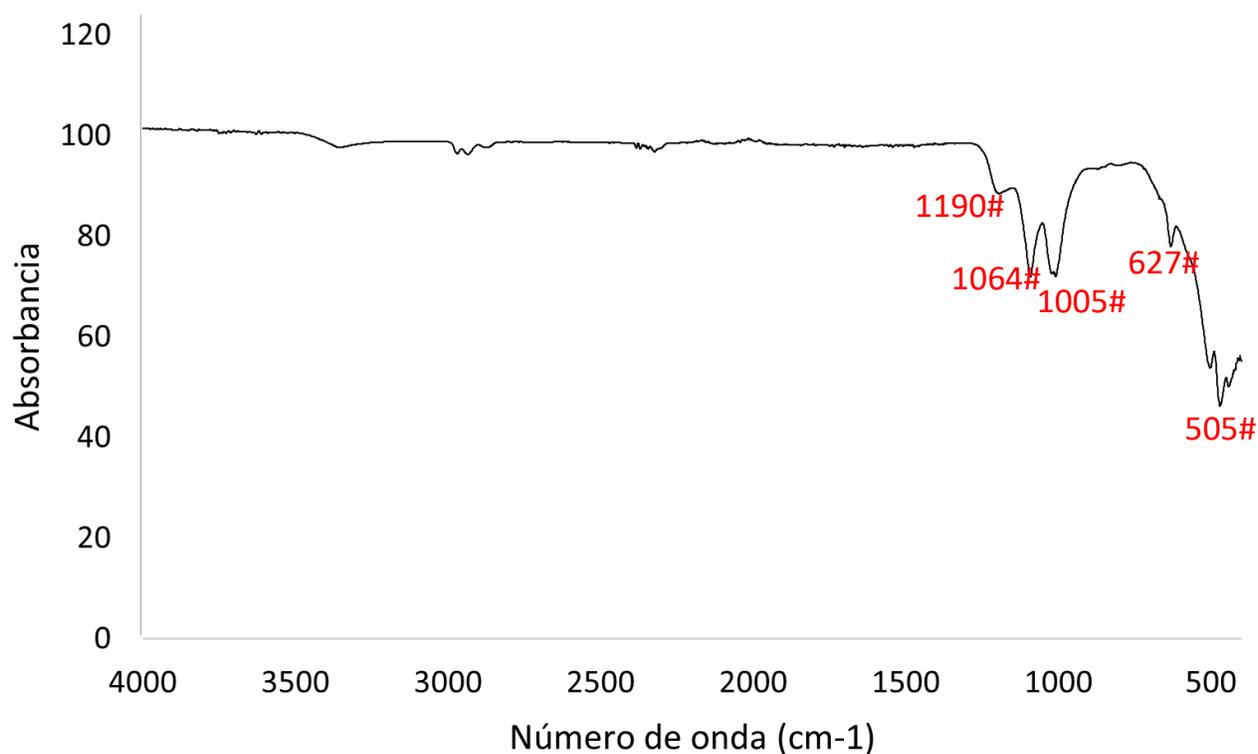


Figura 12. Espectro FTIR de la escombrera minera.

Se pueden observar en dicho espectro, los picos correspondientes a las bandas de absorción de vibraciones ν_3 (doble) y ν_1 para sulfatos (1005, 1084 y 1190 cm^{-1}). Por otro lado, la presencia de SO_4^{2-} se define en 627 cm^{-1} y la vibración de la coordinación octahedral del FeO_6 (correspondiente a Fe_3 y OH_6) está en 505 cm^{-1} .

4.4 Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS)

Finalmente, el análisis de XPS, se llevó a cabo para poder determinar la composición química y la estructura electrónica de la superficie de la muestra de jarosita industrial. Esta técnica mide la energía de los fotoelectrones emitidos cuando los átomos en la superficie del material son excitados por radiación de rayos X. Así, esta técnica nos da información sobre los elementos químicos presentes en la muestra y determina el estado de oxidación de dichos elementos. La Figura 13 muestra el espectro de XPS de la jarosita industrial.

Se observan bandas de adsorción en la región de $1000\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ (1005 , 1084 y 1190 cm^{-1}), que corresponden a regiones que representan la vibración de estiramiento de los grupos sulfato (SO_2). También se observan bandas de absorción en la región de $500\text{-}700\text{ cm}^{-1}$, que representan la vibración de estiramiento de los enlaces Fe-O (Cruz-Hernández et al., 2025).

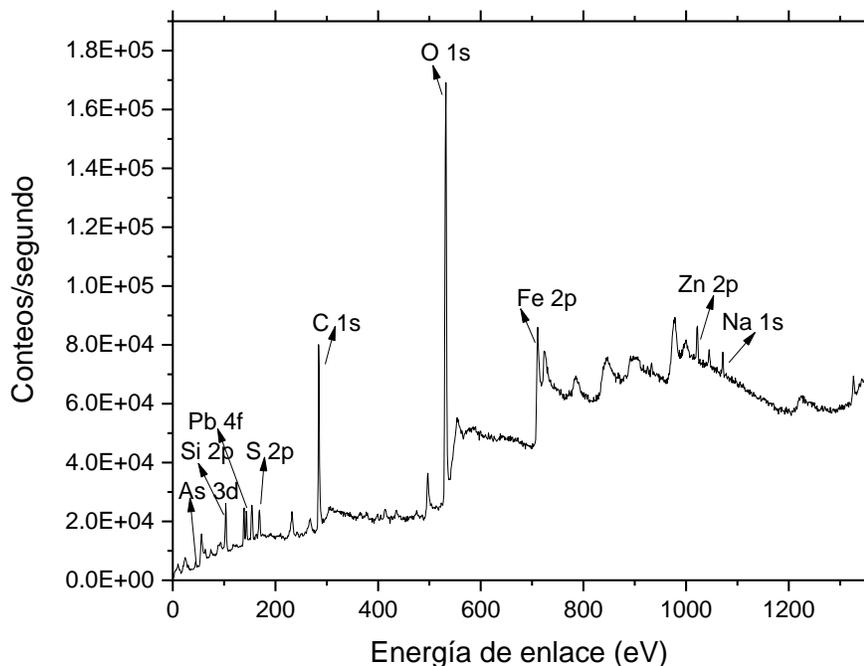


Figura 13. Espectro de XPS obtenido del análisis de la muestra de jarosita precipitada en la planta de zinc

A partir de estos resultados, se puede observar que los elementos presentes corresponden a la jarosita, la cual puede ser una solución sólida de Na, K y Pb. También

puede verse que, de acuerdo con la presencia de Zn y Fe, se confirma la existencia de la franklinita encontrada mediante DRX. De igual modo, se confirma la presencia de arsénico.

4.5 Ensayos eléctricos

Comportamiento en diferentes electrolitos

Para determinar el comportamiento eléctrico del residuo industrial minero se probaron diferentes electrolitos, tales como NaOH, KCl, Na₂SO₄, y agua desionizada. En cuatro viales de policarbonato se agregaron 0.20 g de residuo minero industrial, cada vial tenía su respectivo ánodo de Al y cátodo de Cu, como se muestra en la Figura 8c. Con un gotero se le agregaron a cada uno, 4 gotas de los diferentes electrolitos disueltos en agua desionizada en condiciones de sobresaturación. Con el multímetro, se midió el comportamiento del potencial eléctrico durante 15 minutos. El objetivo principal, era seleccionar el que presentara mayor estabilidad y potencial eléctrico, para continuar con los siguientes ensayos.

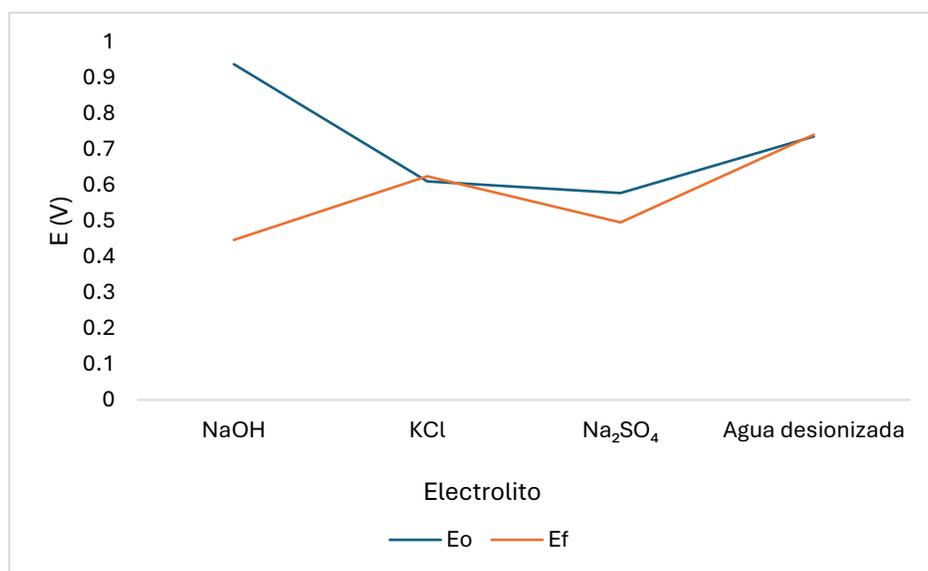


Figura 14. Grafica que muestra la diferencia de potencial eléctrico entre los diferentes electrolitos que se consideraron.

En la Figura 14, se reporta que con NaOH se alcanzó un potencial eléctrico de 0.90 V al inicio, sin embargo, disminuyó hasta 0.40 V; en el caso de KCl el potencial eléctrico se mantuvo constante de 0.60 V; para Na₂SO₄ inició con un valor del rango de 0.50 V disminuyendo poco al final de la medición; y para el caso del agua desionizada empezó y terminó en el rango de 0.70 V. Con estos resultados se determinó que a pesar de que el NaOH

registró el mayor potencial, no se mantuvo, disminuyendo su valor significativamente, descartando su uso. Se eligió el agua desionizada como electrolito sólido, para continuar con las evaluaciones debido a que presentó un potencial mayor que el KCl y el Na₂SO₄, además de que es económico comparado con las demás opciones, agregando un valor importante a la investigación.

Evaluación de la concentración

Para optimizar el potencial eléctrico se usó un vial de 10 mL en que se varió la cantidad de residuo minero industrial y agua desionizada. En la tapa del vial se le acomodaron dos láminas, una del ánodo de Al y otra del cátodo de Cu. En las puntas inferiores se les midió 0.50 mm aproximadamente, limitando el área de contacto entre la muestra y las láminas. El sistema se muestra en la Figura 15. Se midió el potencial eléctrico con el multímetro digital durante 15 minutos. El volumen que se consideró para cada muestra fue de 1.0 mL, 1.5 mL, 2.0 mL, 2.5 mL, 3.0 mL 3.5 mL, 4.0 mL, 4.5 mL y 5.0 mL de agua desionizada y la cantidad de residuo minero industrial fue de 0.10 g, 0.20 g, 0.30 g, 0.40 g, 0.50 g, 0.60 g, 0.70 g, 0,80 g, 0.90 g y 1.00 g. Los resultados de cada muestra se reportan de la Figura 16 a 25.



Figura 15. Diseño para optimizar la concentración entre el residuo industrial minero y el agua desionizada.

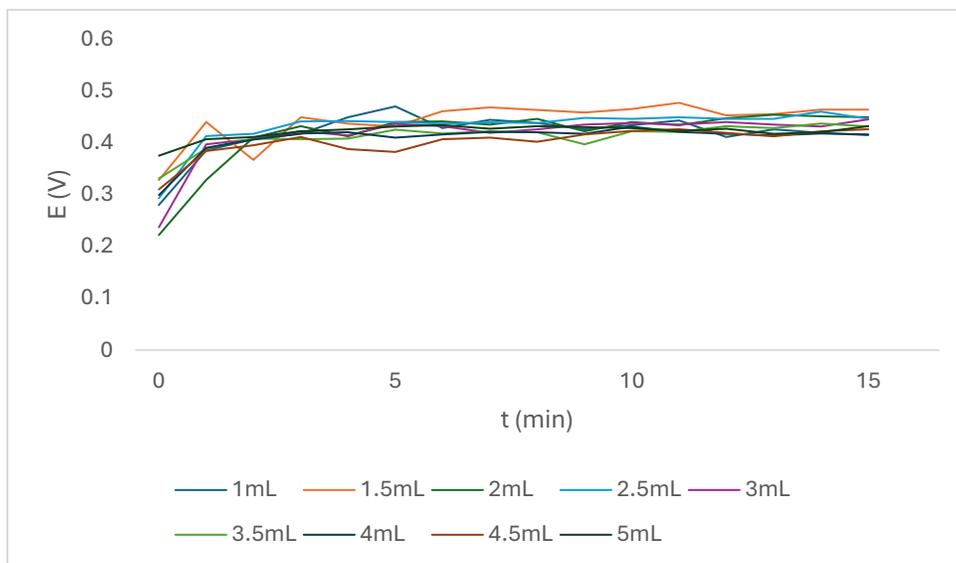


Figura 16. Resultados de la muestra con 0.10 g de residuo minero industrial.

En la Figura 16 se reporta la variación del potencial eléctrico (E) en voltios (V) durante un periodo de 15 minutos, cuando en la celda se utilizó 0.10 g de residuo industrial en diferentes volúmenes de agua desionizada de 1 mL, 1.5 mL, 2 mL, 2.5 mL, 3 mL, 3.5 mL, 4 mL, 4.5 mL y 5 mL. En los volúmenes menores de agua desionizada (1 mL y 1.5 mL) se encontró un potencial inicial mayor, lo que indica una mayor concentración de residuos y una mayor actividad electroquímica inicial. A medida que aumenta el volumen de agua desionizada, el potencial eléctrico inicial es menor y la disminución a lo largo del tiempo es más gradual. Esto puede deberse, a la menor concentración de residuos en soluciones con mayor volumen de agua. Para todos los volúmenes de agua desionizada, se observa un descenso generalizado en el potencial eléctrico a medida que transcurre el tiempo.

Resultados similares se obtuvieron cuando se varió la cantidad de residuo minero, para los casos de 0.2 g (Figura 17), 0.3 g (Figura 18), 0.4 g (Figura 19), 0.5 g (Figura 20), 0.6 g (Figura 21), 0.7 g (Figura 22), 0.8 g (Figura 23), 0.9 g (Figura 24) y 1 g (Figura 25). Se nota que, en todos los casos, el potencial eléctrico inicial generado es el más bajo y alcanza su valor máximo en un periodo de 5 minutos, aproximadamente. Después de este valor máximo de potencial, se mantiene constante hasta 15 minutos que fue cuando se suspendió la medición. Lo anterior indica que esta celda es capaz de proporcionar un potencial constante por al menos este periodo de tiempo.

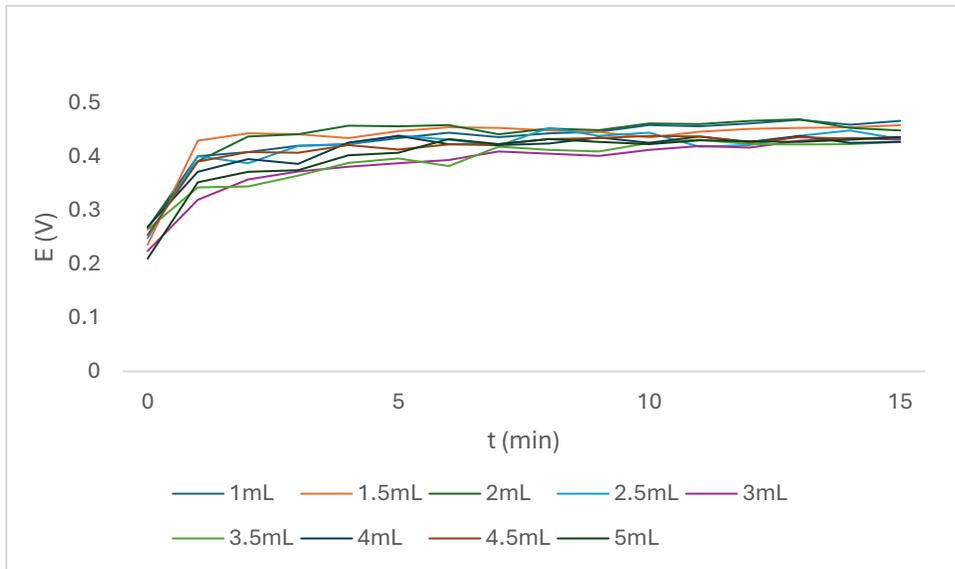


Figura 17. Resultados de la muestra con 0.20 g de residuo minero industrial

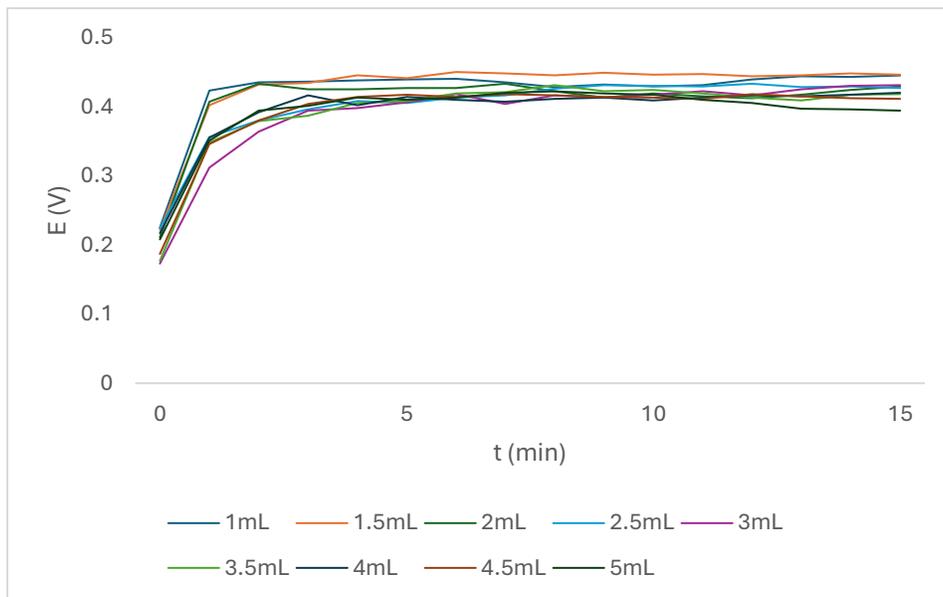


Figura 18. Resultados de la muestra con 0.30 g de residuo minero industrial.

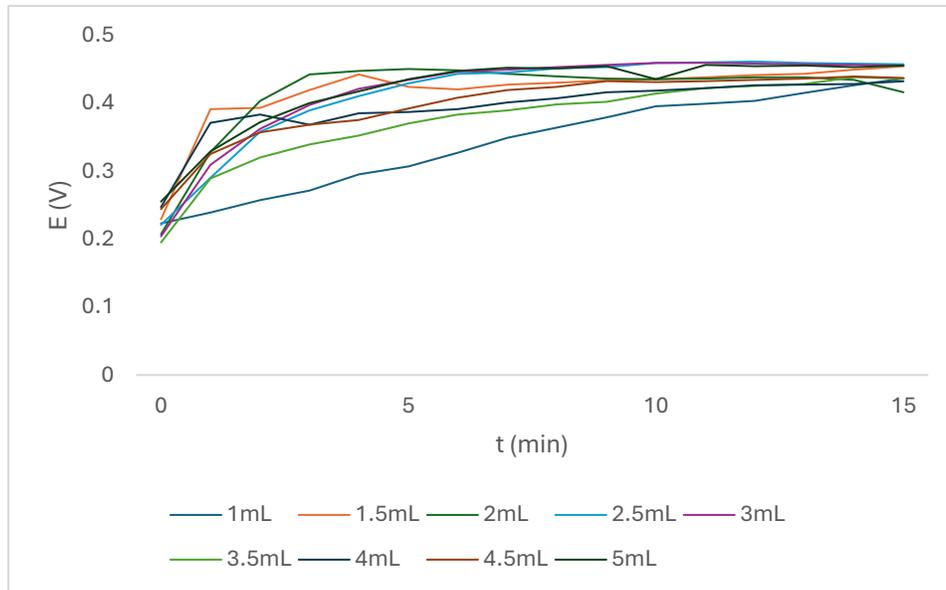


Figura 19. Resultados de la muestra con 0.40 g de residuo minero industrial.

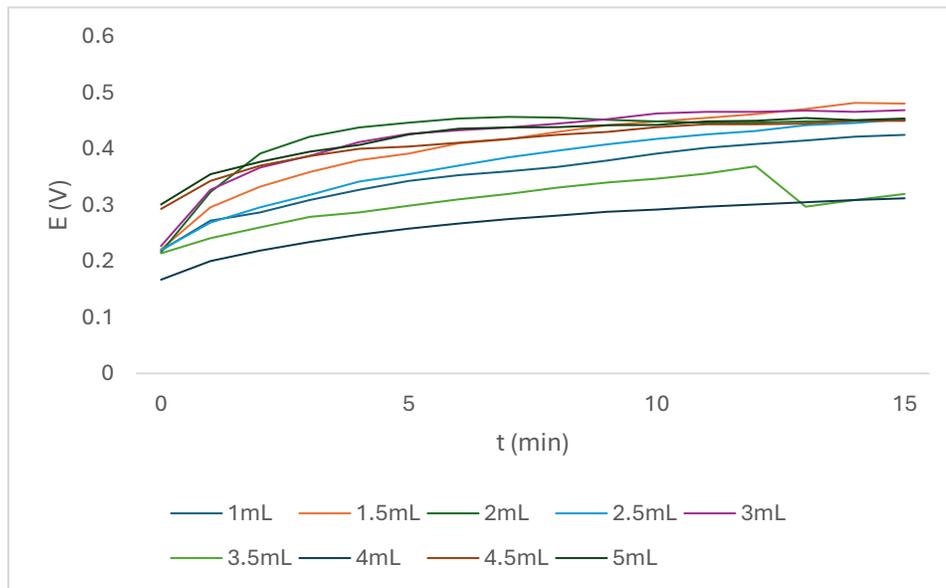


Figura 20. Resultados de la muestra con 0.50 g de residuo minero industrial.

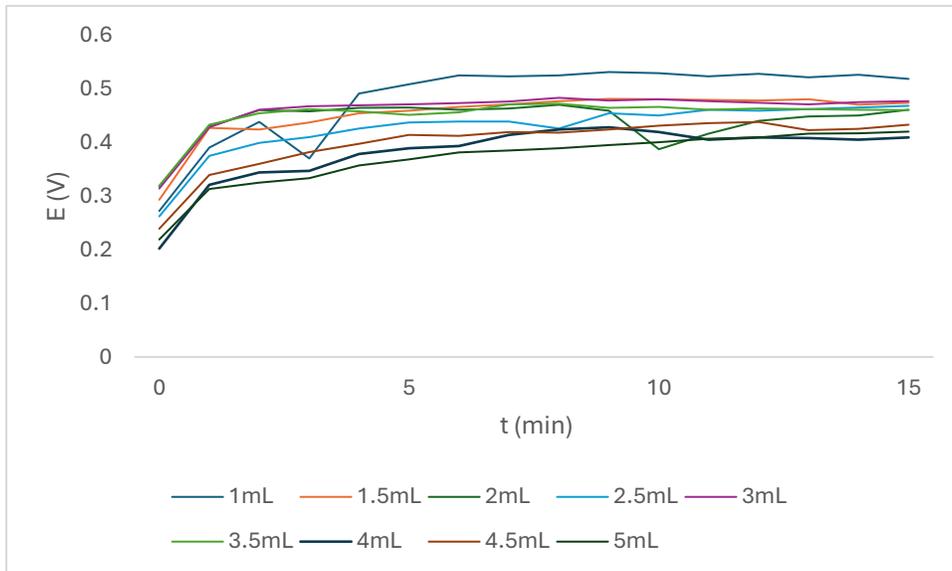


Figura 21. Resultados de la muestra con 0.60 g de residuo minero industrial.

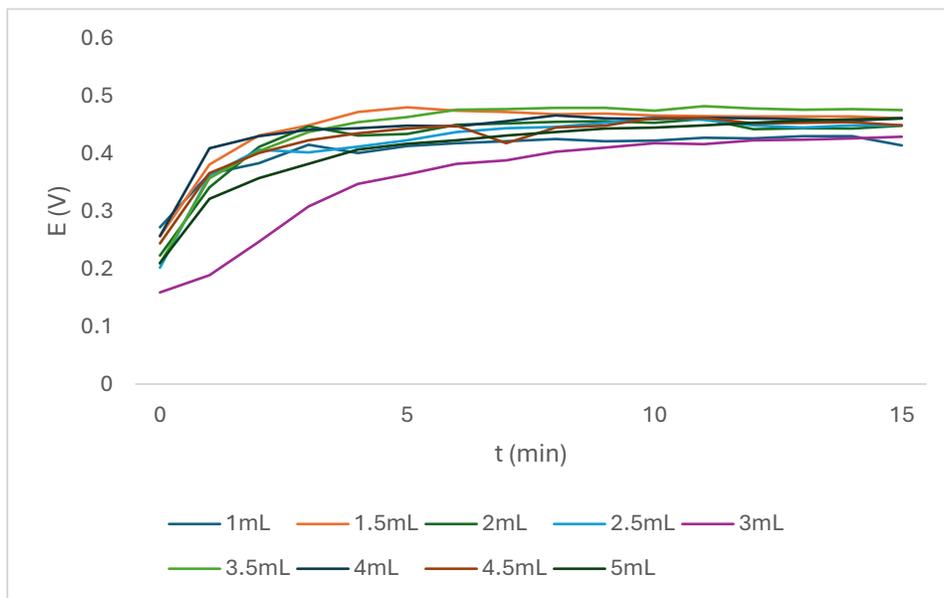


Figura 22. Resultados de la muestra con 0.70 g de residuo industrial minero.

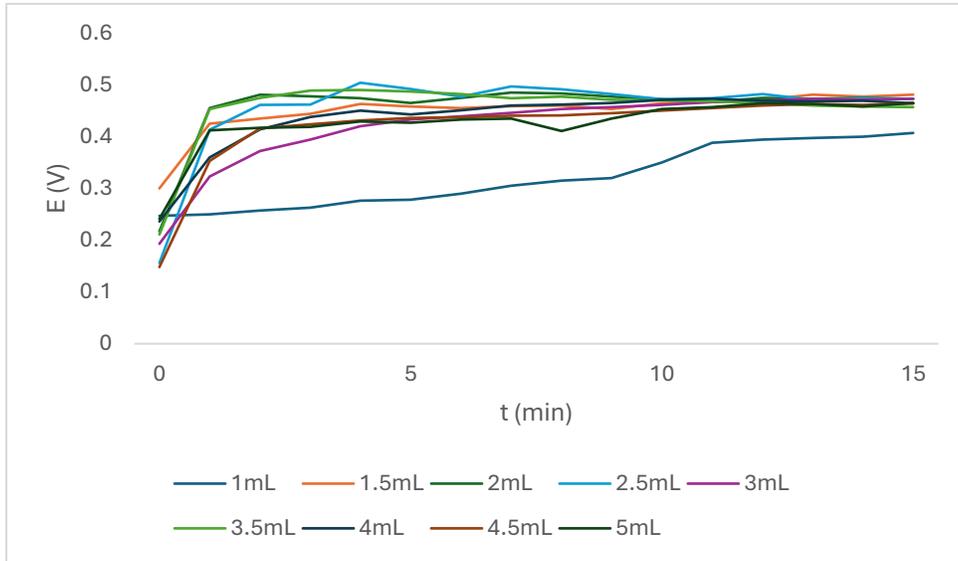


Figura 23. Resultados de la muestra con 0.80 g de residuo minero industrial.

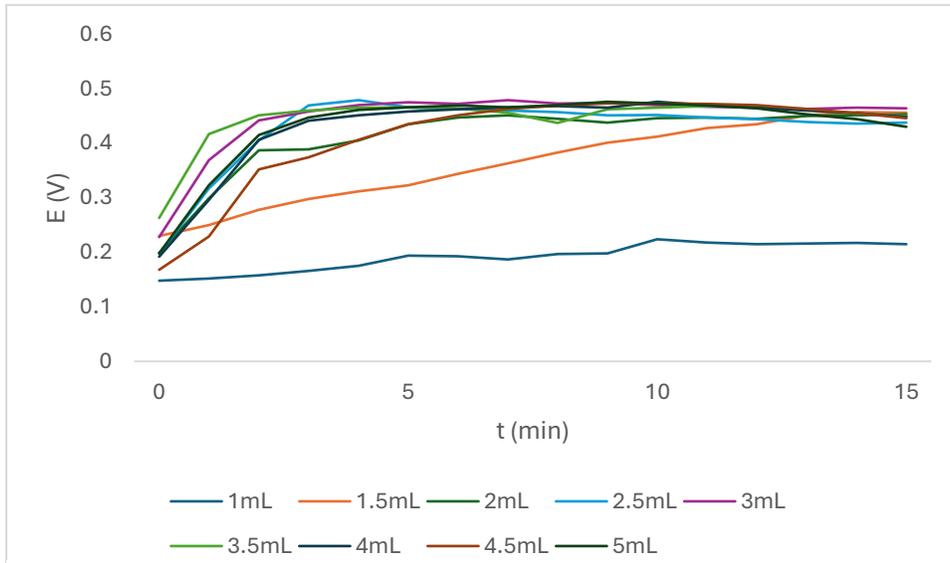


Figura 24. Resultados de la muestra con 0.90 g de residuo minero industrial.

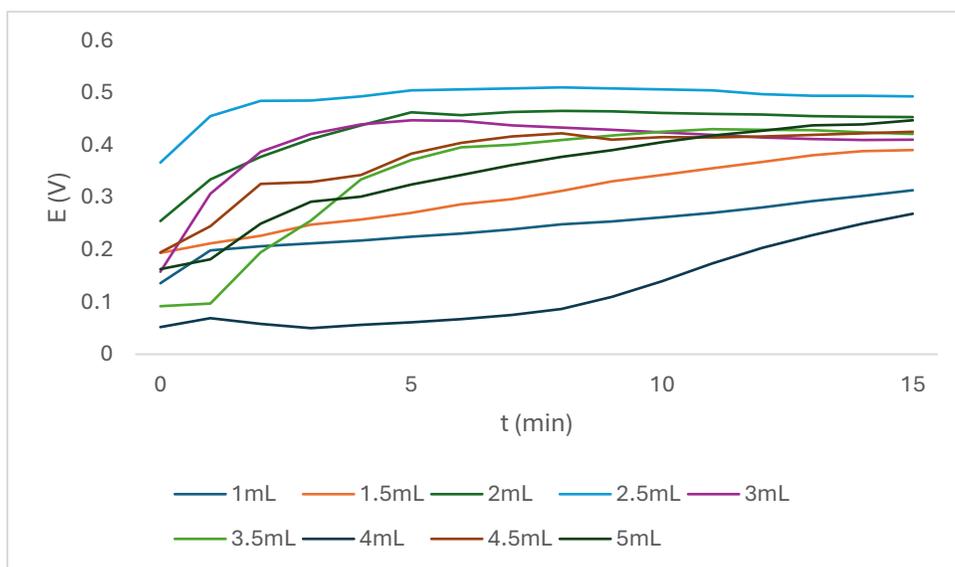


Figura 25. Resultados de la muestra con 1.00 g de residuo minero industrial.

Tabla 2. Resultados más importantes de la concentración

Residuo industrial minero (g)	Agua desionizada (mL)	E_o (V)	E_m (V)	E_f (V)
0.1	1.5	0.328	0.468	0.464
0.2	2.0	0.267	0.441	0.448
0.3	1.5	0.222	0.448	0.446
0.4	3.0	0.204	0.449	0.455
0.5	2.0	0.216	0.457	0.451
0.6	1.0	0.272	0.523	0.518
0.7	3.5	0.209	0.477	0.475
0.8	1.5	0.300	0.459	0.481
0.9	3.0	0.228	0.479	0.464
1.0	2.5	0.367	0.509	0.494

A partir de los resultados de las Figuras 16 a 25, se tomaron en cuenta los mayores potenciales eléctricos de cada muestra con residuo industrial minero desde 0.1 g hasta 1.0 g en los diferentes volúmenes de agua desionizada. Los cuales se reportan en la Tabla 2. Se determinó que la concentración que mayor optimizó el valor del potencial eléctrico, fue con 0.60 g de residuo industrial minero en 1.00 mL de agua desionizada.

Sin embargo, se determinó que la consistencia de la mezcla no era lo suficientemente pastosa para su uso como un electrolito sólido. Por esta razón, se propuso encontrar una concentración que cumpliera con esta característica, manteniendo al mismo tiempo un potencial eléctrico óptimo.

Para esta prueba se comenzó con 1.00 g de residuo industrial minero en 1.00 mL y 0.50 mL de agua desionizada para observar el comportamiento en la consistencia de ambos. Después se realizó la prueba con 0.50 g en 200 μ L y 0.25 g en 100 μ L. Los resultados se muestran en la Figura 26.

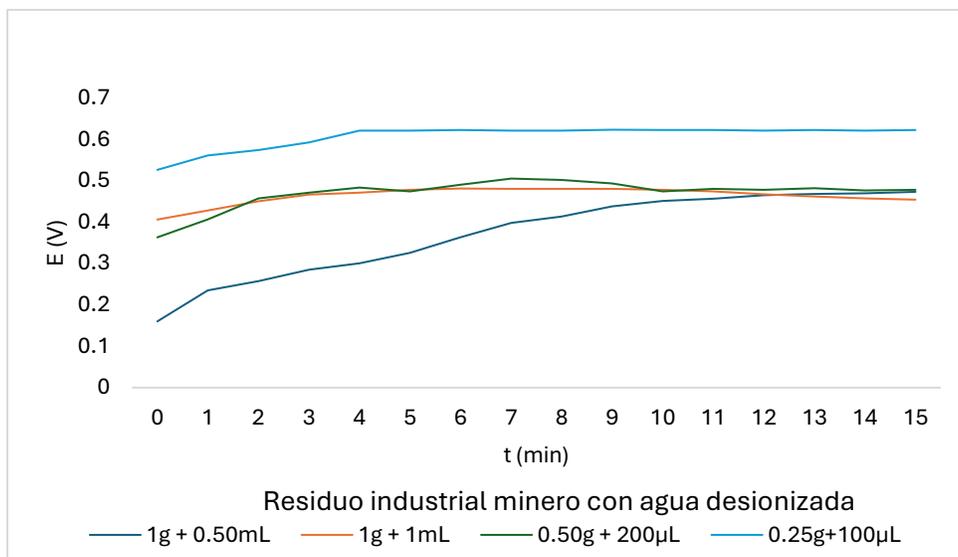


Figura 26. Resultados de las muestras con el residuo industrial minero y agua desionizada para una muestra pastosa.

En el caso de la concentración de 1.0 g de residuo industrial minero, con 0.50 mL de agua desionizada, la curva comienza en un potencial menor aumentando lentamente hasta llegar a los valores de 0.4 V y la consistencia no fue muy pastosa. La curva de 1.0 g con 1.0 mL de agua desionizada tampoco presentó las condiciones de una mezcla pastosa, pero se mantuvo en un potencial estable de 0.4 V durante todo el tiempo de medición. Con la concentración de residuo industrial minero de 0.50 g y 200µL de agua desionizada, se obtuvo una consistencia ligeramente pastosa, y aún era difícil de mantener firme la mezcla. Se mantuvo en el rango de 0.40 V, durante el tiempo de medición.

Finalmente, el mejor resultado fue el de la concentración con 0.25 g de residuo industrial minero y 100 µL de agua desionizada. Se logró una consistencia pastosa, fácil de majear y con valores de potencial eléctrico mayores que en las anteriores concentraciones, entre los 0.6 V.

Curvas de descarga

Para evaluar la capacidad de la batería construida con el residuo industrial minero, se diseñó un dispositivo en un vial, donde el residuo actúa como electrolito sólido, una lámina de aluminio funciona como ánodo y una lámina de cobre como cátodo, como se muestra en la Figura 27.

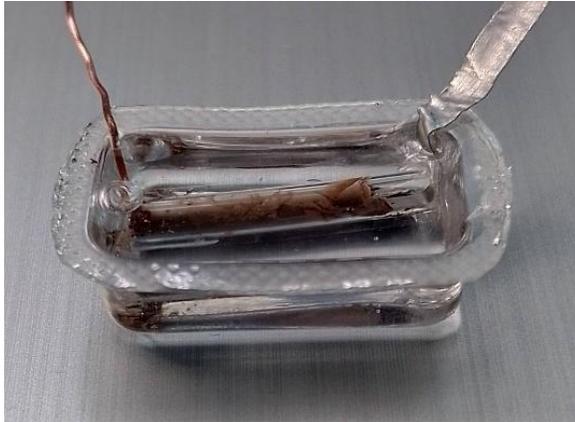


Figura 27. Dispositivo para evaluar la capacidad batería.

Se continuo con la evaluación de las curvas de descarga de la batería, con el uso del multímetro digital bajo el consumo de 7 resistencias diferentes: 1.22 M Ω , 1.33 M Ω , 1.56 M Ω , 1.82 M Ω , 2 M Ω , 3.2 M Ω Y 4.3 M Ω . Los resultados se muestran de la Figura 28 a la Figura 32.

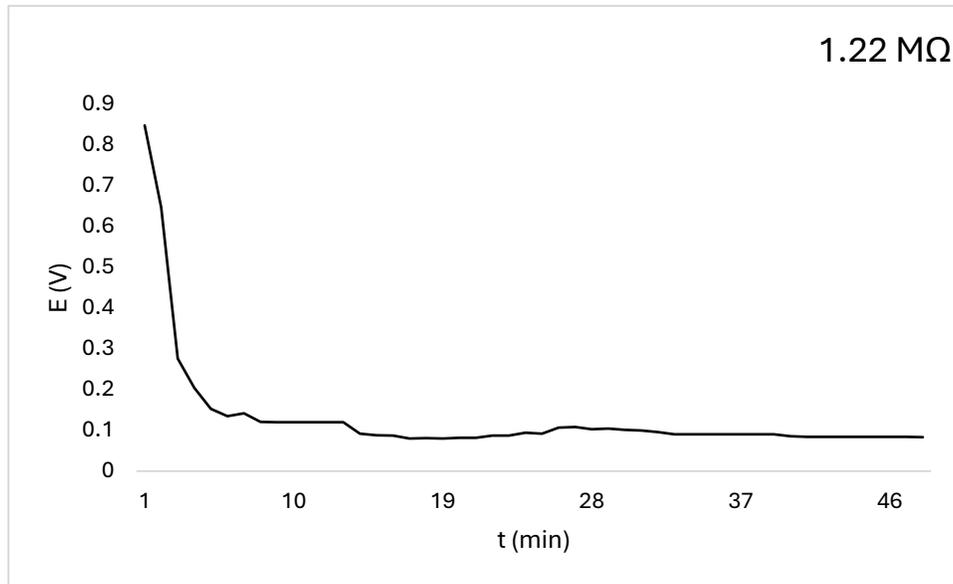


Figura 28. Curva de descarga con una resistencia de 1.22 MΩ.

En la Figura 28 se reporta la curva de descarga del dispositivo bajo el consumo de una resistencia de 1.22 MΩ. El potencial inicial fue de 0.848 V, y se evaluó su comportamiento durante 2 días. Después de las primeras 5 h, se mantuvo un potencial estable en el rango de 0.100 V. En las 14 h disminuyó el potencial a 0.092 V, sin embargo, se continuó evaluando la capacidad del dispositivo para observar su comportamiento. A las 26 h, se incrementó el potencial eléctrico a 0.107 V, y se consideró que el dispositivo ya había sido descargado cuando se registraron valores menores a 0.1 V. A las 32 h el potencial eléctrico disminuyó a 0.096 V, manteniéndose en valores menores de 0.100 V, hasta el fin de la medición.

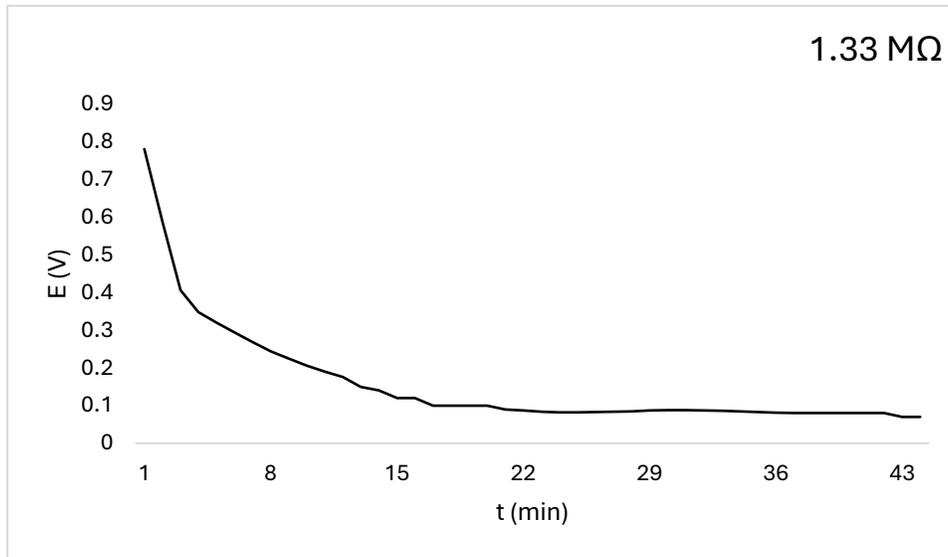


Figura 29. Curva de descarga con una resistencia de 1.33MΩ

En la Figura 29 se reporta la curva de descarga del dispositivo bajo el consumo de una resistencia de 1.33 MΩ durante 1 día 20h. Se consideró que el dispositivo se había descargado a partir de las 21 h, cuando llegó a un potencial menor de 0.1 V con un valor de 0.09 V.

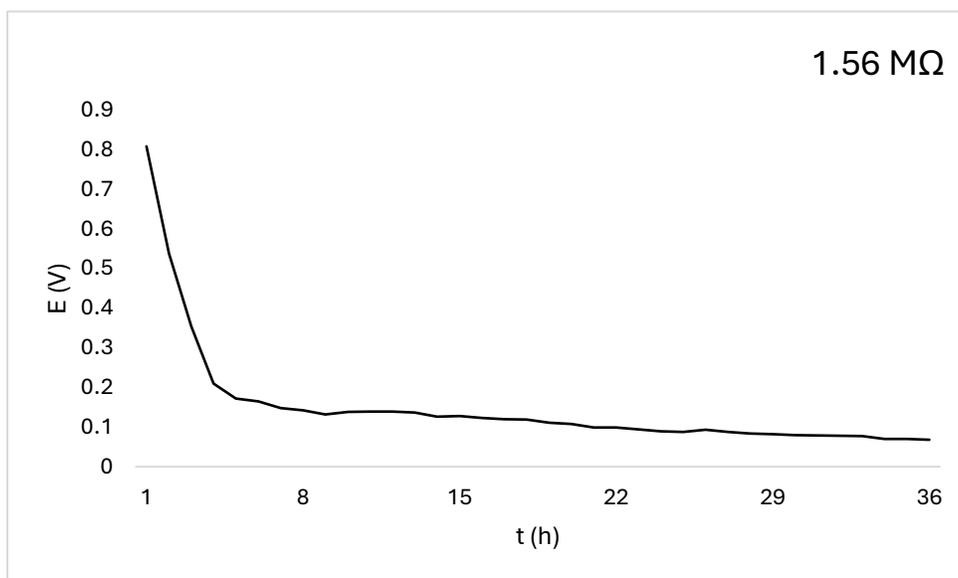


Figura 30. Curva de descarga con una resistencia de 1.56 MΩ

En la Figura 30, se reporta la curva de descarga del dispositivo bajo el consumo de una resistencia de $1.56\text{ M}\Omega$ durante 1 día 12 h. Inició con un potencial eléctrico de 0.808 V , y a partir de las 5 h el potencial eléctrico se mantuvo estable en el rango de 0.10 V . El tiempo de descarga de la pila fue a las 21 h, cuando se registró un potencial eléctrico de 0.099 V .

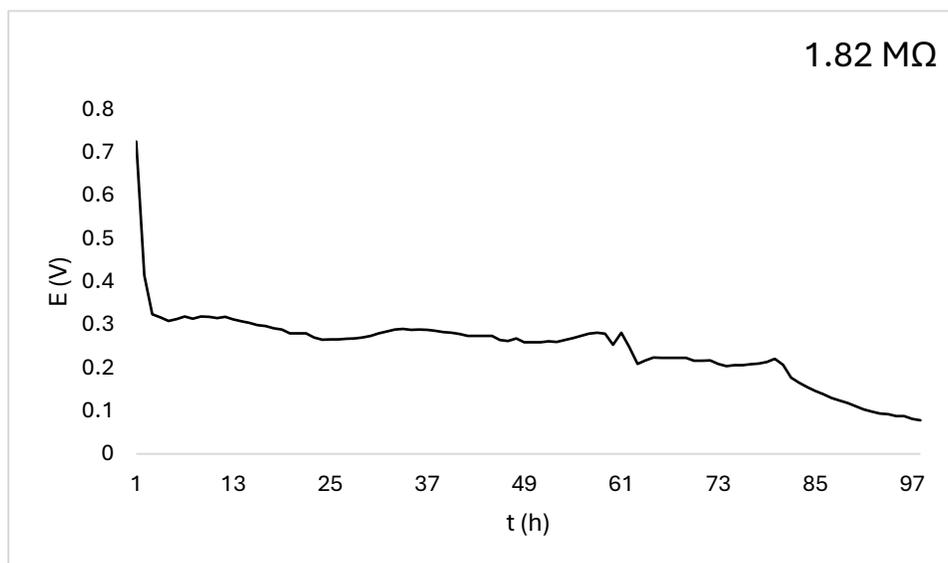


Figura 31. Curva de descarga con una resistencia de $1.82\text{ M}\Omega$

En la Figura 31, se reporta la curva de descarga del dispositivo bajo el consumo de una resistencia de $1.82\text{ M}\Omega$ durante 4 días 2 h, con un potencial eléctrico inicial de 0.725 V . Disminuyó el potencial eléctrico en la primera hora hasta 0.414 V , y a partir de las primeras 3 h se mantuvo el potencial eléctrico en los valores de 0.30 V . Hasta las 81 h el potencial eléctrico se mantuvo en el rango de potencial eléctrico de 0.10 V . A partir de las 92 h, el dispositivo se consideró descargado llegando a un potencial menor de 0.10 V , y hasta el final de la medición con un valor de 0.098 V .

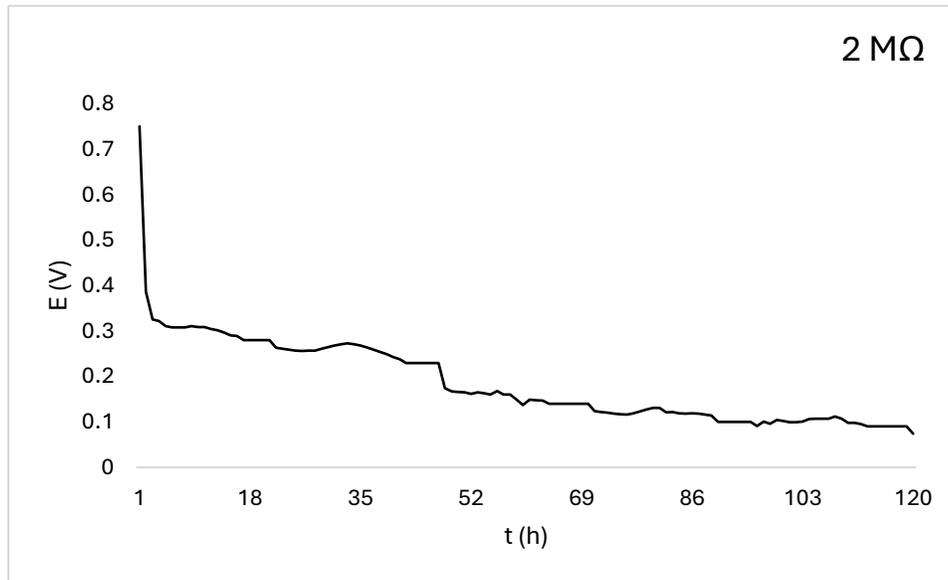


Figura 32. Curva de descarga con una resistencia de $2\text{ M}\Omega$

En la Figura 32, se reporta la curva de descarga del dispositivo bajo el consumo de una resistencia de $2\text{ M}\Omega$ durante 15 días, con un potencial eléctrico inicial de 0.751 V . Disminuyó el potencial eléctrico hasta 0.387 V , manteniéndose en el rango de 0.30 V hasta las 13 h . A partir de las 14 h y hasta las 47 h , se mantuvo un potencial eléctrico entre 0.20 V . A partir de las 48 h y hasta 109 h , se mantuvo un potencial eléctrico entre 0.10 V . Finalmente se consideró que la pila se había descargado con un potencial eléctrico de 0.098 V , a las 110 h .

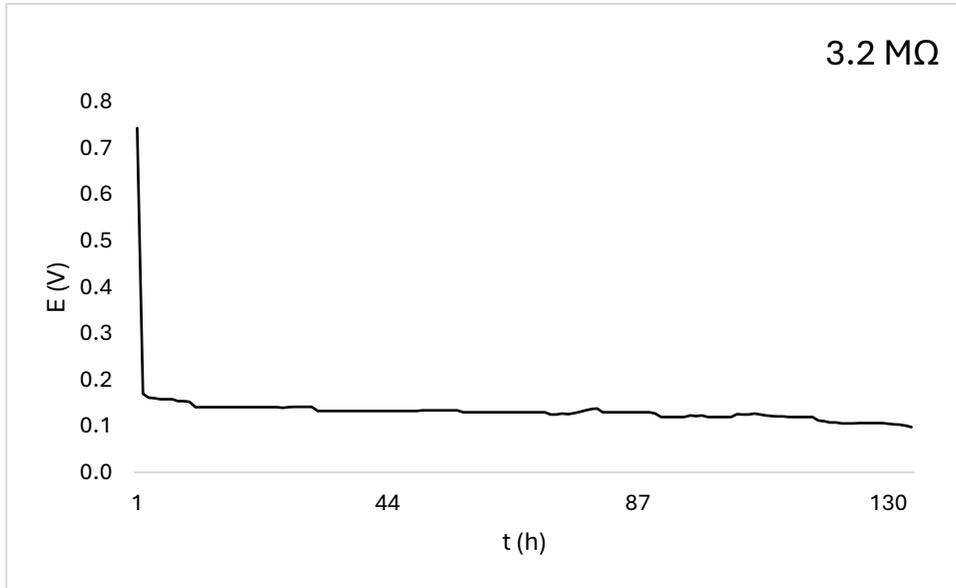


Figura 33. Curva de descarga con una resistencia de 3.2 MΩ

En la Figura 33, se reporta la curva de descarga del dispositivo bajo el consumo de una resistencia de 3.2 MΩ durante 5 días 14 h, con un potencial eléctrico inicial de 0.744 V. Desde la primera hora disminuyó el potencial eléctrico hasta el rango de 0.10 V, manteniéndose estable durante el tiempo de descarga. Se consideró que el dispositivo se había descargado cuando llegó a un potencial eléctrico de 0.098 V.

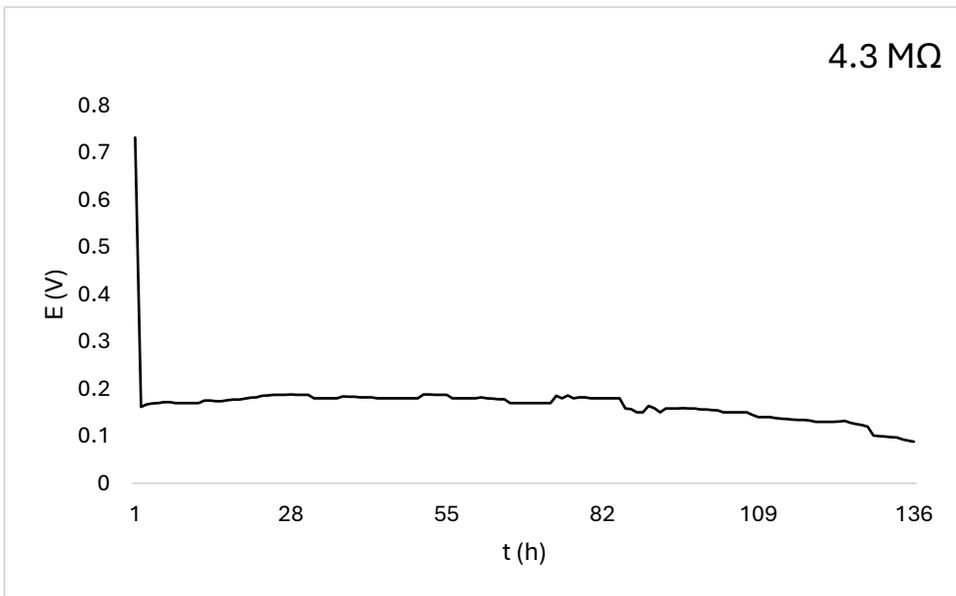


Figura 34. Curva de descarga con una resistencia de 4.3 MΩ

En la Figura 34, se reporta la curva de descarga del dispositivo bajo el consumo de una resistencia de 4.3 M Ω durante 5 días 16 h, con un potencial inicial de 0.732 V. Disminuyó desde la primera hora hasta un potencial de 0.162 V, manteniéndose en ese rango de potencial hasta las 130 h. Se consideró que el dispositivo se había descargado a las 131 h cuando llegó a un potencial eléctrico de 0.099 V, manteniéndose menor a 0.1 V hasta el final de la evaluación que se consideró.

En la Tabla 3, se reportan los resultados más importantes de las curvas de descarga.

Tabla 3. Resultados de las curvas de descarga.

Resistencia (MΩ)	E_o (V)	Tiempo de descarga (h)	E_f (V)
1.22	0.848	32	0.083
1.33	0.781	21	0.070
1.56	0.808	21	0.068
1.82	0.725	92	0.078
2	0.751	110	0.074
3.2	0.744	134	0.098
4.3	0.732	131	0.088

Evaluación de la capacidad de generación de energía eléctrica de la batería construida

Para realizar la prueba en la que se muestra la aplicación de la energía generada por el dispositivo, se unieron en serie tres de estos sistemas, el multímetro mostró un potencial total de 1.64 V. Para encender un led rojo se necesitan de 1.5 a 3.0 V, en la Figura 35 se muestra que fue posible encender uno, pero con poca intensidad. Para encender una calculadora básica también se necesitan 1.5 V, en la Figura 36 se muestra que fue posible encender una.

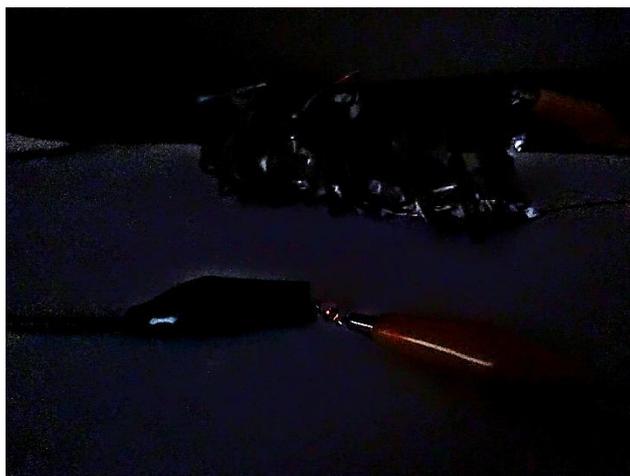


Figura 35. Dispositivo 1. Led rojo



Figura 36. Dispositivo 2. Calculadora básica

Discusión

En base a los resultados encontrados por DRX, se comprueba que el material es una jarosita, procedente de los circuitos de lixiviación, que principalmente consiste en jarosita y tiene contenidos de franklinita, la cual es el resultado primario del proceso de tostación y que no llegó a ser disuelta en la etapa de lixiviación ácida, tal como fue descrito en trabajos anteriores (Salinas et al., 2001). Así mismo, mediante SEM se pudo constatar que las partículas muestran una cristalinidad adecuada, que hace que su topografía sea idónea para una adecuada compactación y así poder elaborar los dispositivos generadores de energía, al ser procesadas como una pasta conformada de forma consistente.

Por otro lado, mediante SED-EDS, FTIR y XPS, se define que la muestra contiene los elementos correspondientes a la jarosita y muy posiblemente a la de amonio, plomo y potasio debido a resultados previos donde fue identificada la jarosita sintética (Cerecedo-Sáenz et al., 2022).

Los resultados encontrados en un sistema a la concentración de 100 μL de agua desionizada y 0.2 g de residuo, mostraron la generación de un potencial eléctrico promedio estable de 0.7 V. Al unir en serie 3 de estos sistemas, se logró generar un promedio de potencial eléctrico de 1.5 V. Este valor, representa el mismo potencial que en el estudio donde se encontró que la jarosita sintética de hidronio-potasio, puede ser utilizada como material de cátodo en posibles aplicaciones en baterías de ión litio con un valor de 1.3 V (Hernández-Lazcano et al., 2021).

De igual modo, también es otra alternativa al estudio en dónde la jarosita sintética fue analizada como ánodo y/o cátodo en baterías de ion litio (Ding et al., 2015; Sandineni et al., 2016; Xu et al., 2016; Zhao et al., 2016b), pero actuando en esta ocasión como un electrolito sólido.

Los resultados de las curvas de descarga representan un tiempo prolongado que, comparado con otros estudios muestra una diferencia significativa. Una ficha técnica, muestra que el tiempo de descarga es de 43 h en 3.9Ω de una pila alcalina, con un potencial eléctrico de 1.5 V y que corresponde a 5 años de vida útil (TRONEX, 2020).

Conclusiones

- Un sistema a partir de las reacciones electroquímicas, con el residuo minero industrial actuando como un electrolito sólido, puede generar la energía suficiente para encender un dispositivo que requiera 1.5 V.
- Se reporta por primera vez, la evaluación de las curvas de descarga usando como electrolito solido un residuo minero industrial de una planta electrolítica de zinc. En las que se aprovechan los minerales presentes en el mismo. Reportando un promedio de potencial eléctrico de 0.70 V, y un tiempo de descarga mayores bajo el consumo de resistencias mayores de 1 M Ω con un potencial eléctrico promedio estable de 0.10 V.
- Estos dispositivos, por si solos se pueden utilizar en diversas aplicaciones en las que es necesario como mínimo un potencial eléctrico en el rango de 0.40 V a 0.10 V, como células de biopilas, circuitos de ultra baja potencia, sensores de energía ambiental; nano-dispositivos y competentes individuales como algunos transistores o amplificadores de señal.

Referencias

- Amrani, M., Taha, Y., Haloui, Y. El, Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2020). Sustainable reuse of coal mine waste: Experimental and economic assessments for embankments and pavement layer applications in morocco. *Minerals*, 10(10), 1–17. <https://doi.org/10.3390/min10100851>
- Ball, D. W. (2004). Fisicoquímica. In *J. Phys. Chem. Ref. Data* (1st ed.).
- Boaretto, N., Garbayo, I., Valiyaveetil-SobhanRaj, S., Quintela, A., Li, C., Casas-Cabanas, M., & Aguesse, F. (2021). Lithium solid-state batteries: State-of-the-art and challenges for materials, interfaces and processing. *Journal of Power Sources*, 502, 229919. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2021.229919>
- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. (2024). *Situación Actual de la Industria Minera en México 2020-2023*.
- Cerecedo-Sáenz, E., Hernández-Lazcano, E., González-Bedolla, M. J., Hernández-Ávila, J., Rosales-Ibáñez, R., Gutiérrez-Amador, M. del P., Sánchez-Castillo, A., Arenas-Flores, A., & Salinas-Rodríguez, E. (2022). Synthesis, Characterization and Decomposition of Potassium Jarosite for Adsorptive As(V) Removal in Contaminated Water: Preliminary Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23). <https://doi.org/10.3390/ijerph192315912>
- Chaudhary, N., & Khanuja, M. (2022). Electrochemistry-Concepts and methodologies. In *Electrochemical Sensors: From Working Electrodes to Functionalization and Miniaturized Devices* (pp. 31–50). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823148-7.00002-7>
- Cruells, M., & Roca, A. (2022). Jarosites: Formation, Structure, Reactivity and Environmental. In *Metals* (Vol. 12, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/met12050802>
- Cruz-Hernández, M., García-Cerón, A., Maldonado, R. G. S., Corro-Escorcía, I. A., Hernández-Ávila, J., Cerecedo-Sáenz, E., Flores-Badillo, J., Toro, N., Saldana, M., Gutiérrez-Amador, M. P., Barrientos-Hernández, F. R., & Salinas-Rodríguez, E. (2025). Leveraging Industrial Jarosite Waste for Arsenic(V) and Chromium(III) Adsorption from Water: A Preliminary Study. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/app15031469>
- Ding, Y. L., Wen, Y., Van Aken, P. A., Maier, J., & Yu, Y. (2015). Jarosite nanosheets fabricated via room-temperature synthesis as cathode materials for high-rate lithium ion batteries. *Chemistry of Materials*, 27(8), 3143–3149. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b00849>
- El Machi, A., Mabroum, S., Taha, Y., Tagnit-Hamou, A., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2021). Use of flint from phosphate mine waste rocks as an alternative aggregates for concrete. *Construction and Building Materials*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121886>
- Flores Badillo, J., Hernández Ávila, J., Patiño Cardona, F., Trápala Pineda, N. Y., & Ostos Santos, J. A. (2014). Developing alternative building material from mining waste. *Advanced Materials Research*, 976, 202–206. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.976.202>
- Ganachari, S. V. (2024). Functional materials for solid-state battery applications. In *Handbook of Emerging Materials for Sustainable Energy* (pp. 45–57). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-96125-7.00019-8>
- González-de-la-Fuente, A., López-León, L. D., Volpi-León, V., Correa-Castro, Y. P., Lizárraga-Mendiola, L., & Castañeda-Robles, I. E. (2023). Utilización de residuos mineros en concreto permeable como alternativa de construcción sostenible. *Pädi*. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.11521>
- Grigg, A. R. C., Notini, L., Kaegi, R., ThomasArrigo, L. K., & Kretzschmar, R. (2024). Aluminium substitution affects jarosite transformation to iron oxyhydroxides in the presence of aqueous Fe(II). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 374, 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2024.04.008>
- Grigg, A. R. C., Wisawapipat, W., Barmettler, K., Schulz, K., Notini, L., ThomasArrigo, L. K., & Kretzschmar, R. (2024). Stability and transformation of jarosite and Al-substituted jarosite in an acid sulfate paddy soil under laboratory and field conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2024.07.026>
- Guillermo Juárez López. (2007). “CINÉTICA DE PRECIPITACIÓN DE PLATA Y ORO EN LOS SISTEMAS Ag-CN-S2O42--O2 Y Au-S2O32--S2O4-2-O2 APLICABILIDAD EN EFLUENTES INDUSTRIALES.” Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Hernández-Lazcano, E., Cerecedo-Sáenz, E., Hernández-Ávila, J., Toro, N., Karthik, T. V. K., Mendoza-Anaya, D., Fernández-García, M. E., Rodríguez-Lugo, V., & Salinas-Rodríguez, E. (2021). Synthesis of

- hydronium-potassium jarosites: The effect of pH and aging time on their structural, morphological, and electrical properties. *Minerals*, 11(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/min11010080>
- Instituto Mexicano de Agua y Minería. (n.d.). *Agua y minería*. Retrieved December 14, 2023, from <https://aguaymineria.imta.mx/mineria/presas>
- Jin, X., Guo, C., Huang, Q., Tao, X., Li, X., Xie, Y., Dang, Z., Zhou, J., & Lu, G. (2024). Arsenic redistribution associated with Fe(II)-induced jarosite transformation in the presence of polygalacturonic acid. *Science of the Total Environment*, 935. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173444>
- Kordesch, K., & Taucher-Mautner, W. (2009). *Primary Batteries*.
- Krishnan, S. G., Arulraj, A., Khalid, M., Reddy, M. V., & Jose, R. (2021). Energy storage in metal cobaltite electrodes: Opportunities & challenges in magnesium cobalt oxide. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110798. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110798>
- Kurzweil, P. (2009). Electrochemical devices: History of primary and secondary batteries. In *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96022-9.00023-2>
- Lavanya, N., Sahaya Dennish Babu, G., Judith Jayarani, A., Prithivirajan, P., & Ayeshamariam, A. (2024). Introduction and history of lithium-ion batteries. In *Nanostructured Lithium-ion Battery Materials: Synthesis, Characterization, and Applications* (pp. 3–20). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13338-1.00016-2>
- Pedrozo Acuña, A. (2022). La minería y su consumo de agua. *Perspectivas IMTA*, 3(32). <https://doi.org/10.24850/B-IMTA-PERSPECTIVAS-2022-32>
- Peña Colorada. (2020). *Manejo de jales operaciones sustentables y seguras*. <http://www.pcolorada.com>
- Rosen, M. A., & Farsi, A. (2023a). Battery system design. In *Battery Technology* (pp. 161–198). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-18862-6.00006-9>
- Rosen, M. A., & Farsi, A. (2023b). Electrochemical modeling of batteries. In *Battery Technology* (pp. 65–90). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-18862-6.00007-0>
- Rosen, M. A., & Farsi, A. (2023c). Integrated battery-based systems. In *Battery Technology* (pp. 199–264). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-18862-6.00008-2>
- Rosen, M. A., & Farsi, A. (2023d). Introduction to battery technology. In *Battery Technology* (pp. 1–38). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-18862-6.00002-1>
- Salinas, E., Roca, A., Cruells, M., Patino, F., & Cordoba, D. A. (2001). Characterization and alkaline decomposition-cyanidation kinetics of industrial ammonium jarosite in NaOH media. In *Hydrometallurgy* (Vol. 60). www.elsevier.nl/locate/hydromet
- Salinas, E., Vargas, M., Flores-Badillo, J., Hernández, J., Salinas-Rodríguez, E., Flores-Badillo, J., Hernández-Ávila, J., Vargas-Ramírez, M., Flores-Hernández, J., Rodríguez-Lugo, V., Cerecedo-Sáenz, E., Carr Apan -Tepeapulco km, H., Las Peñitas, C. C., & México, H. (2017). DESIGN AND PRODUCTION OF A NEW CONSTRUCTION MATERIAL (BRICKS) USING MINING TAILINGS IJESRT INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & RESEARCH TECHNOLOGY DESIGN AND PRODUCTION OF A NEW CONSTRUCTION MATERIAL (BRICKS), USING MINING TAILINGS. © *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.809079>
- Sandineni, P., Yaghoobnejad Asl, H., & Choudhury, A. (2016). Kagomé lattices as cathode: Effect of particle size and fluoride substitution on electrochemical lithium insertion in sodium- and ammonium Jarosites. *Journal of Solid State Chemistry*, 242, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.02.022>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2011). *Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/134777/34.-_NORMA_OFICIAL_MEXICANA_NOM-157-SEMARNAT-2009.pdf
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). *Inventario Homologado Preliminar de Presas de Jales*. <https://geomaticaportal.semarnat.gob.mx/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=95841aa3b6534cdfbe3f53b3b5d6edfa>
- The Nobel Prize in Chemistry 2019 - Popular information - NobelPrize.org*. (n.d.). Retrieved June 3, 2024, from <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/popular-information/>
- Torabi, F., & Ahmadi, P. (2020a). Battery technologies. In *Simulation of Battery Systems* (pp. 1–54). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816212-5.00005-2>

- Torabi, F., & Ahmadi, P. (2020b). Fundamentals of batteries. In *Simulation of Battery Systems* (pp. 55–81). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816212-5.00006-4>
- TRONEX. (2020). *GCFT029-Pila-Alkalina-Tipo-D-Tronex*. www.recopila.org
- Volpi-León, V., López-León, L. D., Hernández-ávila, J., Baltazar-Zamora, M. A., Olguin-Coca, F. J., & López-León, A. L. (2017). Corrosion study in reinforced concrete made with mine waste as mineral additive. *International Journal of Electrochemical Science*, *12*(1), 22–31. <https://doi.org/10.20964/2017.01.08>
- Xu, W., Xie, Z., Cui, X., Zhao, K., Zhang, L., Mai, L., & Wang, Y. (2016). Direct growth of an economic green energy storage material: A monocrystalline jarosite-KFe₃(SO₄)₂(OH)₆-nanoplates@rGO hybrid as a superior lithium-ion battery cathode. *Journal of Materials Chemistry A*, *4*(10), 3735–3742. <https://doi.org/10.1039/c5ta10622b>
- Zeng, Y., Zhang, W., Wu, J., Wei, Y., Ke, Y., Shi, M., Yan, X., & Lin, Z. (2023). Simultaneous recovery of Fe₂O₃ and PbCl₂ from hazardous jarosite residues via hydrothermal phase transformation with NaCl. *Hydrometallurgy*, *221*. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106150>
- Zhao, R., Li, Y., & Chan, C. K. (2016a). Synthesis of Jarosite and Vanadium Jarosite Analogues Using Microwave Hydrothermal Reaction and Evaluation of Composition-Dependent Electrochemical Properties. *Journal of Physical Chemistry C*, *120*(18), 9702–9712. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b03195>
- Zhao, R., Li, Y., & Chan, C. K. (2016b). Synthesis of Jarosite and Vanadium Jarosite Analogues Using Microwave Hydrothermal Reaction and Evaluation of Composition-Dependent Electrochemical Properties. *Journal of Physical Chemistry C*, *120*(18), 9702–9712. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b03195>
- Zhou, S., Han, Y., Huang, R., Huang, Y., Dong, Q., Gang, H., Qin, J., Yu, X., Zeng, X., Cao, W., Wang, J., Chen, S., Wang, R., & Chen, M. (2024). Making waste profitable: Efficient recovery of metallic iron from jarosite residues. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *71*, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2024.04.004>
- Zhou, X., Chen, Y., Tan, F., An, J., & Yang, W. (2024). Selective removal of iron from sulfuric acid leaching solution of aerospace magnetic material scraps by jarosite process. *Waste Management*, *188*, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.08.007>

Perspectivas

Las futuras investigaciones de este trabajo podrían enfocarse en varios aspectos clave para la optimización de las baterías, con el uso de los diferentes residuos de la industria minera.

1. Investigar otros residuos mineros, provenientes de un proceso minero diferente al de este trabajo.
2. Desarrollar un diseño más preciso, en el que se pueda evaluar el comportamiento electroquímico en diferentes condiciones.
3. Estudiar la viabilidad de producir estas baterías a gran escala, y su aplicación en diferentes sectores, de acuerdo con el potencial electroquímico reportado.
4. Evaluar el ciclo de vida completo de las baterías, desde la extracción de materiales hasta su reciclaje, para minimizar su impacto ambiental y promover la sostenibilidad.
5. Explorar cómo las baterías electroquímicas, pueden integrarse con otras tecnologías emergentes, como los sistemas de internet de las cosas.