

Generación de energía a partir de residuos minero metalúrgicos: una alternativa sostenible

Energy generation from mining and metallurgical waste: a sustainable alternative

Eleazar Salinas-Rodríguez ^{a,*}, Luis Humberto Mendoza-Huizar ^b, Lucero Alejandra Curiel-Canales ^a, Javier Flores-Badillo ^a, Juan Hernández-Ávila ^a, Eduardo Cerecedo-Sáenz ^a

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

Los desechos minero metalúrgicos, constituyen un impacto medioambiental negativo en las zonas donde se almacenan. En la búsqueda de disminuir su impacto, y ya que estos residuos aún tienen propiedades fisicoquímicas y mineralógicas que pueden ser aprovechadas, 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 mejor concentración para su optimización y las curvas de descarga para identificar así su rendimiento. Los resultados más importantes encontrados, indican que al construir un sistema con este residuo, se puede generar la energía suficiente como para encender un dispositivo que requiera de 1.5 V. De este modo, se puede concluir que el reaprovechamiento de desechos de la industria del zinc, puede generar energía 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 and metallurgical waste, have a negative environmental impact where they are discarded. In the search of finding a way to decrease their impact, and due this wastes still have physical, chemical and mineralogical properties that can be used, in this work the use of these waste as raw material for the generation of energy, is proposed. For this reason, the evaluation of the electrical potential using different assays and the discharge plots to identify their performance, were carried out. The most important results found indicate that when building a system with these residues, enough energy can be generated to turn on a device that requires 1.5 V. Thus, it can be concluded that the reuse of waste from the zinc industry can generate energy and be the starting point for further studies, related to the efficiency and performance of this type of devices.

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

1. Introducción

Una batería puede estar compuesta por una o más celdas electroquímicas (galvánicas). Cada una de estas celdas está constituida con dos electrodos que están separados por un electrolito. Durante la descarga de la celda, el electrodo desde el cual fluyen los electrones se conoce como ánodo o electrodo negativo, mientras que el electrodo que recibe los electrones se denomina cátodo o electrodo positivo (Rosen & Farsi, 2023). En función de su capacidad para reutilizarse, las baterías clasifican principalmente en primarias (no recargables) y baterías secundarias (recargables). Las baterías primarias están diseñadas de tal manera que se pueden usar hasta que se agoten, momento en el que se desechan. Sus reacciones químicas no son reversibles y estas baterías no se pueden recargar una vez agotadas. La principal ventaja de estas baterías, es que producen corriente inmediatamente. Por lo tanto, este tipo de baterías se usan generalmente en dispositivos portátiles que requieren baja corriente. En general, tienen una mayor densidad de energía en

comparación con las baterías recargables. Las baterías de zinc-carbono y las baterías alcalinas, son ejemplos de baterías primarias (Nagde & Dhoble, 2021).

A diferencia de las baterías primarias, las baterías secundarias pueden recargarse múltiples veces, lo que las hace adecuadas para aplicaciones que requieren un suministro energético continuo o de alta demanda. Un ejemplo representativo de este tipo de baterías es la batería de plomo-ácido. Las baterías de plomo-ácido tienen como electrodo positivo al dióxido de plomo (PbO_2), mientras que el electrodo negativo está hecho de plomo puro, y el electrolito utilizado es ácido sulfúrico. Entre sus principales ventajas se encuentran la capacidad de suministrar corrientes de sobretensión elevadas y su bajo costo. Estas baterías pueden proporcionar una gran cantidad de energía en corto período de tiempo, sin que una corriente de sobretensión elevada represente un inconveniente. Otra ventaja destacada es su alta capacidad de reciclaje (Torabi & Ahmadi, 2020a). La principal desventaja de esta batería es su manejo, debido a su gran peso (Nagde & Dhoble, 2021).

*Autor para la correspondencia: salinasr@uaeh.edu.mx (Eleazar Salinas-Rodríguez)

Correo electrónico: hhuizar@uaeh.edu.mx (Luis Humberto Mendoza-Huizar), cu346263@uaeh.edu.mx (Lucero Alejandra Curiel-Canales), javier_flores11060@uaeh.edu.mx (Javier Flores-Badillo), herjuan@uaeh.edu.mx (Juan Hernández-Ávila), eduardoc@uaeh.edu.mx (Eduardo Cerecedo-Sáenz)

Además de las baterías de plomo-ácido, existen otros tipos que ofrecen características específicas para aplicaciones más especializadas. Un ejemplo destacado son las baterías de óxido de plata y zinc, desarrolladas principalmente por el sector aeroespacial y aeronáutico. Estas baterías utilizan placas positivas compuestas de plata y óxidos divalentes, y una de sus ventajas es que la plata puede reciclarse completamente y reutilizarse varias veces. Están disponibles en versiones tanto primarias (no recargables) como secundarias (recargables), y tienen una amplia aplicación en pilas de botón, especialmente en su versión primaria. Otra ventaja significativa es su larga vida útil, lo que resulta fundamental en dispositivos como los relojes, donde una pequeña pila de botón puede mantener el funcionamiento continuo durante 3 a 5 años (Torabi & Ahmadi, 2020b).

Por otro lado, también se están desarrollando baterías emergentes con un gran potencial para el futuro energético. Entre ellas, las baterías de litio-azufre destacan por sus propiedades innovadoras y de alto rendimiento teórico. Estas baterías son una tecnología nueva y prometedora debido a su alta densidad energética teórica de 2600 Wh/kg y a su elevada capacidad específica, aproximadamente 1675 mAh/g. Además, cuentan con una mayor capacidad de almacenamiento de energía gracias a la electroquímica de transformación de fase, que involucra un cátodo de azufre y un ánodo de litio metálico (Nagde & Dhoble, 2021).

Aunque las baterías de litio-azufre representan una tecnología emergente con gran potencial debido a su alta densidad energética, las baterías de iones de litio (LIB) siguen siendo actualmente las más utilizadas. Estas baterías recargables funcionan mediante el movimiento de iones de litio (Li^+) entre los electrodos positivo y negativo. Sin embargo, las LIB presentan una densidad de energía limitada que dificulta cumplir con los requisitos de larga duración y alta seguridad para vehículos eléctricos. Además, el aumento constante del precio del litio eleva los costos de fabricación. Por ello, es necesario desarrollar materiales de electrodos de alto rendimiento y electrolitos adecuados que permitan mejorar la energía específica de estas baterías. Paralelamente, se está avanzando en baterías de iones de metal (MIB) más económicas y seguras, como las basadas en sodio (Na), potasio (K) y zinc (Zn), que podrían reemplazar a las LIB tradicionales (Li & Yu, 2024b). También se han investigado materiales catódicos orgánicos como alternativas para baterías recargables, debido a su rápida cinética para la transferencia de electrones, propiedades electroquímicas ajustables, síntesis sencilla y sostenibilidad ambiental. Sin embargo, su baja conductividad electrónica limita su capacidad y eficiencia. En este sentido, actualmente, se estudian dos tipos de electrolitos poliméricos, que incluyen polímeros con aniones móviles y cationes de litio dentro de una matriz polimérica, conocidos como electrolitos poliméricos de ión dual. Estos electrolitos ofrecen alta conductividad iónica y bajo número de transferencia (Smirnova et al., 2022).

Además de las innovaciones en materiales y diseños de baterías recargables, como las de iones de litio y sus alternativas emergentes, otra área de gran potencial son las baterías de metal-aire. Este tipo de celda de combustible utiliza metal como ánodo y produce energía eléctrica mediante una reacción redox con el oxígeno del aire, lo que le confiere ventajas en seguridad y una alta densidad energética. Se espera que estas baterías, especialmente las de litio-aire, que cuentan con cátodos ligeros de carbono poroso y utilizan oxígeno del entorno en lugar de almacenarlo internamente, superen a las baterías de iones de litio tradicionales en aplicaciones como vehículos eléctricos. Por su parte, las baterías de zinc-aire aprovechan la reacción química entre el zinc y el oxígeno en un electrolito acuoso, destacando por su alta densidad energética, abundancia de materia prima y mayor seguridad lo que las hace atractivas para la electrónica portátil, vehículos eléctricos y otros sectores (Li & Yu, 2024a).

Todas las versiones de baterías mencionadas representan procesos de investigación, desarrollo y producción que implican costos y generan residuos al finalizar su vida útil, lo que incrementa la cantidad de desechos sólidos que pueden ser tóxicos y peligrosos. De igual modo, existe una preocupación ambiental persistente por las enormes cantidades de residuos sólidos generados por las operaciones mineras y metalúrgicas. Una estrategia adecuada dentro de un enfoque de economía circular consiste en reciclar y reutilizar estos desechos en lugar de extraer materias primas naturales, cuyas reservas están disminuyendo. Por ejemplo, la volatilización de lodos metalúrgicos para su uso como material de construcción reduce la demanda de materias primas naturales y ayuda a compensar los costos de estos materiales (Kalyani et al., 2021) (Makhathini et al., 2023).

Dado lo anterior, el reciclaje y la reutilización de residuos industriales no solo contribuyen a reducir la contaminación ambiental, sino que también abren nuevas oportunidades para aprovechar los relaves mineros como recursos valiosos en diversas industrias. Por lo que el interés en la reutilización de residuos industriales se extiende especialmente a sectores como la ingeniería civil y la producción de materiales de construcción, que son grandes consumidores de materias primas y han mostrado un creciente interés en aprovechar los relaves mineros como una alternativa viable (Amrani et al., 2020; Flores Badillo et al., 2014; González-de-la-Fuente et al., 2023; Salinas et al., 2017). De hecho, los relaves mineros pueden sustituir por completo a los agregados naturales en la fabricación de hormigón, ofreciendo una solución sostenible y eficiente (El Machi et al., 2021; Volpi-León et al., 2017). Adicionalmente, recientes estudios sobre relaves de perforación mecanizada (TBM), anteriormente poco explorados, han revelado un significativo potencial económico y ambiental mediante su reprocesamiento para extraer metales valiosos como zinc (Zn), plomo (Pb) y plata (Ag) a través de técnicas de remolienda (El Aallaoui et al., 2024). Por otro lado, el tratamiento de relaves ferrosos contribuye a reducir la cantidad total de residuos generados, dejando un remanente con niveles mínimos de azufre. Elementos contaminantes comúnmente presentes en estos residuos, como mercurio (Hg), arsénico (As), selenio (Se) y antimonio (Sb), se separan y recuperan durante procesos de tostación y limpieza de gases húmedos. Según las concentraciones detectadas, se aplican tratamientos adecuados que disminuyen significativamente la cantidad y toxicidad de los desechos finales. No obstante, es importante destacar que los relaves industriales pueden tener un impacto considerable en las aguas subterráneas si no se manejan adecuadamente (Runkel et al., 2023). En particular, en el procesamiento electrolítico del zinc, se generan grandes volúmenes de un subproducto tóxico conocido como jarosita cuya fórmula general es $\text{MFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$ (Cruells & Roca, 2022). Anualmente, las plantas de zinc electrolítico producen miles de toneladas de este residuo peligroso, lo que ha impulsado numerosas investigaciones enfocadas en su estabilización, reprocesamiento y la recuperación de metales valiosos como el hierro (Fe), así como en la identificación y aislamiento de metales tóxicos como el arsénico presente en la jarosita. (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).

Con base en lo anterior, queda claro el reciente interés en el reprocesamiento y valorización de residuos industriales como la jarosita. Diversos estudios han explorado en profundidad sus propiedades químicas y sus posibles aplicaciones. En particular, investigaciones sobre la reactividad alcalina de jarositas sintéticas han permitido comprender el comportamiento de metales valiosos, como la plata, presentes en estos compuestos (Cruells & Roca, 2022). De manera similar, se ha comprobado que la jarosita precipitada en la industria del zinc exhibe un comportamiento alcalino prácticamente idéntico al de la jarosita sintética, lo que

abre la posibilidad de aprovechar estos residuos en aplicaciones avanzadas (Salinas et al., 2001). Asimismo, recientes hallazgos sugieren que la jarosita de hidronio-potasio puede emplearse como material de cátodo baterías de iones de litio, debido a que su voltaje nominal es cercano al de las baterías estándar, posicionándola como una opción prometedora para mejorar el rendimiento energético (Hernández-Lazcano et al., 2021). Este avance se sustenta en estudios previos que evaluaron la jarosita sintética aditivo o material activo en baterías recargables, obteniendo resultados alentadores en cuanto a la mejora de la vida útil y la eficiencia de estos dispositivos (Ding et al., 2015; Sandineni et al., 2016; Xu et al., 2016; Zhao et al., 2016).

En base a la similitud del comportamiento entre las jarositas sintéticas y las precipitadas en la industria del zinc, este trabajo se enfoca en el uso del residuo jarosítico para su evaluación como materia prima, en la elaboración de dispositivos que permitan la generación de energía.

2. Material y Procedimiento Experimental

2.1. Material

El material utilizado para este trabajo fue un residuo jarosítico precipitado en la planta de zinc de la Compañía Industrial Minera México. La muestra entregada fue de 20 kg y se muestreo después de los filtros prensa, una vez que la jarosita se había precipitado en los tanques de lixiviación. El acondicionamiento del material fue mediante un proceso de secado, homogenización y separación de muestras para su posterior caracterización.

2.2. Caracterización de la jarosita industrial

De acuerdo a 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. El método de análisis mineralógico empleado para la completa caracterización fue el siguiente: Difracción de Rayos X (DRX), utilizando un difractor INEL modelo Equinox 2000, 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 $\text{CoK}\alpha_1 = 1.789 \text{ \AA}$ 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 3.0 (desarrollado por Crystal Impact, Bonn, Alemania).

Por otro lado, el estudio morfológico y de análisis semi-cuantitativo 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). El equipo fue operado empleando un voltaje de 30 kV y está equipado con Espectrómetro de Dispersión de Energías de Rayos X (EDS), marca Oxford.

Para confirmar la presencia de los elementos constitutivos de la jarosita, se realizó un análisis de espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (ATR-FTIR). Este análisis se llevó a cabo utilizando un espectrómetro

FTIR de la marca PerkinElmer (fabricado en Waltham, MA, USA). Para ello, se colocaron cuidadosamente 10 mg de muestra en polvo sobre la superficie de un cristal. Cada espectro fue registrado en términos de absorbancia, manteniéndose por debajo del 75 %. El escaneo se realizó en un rango de longitudes de onda entre 4000 y 500 cm^{-1} . Finalmente, 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 hemi-esférico (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 $\text{K}\alpha$ 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.

2.3. Procedimiento para evaluar el potencial del residuo minero en la generación de energía.

Se desarrolló un prototipo experimental inspirado en la estructura básica de una pila convencional, compuesta por un ánodo, un cátodo y un electrolito. En la primera configuración, se empleó una lámina de aluminio como ánodo, papel filtro impregnado con una solución sobresaturada de NaOH, KCl o Na_2SO_4 como electrolito, y un residuo industrial minero como cátodo. Los electrodos fueron conectados mediante alambres de cobre, que actuaron como terminales para la medición eléctrica (ver Figura 1a). En una segunda etapa, con el objetivo de mejorar la estabilidad del sistema y reducir la evaporación del electrolito, se utilizó un tubo de vidrio como contenedor de los tres componentes. El tubo fue sellado en ambos extremos con silicón, conservando la disposición interna original (ver Figura 1b). En una tercera configuración (ver Figura 1c), se eliminó el papel filtro y se aplicó directamente la solución electrolítica sobre el residuo minero, estableciendo contacto directo entre los componentes. Posteriormente, se evaluó el comportamiento del sistema utilizando únicamente agua desionizada como medio de impregnación. A partir de estos ensayos, se analizó el rol del residuo minero, ya sea como electrodo o como electrolito. En esta última variante, el sistema se conformó con aluminio como ánodo y una lámina de cobre como cátodo. Finalmente, se encapsuló con resina para garantizar su integridad estructural y prevenir la pérdida de humedad. La medición del potencial eléctrico se realizó con un multímetro digital modelo XL830L. La medición del potencial eléctrico se realizó utilizando un multímetro digital modelo XL830L. Las curvas de descarga se obtuvieron mediante el circuito mostrado en la Figura 2. Con la ayuda de un Arduino Nano, conectado a la computadora a través del puerto USB, se pudieron registrar los valores del potencial de la pila bajo diferentes niveles de consumo energético. Dicho consumo fue fijado mediante la resistencia variable indicada en el circuito. Se usaron tres LEDs para identificar el cambio de potencial entre rangos predefinidos para una contar con parámetro de visualización sencillo que indicara el proceso de descarga de la pila. En todos los casos, la construcción de la pila se realizó de la siguiente manera: se colocaron 0.30 g de residuo minero industrial en cuatro viales de policarbonato. Cada vial contenía su respectivo ánodo (Al) y cátodo (Cu), como se observa en la Figura 1c. Con un gotero, se añadieron cuatro gotas de diferentes electrolitos a cada vial, preparados en condiciones de sobresaturación.

Finalmente, se utilizó un multímetro para medir el potencial eléctrico durante un período de 15 minutos.

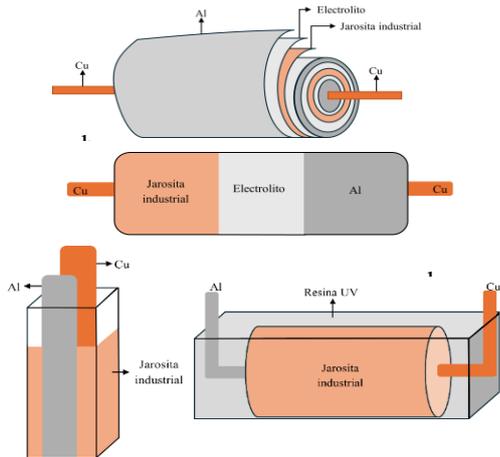


Figura 1. Evolución de los prototipos de pilas elaborados. a) Con el principio de una pila alcalina; b) Adaptado en un tubo capilar; c) Considerando al residuo como electrolito; y d) Prototipo final encapsulado en resina.

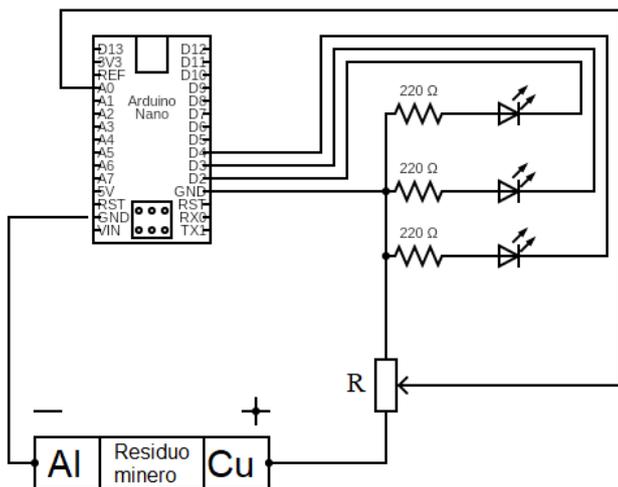


Figura 2. Circuito utilizado para medir el potencial de descarga de la pila a lo largo del tiempo.

3. Resultados

3.1. Caracterización de la jarosita industrial

La Figura 3, muestra el espectro de Difracción de Rayos X (DRX), obtenido de la muestra de jarosita industrial, donde pueden apreciarse 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. Los resultados indican 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.

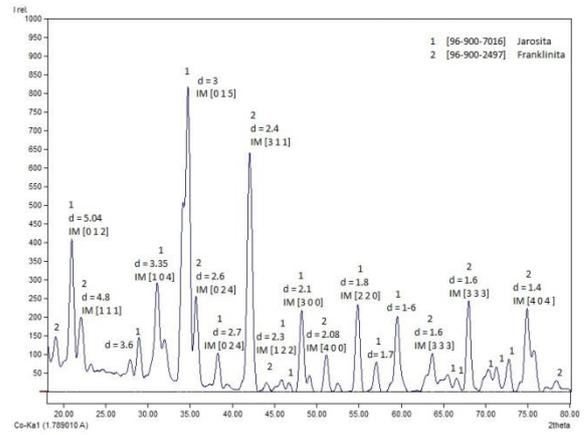


Figura 3. Espectro de DRX obtenido del análisis de la muestra de la jarosita industrial

La caracterización morfológica y de composición puntual de la muestra se realizó mediante microscopía electrónica de barrido acoplada a espectroscopia de dispersión de energía (MEB-EDS). La Figura 4 muestra una imagen general de la distribución de partículas que conforman la muestra de residuo jarosítico, obtenida mediante electrones secundarios (SE), así como un detalle ampliado de la misma. Se observa una morfología irregular, no bien definida, de apariencia cristalina, con tamaños de partícula que oscilan entre 1 y 10 μm , aproximadamente.

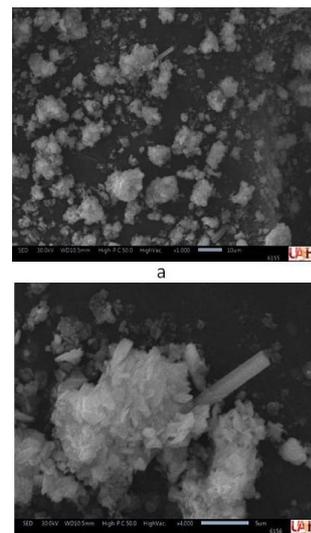


Figura 4. Fotomicrografías tomadas por SEM (SE).

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 μm^3 , y representa una aproximación semi cuantitativa de la composición promedio de las partículas de jarosita industrial.

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

Entre los elementos más relevantes identificados se encuentran Fe, Cu, Zn, As y Pb, los cuales pueden desempeñar un papel crucial en los procesos electroquímicos que podrían ocurrir en este tipo de residuo, con potencial para la generación de energía. Asimismo, se detectó la presencia de Fe, S, O, K y Ag, elementos que conforman o pueden formar parte de la estructura de la jarosita.

En cuanto al análisis realizado mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), esta técnica permite identificar parte de la composición química de las sustancias mediante la interacción de la radiación infrarroja con las moléculas de la muestra. La Figura 5 muestra el espectro FTIR obtenido a partir del análisis de la muestra de jarosita industrial.

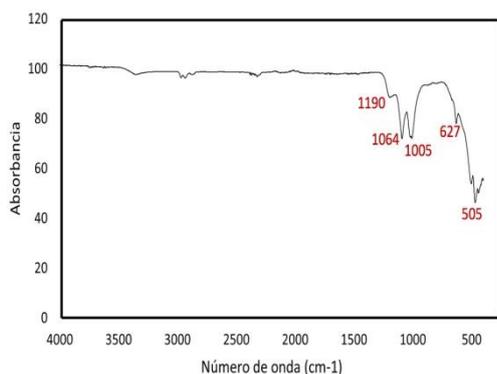


Figura 5. Espectro de FTIR obtenido del análisis de la muestra de la jarosita industrial.

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 octaédrica del FeO_6 (correspondiente a Fe_3 y OH_6) está en 505 cm^{-1} .

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. La Figura 6 muestra el espectro de XPS de la jarosita industrial.

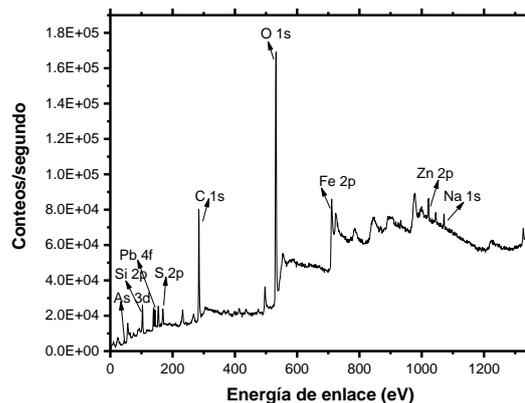


Figura 6. Espectro de XPS obtenido del análisis de la muestra de jarosita precipitada en la planta de zinc

A partir de estos resultados, se observa que los elementos presentes son consistentes con la composición típica de la jarosita, la cual puede formar soluciones sólidas con cationes como Na^+ , K^+ y Pb^{2+} . Asimismo, la presencia de Zn y Fe respalda la identificación de franklinita, previamente determinada mediante difracción de rayos X (DRX). De igual forma, se confirma la presencia de arsénico en la muestra.

3.2. Evaluación de la capacidad de los residuos industriales mineros para generar energía.

La capacidad del residuo minero para generar energía eléctrica fue evaluada inicialmente mediante el dispositivo esquematizado en la Figura 1a. El cátodo y ánodo fueron conectados mediante alambres de cobre que sirvieron como terminales para la medición del potencial eléctrico utilizando un multímetro digital modelo XL830L. Si bien el sistema generó una diferencia de potencial, los valores obtenidos no fueron reproducibles, lo que sugiere una baja estabilidad. Esta inestabilidad se atribuyó principalmente a la rápida evaporación del electrolito, lo que afectó la continuidad del medio iónico necesario para el transporte de cargas. Con el objetivo de mejorar la estabilidad del sistema, se implementó la configuración mostrada en la Figura 1b, en la cual los componentes fueron contenidos en un tubo de vidrio sellado con silicón. Bajo este nuevo diseño, se obtuvieron valores más consistentes de potencial eléctrico: 0.938 V con NaOH, 0.620 V con KCl, 0.578 V con Na_2SO_4 y 0.740 V con agua desionizada (ver Figura 7). Este último resultado resulta especialmente interesante, ya que el agua desionizada, al no contener iones libres, no debería actuar como un electrolito efectivo. Sin embargo, en este arreglo, se obtuvo el segundo mayor potencial, lo que sugiere que el residuo minero podría estar liberando iones al medio, favoreciendo la movilidad electrónica. Esto llevó a la hipótesis de que el residuo minero podría actuar no solo como cátodo, sino también como electrolito. Para evaluar esta hipótesis, se implementaron las configuraciones mostradas en las Figuras 1c y 1d, en las que el residuo minero se utilizó como medio iónico principal, prescindiendo del papel filtro y aplicando directamente la solución electrolítica sobre el mismo. En estas pruebas, el aluminio se mantuvo como ánodo y el cobre como cátodo. Los resultados mostraron una generación efectiva de potencial eléctrico, lo que confirmó que el residuo minero, en condiciones adecuadas, puede comportarse como un electrolito. La mezcla directa entre el residuo y el electrolito formó un sistema con propiedades similares a las de un electrolito sólido, mejorando significativamente el intercambio iónico. Finalmente, los

prototipos fueron encapsulados con resina para conservar la integridad del sistema y evitar la pérdida de humedad durante la medición de las curvas de descarga. Una vez selladas las celdas, se procedió a analizar el potencial eléctrico generado durante los siguientes 15 minutos. Como se observa en la Figura 7, el segundo valor más alto de potencial correspondió al sistema compuesto por residuo minero y agua desionizada. Este resultado es particularmente relevante, ya que demuestra que esta configuración no solo es capaz de generar energía de manera efectiva, sino que además se alinea con criterios de sostenibilidad, al prescindir del uso de electrolitos potencialmente peligrosos como NaOH, KCl o Na_2SO_4 . Por esta razón, se optó por continuar la construcción de las pilas utilizando esta configuración experimental, priorizando tanto el rendimiento energético como el bajo impacto ambiental del sistema.

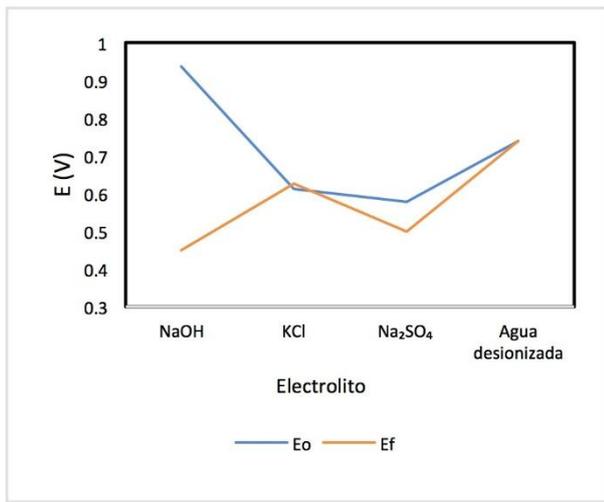


Figura 7. Gráfico que muestra la diferencia de potencial eléctrico obtenido, utilizando diferentes electrolitos, durante un tiempo de ensayo de 15 minutos.

Con el objetivo de obtener una consistencia pastosa adecuada y cumplir con los requisitos de un electrolito sólido, se realizaron pruebas combinando distintas cantidades de residuo minero con diferentes volúmenes de agua desionizada. Inicialmente, se emplearon 1.00 g de residuo con una mezcla de 1.00 mL y 0.50 mL de agua desionizada. Posteriormente, se evaluaron concentraciones menores, mezclando 0.50 g y 0.25 g de residuo con 100 μL de agua desionizada, respectivamente. La combinación de 0.25 g en 100 μL fue la que presentó la mejor consistencia pastosa y el mayor potencial eléctrico. Esta consistencia no solo favorece el desempeño electroquímico, sino que también reduce significativamente el riesgo de derrames durante el manejo y la aplicación del material, lo cual es crucial para su uso práctico como electrolito sólido. Los resultados detallados de este análisis se presentan en la Figura 8.

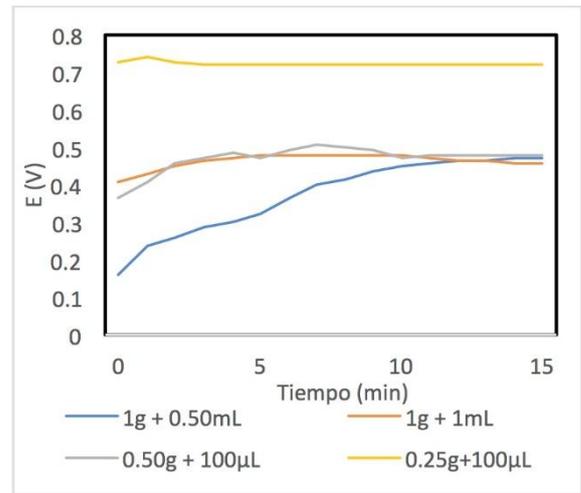


Figura 8. Resultados de las pruebas de concentración para la obtención de una mezcla pastosa a partir de jarosita industrial. Se muestra la relación entre la masa del residuo (g) y el volumen de agua desionizada (mL), evaluando su impacto en la consistencia y el potencial eléctrico de la mezcla.

Con el objetivo de evaluar la estabilidad del potencial eléctrico a lo largo del tiempo, se realizaron curvas de descarga utilizando el circuito esquematizado en la Figura 2, que incluye un dispositivo Arduino al cual se conectaron cinco resistencias de distintos valores: 12 k Ω , 10 M Ω , 20 M Ω y 40 M Ω . Estas pruebas permitieron analizar cómo varía el comportamiento del sistema ante diferentes exigencias energéticas. El periodo de evaluación fue de 1 día y 13 horas, durante el cual se registró de forma continua la respuesta eléctrica de la pila bajo condiciones controladas. Los resultados obtenidos, presentados en la Figura 9, ofrecen información valiosa sobre el desempeño y la estabilidad del sistema frente a variaciones en la carga.

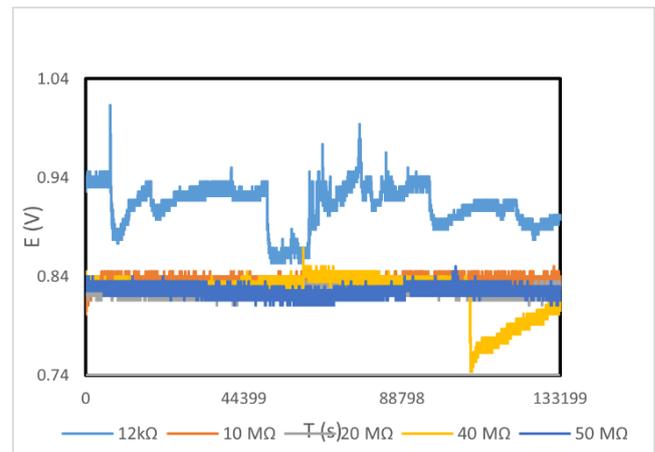


Figura 9. Curvas de descarga registradas durante la prueba utilizando el sistema Arduino, bajo distintas condiciones de carga.

De acuerdo con los resultados presentados, se observa una tendencia a la inestabilidad en las cuatro pruebas realizadas. En particular, la prueba con una resistencia de 12 k Ω muestra un comportamiento fluctuante del potencial eléctrico: inicia en aproximadamente 0.900 V, luego presenta una disminución, pero también incrementos ocasionales, alcanzando valores cercanos a 0.800 V. Este comportamiento sugiere una respuesta no lineal del sistema ante la carga aplicada. Cabe destacar que ninguna de las pruebas evidenció una descarga completa durante el periodo de

evaluación, lo cual indica que, si bien hubo pérdidas de voltaje, el sistema no alcanzó un agotamiento total de la fuente de energía en ninguno de los casos. Este resultado podría estar relacionado con la capacidad de recuperación parcial de la pila o con la magnitud de las resistencias utilizadas, que limitaron la corriente de descarga.

Con base en los resultados anteriores, se implementó un tratamiento térmico con el objetivo de eliminar posibles impurezas que pudieran estar afectando el comportamiento electroquímico de la muestra. Diversos estudios han reportado la presencia de carbonatos en residuos mineros, los cuales pueden reaccionar con el agua generando la formación de burbujas, lo que interfiere en los procesos electroquímicos y podría estar contribuyendo a la inestabilidad observada. Para el tratamiento, se mezclaron 200 g de residuo industrial con 50 mL de agua desionizada y se calentó la solución a 70 °C durante 30 minutos. Durante este proceso se observó la formación de burbujas, lo que respalda la presencia de carbonatos en la muestra. Posteriormente, la muestra fue secada a temperatura ambiente y los sólidos tratados se utilizaron para construir nuevos sistemas electroquímicos. Dado que el circuito mostrado en la Figura 2 con el sistema Arduino no reflejaba adecuadamente los valores registrados por el multímetro, y para eliminar cualquier posible interferencia, se decidió realizar las pruebas de descarga de forma analógica, utilizando directamente un multímetro digital. Para estas mediciones se emplearon ocho resistencias distintas, considerando la resistencia interna del multímetro para asegurar mayor precisión en los registros. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 10. A pesar del tratamiento aplicado, se continúa observando inestabilidad en el potencial, así como un proceso de descarga lento. Esto sugiere que, si bien la eliminación parcial de impurezas como los carbonatos pudo haber reducido algunas interferencias, no fue suficiente para estabilizar completamente el sistema, lo que indica la posible presencia de otros factores limitantes, que se analizarán en posteriores trabajos.

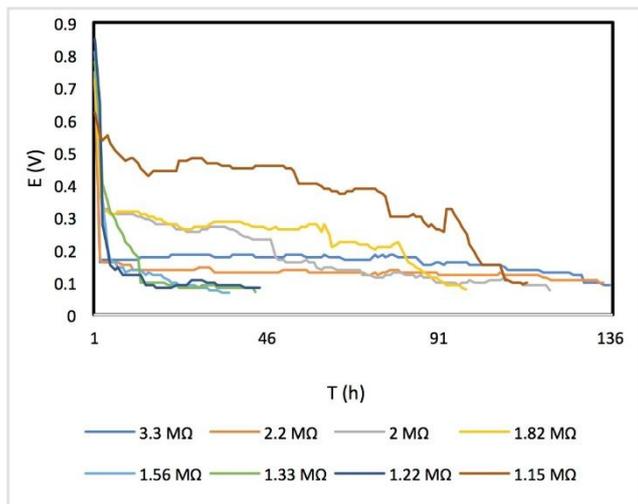


Figura 10. Curvas de descarga obtenidas mediante mediciones con multímetro digital, reflejando la respuesta del sistema tras el tratamiento térmico aplicado.

Por último, la Figura 11 presentan el prototipo final de la pila, demostrando su capacidad para alimentar un dispositivo que requiere un voltaje de 1.5 V; en este caso, se utilizó una calculadora como carga representativa. Este resultado evidencia que, pese a las inestabilidades y limitaciones observadas en pruebas anteriores, el sistema tratado es capaz

de suministrar energía suficiente para el funcionamiento de dispositivos electrónicos de bajo consumo, validando así la viabilidad práctica del prototipo para aplicaciones reales.



Figura 11. Fotografía de la calculadora encendida gracias al prototipo final de batería, elaborado a partir de residuo de la industria del zinc.

4. Discusión

Con base en 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 ofrecen 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). A partir de los elementos que constituyen a este residuo, se puede destacar los contenidos de Zn, Pb, Ag, Fe y As, los cuales son constituyentes de algunos tipos de baterías comerciales (Torabi & Ahmadi, 2020a) (Nagde & Dhoble, 2021).

Los resultados obtenidos en un sistema compuesto por 100 μ L de agua desionizada y 0.2 g de residuo mostraron un potencial eléctrico promedio estable de 0.7 V. Al conectar tres de estos sistemas en serie, se logró generar un potencial eléctrico promedio de 1.5 V. Este valor es comparable al reportado en el estudio de Hernández-Lazcano et al. (2021), donde se demostró que la jarosita sintética de hidronio-potasio puede ser utilizada como material de cátodo en potenciales aplicaciones en baterías de ion-litio, alcanzando 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., 2016), 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 3.9 Ω de una pila alcalina, con un potencial eléctrico de 1.5 V y que corresponde a 5 años de vida útil (TRONEX, 2020). Finalmente, otro trabajo señala que en un ciclo de una batería de ion litio con un potencial de 4.1 V es de 7500 s (Beltran et al., 2023).

Conclusiones

Dentro de las conclusiones más importantes encontradas, se pueden señalar que este trabajo es novedoso, ya que se utiliza un residuo considerado peligroso y tóxico para la elaboración de dispositivos que generen energía.

El voltaje alcanzado, en base a la conexión de los dispositivos podría escalarse y para ello es necesario continuar con los estudios de descarga y medir efectivamente la corriente generada.

Por último, este trabajo tiene un futuro prometedor ya que puede dar valor agregado a residuos industriales y con ello, aparte de remediar medioambientalmente, puede ser un polo de desarrollo económico.

Agradecimientos

Los autores agradecen las facilidades otorgadas por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Áreas Académicas de Química y Ciencias de la Tierra y Materiales.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

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. DOI: 10.3390/min10100851

Beltran, H., Sansano, E., & Pecht, M. (2023). Machine learning techniques suitability to estimate the retained capacity in lithium-ion batteries from partial charge/discharge curves. *Journal of Energy Storage*, 59. DOI: 10.1016/j.est.2022.106346

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). DOI: 10.3390/ijerph192315912

Cruells, M., & Roca, A. (2022). Jarosites: Formation, Structure, Reactivity and Environmental. In *Metals* (Vol. 12, Issue 5). MDPI. DOI: 10.3390/met12050802

Ding, Y. L., Wen, Y., Chen, C. C., Van Aken, P. A., Maier, J., & Yu, Y. (2015). Nanosheets of earth-abundant jarosite as novel anodes for high-rate and long-life lithium-ion batteries. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 7(19), 10518–10524. DOI: 10.1021/acsami.5b01992

El Aallaoui, A., El Ghorfi, M., Elghali, A., Taha, Y., Zine, H., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2024). Investigating the reprocessing potential of abandoned zinc-lead tailings ponds: A comprehensive study using physicochemical, mineralogical, and 3D geometallurgical assessments. *Minerals Engineering*, 209. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108634

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. DOI: 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. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.976.202

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*. DOI: 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. DOI: 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*. DOI: 10.1016/j.gca.2024.07.026

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. DOI: 10.3390/min11010080

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

Kalyani, N. T., Dhoble, S. J., Vengadaesvaran, B., & Arof, A. K. (2021). Sustainability, recycling, and lifetime issues of energy

- materials. In *Energy Materials: Fundamentals to Applications* (pp. 581–601). Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-823710-6.00015-7
- Li, Z., & Yu, C. (2024a). Metal-air battery. In *Nanostructured Materials* (pp. 249–256). Elsevier. DOI: 10.1016/b978-0-443-19256-2.00019-3
- Li, Z., & Yu, C. (2024b). Metal-ion battery. In *Nanostructured Materials* (pp. 237–242). Elsevier. DOI: 10.1016/b978-0-443-19256-2.00020-x
- Makhathini, T. P., Bwapwa, J. K., & Mtsweni, S. (2023). Various Options for Mining and Metallurgical Waste in the Circular Economy: A Review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 3). MDPI. DOI: 10.3390/su15032518
- Nagde, K. R., & Dhoble, S. J. (2021). Li-S ion batteries: A substitute for Li-ion storage batteries. In *Energy Materials: Fundamentals to Applications* (pp. 335–371). Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-823710-6.00008-X
- Rosen, M. A., & Farsi, A. (2023). Introduction to battery technology. In *Battery Technology* (pp. 1–38). Elsevier. DOI: 10.1016/b978-0-443-18862-6.00002-1
- Runkel, M., Hammerschmidt, J., Wrobel, M., & Calvo, J. (2023). Finding New Life for Tailings: Sustainable Technology for Co, Cu, Ni, and Zn Production. In *Proceedings of the 62nd Conference of Metallurgists, COM 2023* (pp. 919–926). Springer Nature Switzerland. DOI: 10.1007/978-3-031-38141-6_116
- 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*. DOI: 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. DOI: 10.1016/j.jssc.2016.02.022
- Smirnova, A., Rodmyre, C., & Acevedo, M. (2022). Battery cathodes for lithium-ion batteries with liquid and solid-state electrolytes. In *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science: Solid-State Energy Storage - a Path to Environmental Sustainability* (pp. 171–195). Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-323-90635-7.00003-8
- Torabi, F., & Ahmadi, P. (2020a). Lead–acid batteries. In *Simulation of Battery Systems* (pp. 149–215). Elsevier. DOI: 10.1016/b978-0-12-816212-5.00010-6
- Torabi, F., & Ahmadi, P. (2020b). Zinc–silver oxide batteries. In *Simulation of Battery Systems* (pp. 217–262). Elsevier. DOI: 10.1016/b978-0-12-816212-5.00011-8
- 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., Olguín-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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106150
- Zhao, R., Li, Y., & Chan, C. K. (2016). 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. DOI: 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. DOI: 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. DOI: 10.1016/j.wasman.2024.08.007