

Refinación del Zn por el método no convencional electrodisolución electrodeposición a partir de minerales oxidados a nivel de laboratorio

Zn refining by the non-conventional method electrodisolution electrodeposition from oxidized of minerals at laboratory level

Jorge Emilio Ricardo Yaya Lévano
Jery1221@hotmail.com – Universidad María Auxiliadora, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-3760-9739>
Freddy Martin Marrero Saucedo
freddymarrero@unh.edu.pe - Universidad Nacional de Huancavelica
<https://orcid.org/0000-0003-4610-158X>

Recibido el 16/03/23 | Aceptado el 17/04/23
DOI: <https://doi.org/10.47190/nric.v4i2.242>

Resumen

El presente estudio se planteó con el objetivo de refinar zinc mediante el método no convencional de electrodisolución y electrodeposición de minerales oxidados. La metodología utilizada fue el de la investigación aplicada con diseño experimental, así como tecnológica, la muestra estuvo conformada por 250 gramos de calcina de zinc, tratada con electrolito de ácido sulfúrico en el proceso de electrodisolución y electrodeposición a pH 1, 2 y 3 con períodos de electrólisis de 5, 6 y 7 horas y 2.5 voltios de energía. Los resultados indican que la mayor recuperación de zinc electrodepositado se obtiene a pH 1. El tiempo óptimo en el que se obtiene la mayor recuperación es 6 horas. A menores niveles de pH se obtienen menores recuperaciones de baja ley y de de bajo contenido metálico.

Palabras claves: *Electrodisolución de la esfalerita, disolución de minerales oxidados, disolución de la esfalerita con cloruro de hierro, electroquímica de disolución de minerales oxidados.*

Abstract

The present study was raised with the objective of refining zinc through the unconventional method of electrodisolution and electrodeposition of oxidized minerals. The methodology used was that of applied research with experimental design, as well as technological, the sample consisted of 250 grams of zinc calcine, treated with sulfuric acid electrolyte in the process of electrodisolution and electrodeposition at pH 1, 2 and 3 with periods of electrolysis of 5, 6 and 7 hours and 2.5 volts of energy. The results indicate that the greatest recovery of electroplated zinc is obtained at pH 1. The optimal time in which the greatest recovery is obtained is 6 hours. At lower pH levels, lower recoveries of low grade and low metal content are obtained.

Keywords: *Electrodisolution of sphalerite, dissolution of oxidized minerals, dissolution of sphalerite with iron chloride, electrochemistry of dissolution of oxidized minerals.*

Como citar: Yaya-Lévano, J. E. R. & Marrero-Saucedo, F. M. (2023). Refinación del Zn por el método no convencional electrodisolución electrodeposición a partir de minerales oxidados a nivel de laboratorio. ÑAWPARISUN – Revista de Investigación Científica de Ingenierías, 4(2), 23-32.

Introducción

La refinación del zinc, se realiza mediante el proceso convencional de la metalurgia del Zinc que implica de manera general las etapas de tostación, lixiviación, electrodeposición y fundición, generando elevados costos para la gran minería, debido a la necesidad de capacidad de almacenamiento de productos en las diferentes etapas operacionales, por lo que cada día las grandes industrias mineras se encuentran en la búsqueda de optimizar las tecnologías que se utilizan en las operaciones del proceso..

La refinación del zinc por el método convencional aplicado en la industria de la gran minería, se realiza mediante la etapa de tostación del concentrado de zinc, seguido de la lixiviación de la calcina en medio ácido y purificación del over flow, para pasar luego a la electrodeposición, fusión y moldeo, obteniéndose zinc en barra con el 99.99% de pureza, además de algunos subproductos que se obtienen durante el proceso, como el H_2SO_4 industrial a partir de los gases que se generan durante la tostación, la producción de residuos Pb-Ag, y jarosita a partir del under flow de la lixiviación, y la producción de cadmio y cobalto metálico obtenido del underflow de la purificación del over flow de la lixiviación (Nexa Resources Cajamarquilla S.A., 1992). Esto, considerando las características mineralógicas del concentrado de zinc que indican la presencia de Zn, Fe, Pb, Ag, Cd y Co en proporciones que hacen posible su recuperación, así mismo indican la presencia de Sb, Ta, Ge, Mn, Mg en menores proporciones, que no alteran el proceso de refinación (Yaya J. E., 1992). Sin embargo, este tipo de refinación convencional, por sus características: como el desprendimiento de gas en la etapa de tostación, así como la lixiviación ácida es la generación de efluentes del lavado del residuo jarosita y residuo plomo plata, y desprendimiento de gases de la fundición del Zn, Cd y Co, (Yaya, 2021), contribuye a la contaminación del medio ambiente.

Uno de los principales problemas de la refinación por este método es la generación de gases en el proceso de tostación del concentrado de Zn, así como el consumo de agua que se utiliza en la etapa de lixiviación de la calcina del mismo, condiciones que han sido aprovechadas por la industria minera, en el primer caso para la obtención de ácido sulfúrico (H_2SO_4) industrial, como sub producto y en el segundo caso recircular el agua para los diferentes subprocesos (Nexa Resources Cajamarquilla S.A., 1992).

Por otro lado, es posible refinar el zinc aplicando métodos no convencionales, haciendo posible

la electrodeposición del Zn a partir de la electrodisolución de minerales oxidados (Peralta, 2019), (Amini y Pritzker, 2018), es decir, la electrodisolución seguida de la electrodeposición directa del concentrado previo tratamiento con un ácido débil, teniendo en consideración algunos factores operativos y las características mineralógicas del concentrado (Tafoya y Chuck, 2021), además. Este proceso no contribuye al deterioro del medio ambiente, ya que es considerado como de tecnologías limpias, así mismo desde el punto de vista económico, no genera mayor inversión debido a que no se realizan todas las etapas del proceso de refinación electrolítica convencional y en comparación con este, puede ser utilizado por la mediana y pequeña minería.

Una de las ventajas que ofrece este método es la disminución de efluentes provocados por los procesos hidrometalúrgicos, disminuyendo las elevadas temperaturas en las que se realiza el proceso convencional, así como la disminución de los gases que se generan en la etapa de lixiviación.

Este método no convencional de electrodisolución electrodeposición de minerales oxidados de zinc, se sustenta en las propiedades semiconductoras de la esfalerita, obtenidas a través de la red cristalina de estructura cubica, que posee en cada ángulo un átomo de zinc, además de estar centrados en las caras (Ghaleb y Ahmed, 2022), así mismo, los cuatro átomos de azufre se ubican en el centro y se encuentran coordinados con los átomos de zinc (Soler, 2018),

Por otro lado, se entiende que este mineral es un aislante que tiene una resistividad de 10^9 a 10^{12} micras (Zay, Gorbachev, Adigamov y Narochny, 2022), además posee una zona denominada prohibida de 3.6 a 3.9 electrovoltios (Kos, Zupancic Gosar y Miller, 2022), En el caso de que el hierro II sustituya al zinc en la red cristalina forma la solución compleja $(ZnFe)S$, la zona prohibida disminuye a 0.5 electrovoltios (Koj, Seriotkin, Deviatliarova, Goryainov., Khoury, Sharygin, Koury y, Danilovskí, 2020).

Entonces, se puede entender que la disolución del mineral de zinc esfalerita, con agentes oxidantes fuertes, puede verse alterada por el arrastre de impurezas durante el proceso, así como, por la incidencia de la luz (Zhongwen Bao, Bain, UnHeather, Shrimpton, Finrock, Ptacek, Soplá, 2022), sin embargo, la iluminación de la luz solar favorece la oxidación cuando se trata de la electrodisolución electrodeposición con minerales naturales o sintéticos (Leung, Poncede León, Walch, 2011).

Por lo general, la electrodisolución de la esfalerita se realiza, con solución electrolítica de

solución de cloruro férrico generando la reacción:



Cuando la reacción de oxidación se realiza con solución el sulfato de hierro II (Santos, Machado, Correia, Reis, Ismael y Carvalho, 2010); comprobándose en el caso de las disoluciones con cloruro férrico, que se alcanza un consumo de energía límite en soluciones 2 M (2 moles) (Lee, Kuon, Kyongkeun y Díaz, 2015).

Otros estudios de electrodisolución y electrodeposición, emplean ácido metanosulfónico (MSA), en el proceso de refinación del zinc de minerales oxidados. Este método, se basa fundamentalmente en el uso de electrolito solo (puro) o mezclado con otros en proporciones definidas, como el caso de electrolitos a base de solución ácida de cloruro o sulfato férrico, utilizando electrodos en una batería de 3 celdas de uso eventual en zinc-cerio de tipo redox divididos y no divididos en baterías RFB (Amini y Pritzker, 2018).

Las pruebas de polarización y voltamperometría, realizadas, permiten observar que cuando se adiciona solución de cloruros a electrolitos de metaosulfonato, se experimenta un cambio en la nucleación tomando una orientación hacia la dirección positiva, generando la reducción del sobre potencial de nucleación, condición que mejora la cinética de deposición del zinc y la posterior disolución (Emanuele, Bassl, Macelli, Mete, Strada y Bozzini, 2022). En relación a esta mejora, esta se logra en el momento en que se agrega solución de sulfato o metanosulfato ya que es el único anión potente (Ghaleb y Ahmed, 2022). Además, el coeficiente de difusión del Ni y la densidad de corriente límite resultante para el Zn, influyen de tal manera, permitiendo que la deposición sea moderadamente más alta cuando se encuentra en solución de metanosulfato medio natural en combinación con cloruro (Pan, Wen, Cheng y Junqing, 2013). Así, los efectos generados por los cambios de la temperatura, variación de concentración del MSA, así como, de concentración de Zn II y variación de densidad de corriente Zn/ Zn II, también ocasionan variaciones en la velocidad de disolución (Xu, Wu, 2022).

Por otro lado, el estudio del control potencioestático y galvanostático son condicionantes del sistema, aunque, en variaciones de incremento de la temperatura o variación de la concentración de MSA, tiende a originar una reducción de la eficiencia de carga para la deposición de zinc, tanto en MSA mixto como puro (Pan, Wen, Cheng y Junqing, 2013), así mismo, se evidencia con electrolitos solo, tanto a mayor tasa de evolución de

hidrógeno, sin embargo, este no influye en la eficiencia de carga y de voltaje ya que, siempre permanece más elevada en soluciones de electrolitos mixtas de metanosulfonato y cloruro que en soluciones de electrolitos de MSA puros (Yuday, Deckembachy y Schienelder., 2022). Así, el uso de una solución de medio mixto de metanosulfonato debe permitir RFB de zinc-cerio no divididos con el fin de operar en un rango más amplio de temperaturas y concentraciones de MSA en comparación con el caso con electrolito MSA puro (Amini y Pritzker, 2018). Sin embargo, al adicionar sulfatos a electrolitos de metanosulfonato no se experimenta cambios en el rendimiento del sistema Zn - Zn II, comparado con el Metanosulfonato con electrolitos zinc - cerio no divididos, realizando el mismo sistema con rangos más elevados de temperatura y mayores concentraciones de metanosulfonato, comparado con uno mixto, si utiliza electrolito de MSA puro Sin embargo, si se adiciona sulfatos, tampoco cambia el rendimiento del sistema (Leung, Poncede León y Walch, 2011), (Amini y Pritzker, 2018).

Desde estos puntos de vista, son múltiples los métodos utilizados para la electrodisolución y electrodeposición del zinc a partir de minerales oxidados. Sin embargo las variables que intervienen en este proceso y que es necesario tener un control para obtener resultados óptimos y de calidad son las mismas en los diferentes métodos, la idea es obtener buenas recuperaciones de zinc metálico. En este sentido, estas pueden ser clasificadas como las relacionadas a los electrodos, relacionadas a la transferencia de carga, relacionadas a la solución electrolítica, las relacionadas a la energía eléctrica y las relacionadas a los factores externos (Zhang., Sun y Ge, 2022).

En el primer caso considera importante el área superficial de los electrodos; en el segundo caso considera relevante evaluar la adsorción y desorción, así como, la convección, difusión y migración de carga; en el tercer caso, evalúa las especies electro activas, la concentración de impurezas del electrolito, el pH de la solución electrolítica, tipo de solventes y sustancias aditivas adicionales; en el siguiente caso, el control de la energía eléctrica y la resistencia y en el último caso las que intervienen en el sistema como. La temperatura de la electrólisis, presión y tiempo de electrólisis (Jung, 2022).

Ante estas evidencias se vienen realizando múltiples estudios para la disolución de la esfalerita con diferentes concentraciones de cloruro férrico II, obteniéndose resultados favorables, sin embargo, uno de los principales problemas que se encuentran es el nivel de pH en que se realizan los procesos, alcanzando un nivel máximo de disociación con una corriente límite de 2 voltios y con soluciones 2 m (Staton, Taylor, Gemery y Shanke, 2006), (Peralta,

2019). Dado, cuando el límite del portador de carga minoritaria desde el centro Q, por lo que tanto la disolución con solución de sulfato y cloruro férrico se encuentran limitadas por una cinética línea en relación a la concentración del hierro (Markos, Hugleberg, Valetakari, Salmi, Murzin y., Lahtinen, 2022). Por lo tanto, las propiedades semiconductoras de la esfalerita interviene en la característica de la cinética de disolución, y a concentraciones altas del oxidante la disolución se encuentra limitada por la difusión de huecos, además, va a existir una dependencia de la velocidad de disolución por el contenido de hierro como solución sólida (Li, Binnermans, 2021).

Bajo ésta perspectiva, se plantea realizar la refinación del zinc mediante el método no convencional de electrodisolución y electrodeposición de minerales oxidados, a nivel de laboratorio, en el que se tomarán en cuenta las variables pH de electrodisolución electrodeposición, tiempo de disolución y voltaje utilizado en el proceso, a fin de poder determinar el nivel de recuperación frente al que se obtiene por el método convencional de refinación.

Material y método

El estudio se centró en la investigación aplicada (Hernández, , Fernández,. y Baptista, 2014) de diseño experimental (Sánchez, Reyes., Mejía, 2015), así como tecnológica (Dean, 2000). La muestra estuvo constituida por 9 porciones de concentrado de zinc de 250 gr, cada una, procedentes de un mineral que contiene esfalerita (ZnS), galena (PbS), covelita (CuS), pirita (CuFeS₂), calcopirita (FeS₂), dobres grises (CuArSbAg).

Procedimiento

- Se tomó una muestra del concentrado de Zn proveniente del almacén y se realizó el análisis mineralógico y granulométrico inicial.
- Otra porción de concentrado fue sometido a la etapa de tostación a una temperatura de 950 °C durante cinco horas, posteriormente se tomó una muestra para realizar el análisis químico y granulométrico de la calcina de zinc.
- Electrodisolución - electrodeposición
- Para los controles respectivos durante el desarrollo del proceso, se consideró un rectificador de 15 voltios y 60 amperios con su respectivo regulador de voltaje. Así mismo de una celda electrolítica de vidrio con electrodos de inox y aluminio.
- Se realizaron pruebas en el rango de 2 a 6 voltios y 2 a 3 amperios.
- Como cátodo de la celda electrolítica, se utilizó una plancha de aluminio de 10 cm x 10 cm y como ánodo una malla de inox, en el que se apoya la calcina de zinc

debidamente peletizada.

- El proceso de electrodeposición se inicia al colocar el cátodo en el electrolito, al mismo tiempo en que se regula el rectificador de acuerdo a los parámetros en estudio para la electrodeposición del zinc metálico en el cátodo.
- Seguidamente se coloca la plancha de aluminio como cátodo, se regula el electrolito y se culmina regulando el rectificador para que ocurra la obtención de zinc metálico en el cátodo.

Análisis del concentrado y calcina de zinc

Elemento	Concentrado	Calcina
	%	%
Zn	52.50	59.50
S/SO ₄	--	1.50
S/S ⁼	--	0.30
S total	31.45	1.80
Pb	1.92	2.30
Fe	8.12	9.20
Cu	0.54	0.664
Cd	0.21	0.24
Co	0.002	0.003
MgO	0.6	0.08
Mn	0.30	0.40
SiO ₂	1.50	1.75
Si ₂ O ₃	0.23	0.25
Insolubles	1.85	1.97
Ag g/li	129.00	148.00
As	1.15	0.17
Sb	0.05	0.07
Bi	0.05	0.05
Cl	0.008	0.01
Ni	0.0025	0.003
CaO	0.35	0.40
F	0.03	--
Tl	0.005	--
Ge	0.005	--
Sn	0.001	--
Hg	0.005	--
Se	0.006	--

En la tabla podemos observar la composición química del concentrado y calcina de zinc. En el caso del concentrado, el análisis arroja la presencia de Zn 52.50%, S total 31.45%, Pb 1.92%, Fe, 8.12%, Cu 0.54%, Cd 0.21%, Co 0.002%, MgO 0.6%, ;m 0.30%, SoO₂ 1.50%, Si₂O₃ 0.23%, insolubles 1.85%, Ag 129 g/l, As 1.15%, Sb 0.05%, Bi 0.05%, Cl 0.008, Ni 0.0025%, CaO 0.35%, F 0.03% TI 0.005%, Ge 0.005, Sn 0.01%, Mg 0.005%, Se 0.006%. En el caso de la calcina de zinc: Zn 59.50%, S/SO₄ 1.50%, S/S⁼ 0.30, S total 1.805, Pb 1.80%, Fe 9.20%, Cu 0.664, Co 0.03%, MgO 0.08%, Mn 0.40%, SiO₂ 1.75% Si₂O₃ 0.25%, insolubles 1.97%, Ag 148 g/l, As 0.17%, Sb 0.07%, Bi 0.05%, Cl 0.01%, Ni 0.03% y CaO 0.40%, encontrándose ausente F, Tl, Ge, Sn, Hg, y Se.

Análisis mineralógico del concentrado de Zn

Mineral	Fórmula	Contenido (%)
Esfalerita	ZnS.	58.00
Galena	PbS	8.00
Covelita	Cu ₂ -S	3.00
Piriya	Fe S ₂	16.00
Otros		15.00

En la tabla podemos observar que el análisis mineralógico realizado a una muestra del concentrado de Zn, arroja la el 58% de ZnS, 8% de PbS, 35 de Cu₂S, 16% de FeS₂, 15% de otros minerales.

Análisis granulométrico de la calcina de zinc

		Concentrado		Calcina		Concentrado		Calcina	
		gr	%	gr	%	%	%	%	%
80		3.27	1.31			1.31	98.69		
100	100	15.53	6.21	6.58	3.54	7.52	91.48	3.54	96.46
140	140	28.68	11.47	16.43	8.85	18.99	81.01	12.39	87.61
200	200	52.85	21.14	21.05	11.33	40.1.3	59.37	23.72	76.28
-200	325	149.67	59.87	54.02	29.09	100	0.00	52.81	47.19
Total	325	250.00	100.00	87.65	47.19			100	0.00
	Total			185.73	100.00				

En la tabla podemos apreciar los resultados del análisis granulométrico realizado a una muestra del concentrado y calcina de Zn. En el caso del concentrado: en m 80 el 1.0,5 queda retenido pasando el 98.69%; en m 100 el 7.52 queda retenido pasando el 91.48%, en m 140 el 18.99% queda retenido pasando el 81.01%; en m 200 40.13% queda retenido pasando el 59.37%. En el caso de la Calcina: en m 100 el 3.54% queda retenido pasando el 96.46%; en m 140 el 12.39% queda retenido pasando el 87.61%, en m 200 el 23.72% queda retenido pasando el 76.28%, en m 325 queda retenido el 51.81% pasando el 47.19%.

Parámetros operativos

Parámetros	Valores
Solubilidad del electrolito	3 l
Ley del Zn en solución	7.5 g/l
Tiempo de disolución	6 h
Concentración de H ₂ SO ₄ en solución	0.52 mol/l
Ley de Zn en calcina	59.50 %
Granulometría de la calcina	76.28 m -200
Peso de pellets en ánodo	125 g

En la tabla se observa los parámetros operativo tomados en cuenta en el desarrollo del estudio: solubilidad del electrolito 3 l., ley del Zn en solución 7.5 g/l, tiempo de disolución 6 h, concentración de ácido sulfúrico en solución 0.5 mol/l, Ley del Zn en calcina 59.50%, granulometría de la calcina 76.28 en m 200, peso de pellets en el ánodo 125g.

Variables operativas

Prueba	pH	Tiempo (h)	Voltaje (v)	Amperaje (A)
1	1	5	1	2.5
2	1	6	2	2.5
3	1	7	3	2.5
4	2	5	1	2.5
5	2	6	2	2.5
6	2	7	3	2.5
7	3	5	1	2.5
8	3	6	2	2.5
9	3	7	3	2.5

De acuerdo a la tabla, se realizaron 9 pruebas 3 a pH 1, 3 a pH 2, 3 a pH 3, con un tiempo de tratamiento de 5, 6 y 7 minutos cada prueba, manteniendo un voltaje de 2.5 voltios en cada una de ellas.

Resultados

Se realizaron pruebas a pH 1, 2 y 3, con períodos de disolución y electrodeposición de 5, 6 y 7 horas con 2.5 volt constante en todas las pruebas. A continuación se muestran los resultados con sus respectivos Balance Metalúrgico.

En la tabla 1, en las pruebas realizadas a pH 1, con 5,6 y 7 horas de disolución electrodeposición, El zinc electrodepositado muestra una recuperación de 85.82%, 85.84% y 85.82% .En cuanto a la ley del zinc electrodepositado el comportamiento que sigue es similar 45.37%, 45.38% y 45.37%, observándose un ligero incremento de de 0.01 unidades porcentuales en la recuperación como en la ley y 0.002 unidades porcentuales en la recuperación del zinc electrodepositado con 6 horas de tratamiento.

Tabla 1.
Balace Metalúrgico de pruebas a pH 1 con 5, 6 y 7 horas de tratamiento y 2.5 volt

Tiempo	Producto	Peso		Ley	Cont.Met.	Recuperación
Min		gr	%	%	gr	%
5	Zn Elec	135.92	73.18	45.37	61.67	85.82
5	Resíduo	49.81	26.82	20.46	10.19	14.18
5	Calcina	185.73	100.00	38.69	71.86	100.00
6	Zn Elec.	135.92	73.18	45.38	61.68	85.84
6	Resíduo	49.81	26.82	20.44	10.18	14.16
6	Calcina	185.73	100.00	38.69	71.86	100.00
7	Zn Elec	135.92	73.18	45.37	61.67	85.82
7	Resíduo	49.81	26.82	20.46	10.19	14.18
7	Calcina	185.73	100.00	38.69	71.86	100.00

En la tabla 2, de acuerdo a las pruebas realizadas a pH 2, con 5, 6 y 7 horas de tiempo de electrodisolución y electrodeposición, y 2.5 voltios de energía, se tienen recuperaciones de 78.24%, 72.15% y 66.28% de zinc electrodepositado, observándose un descenso conforme se incrementa el tiempo de tratamiento electrolítico. En cuanto a la ley del zinc electrodepositado se tiene 33.18%, 38.15% y 47.53%, observándose una tendencia contraria a las recuperaciones, es decir, conforme se incrementa el tiempo de tratamiento las recuperaciones disminuyen y se incrementa la ley del zinc electrodepositado.

Tabla 2:
Balace Metalúrgico de pruebas a pH 2 con 5, 6 y 7 horas de tratamiento y 2.5 volt

Tiempo	Producto	Peso		Ley	Cont.Met.	Recuperación
min		gr	%	%	gr	%
5	Zn Elec	135.92	73.18	33.38	51.22	78.24
5	Resíduo	49.81	26.82	31.40	15.64	21.76
5	Calcina	185.73	100.00	38.69	71.86	100.00
6	Zn Elec	135.92	73.18	38.15	51.85	72.15
6	Resíduo	49.81	26.82	40.17	20.01	27.85
6	Calcina	185.73	100.00	38.69	71.86	100.00
7	Zn Elec	135.92	73.18	35.04	47.63	66.28
7	Resíduo	49.81	26.82	48.65	24.23	33.72
7	Calcina	185.73	100.00	38.69	71.86	100.00

En la tabla 3, de acuerdo a la prueba realizada a pH 3 con 5, 6 y 7 horas de electrodisolución electrodeposición y 2 voltios de energía, se tiene recuperaciones de 62.53% y 62.53% y 48.16% de zinc electrodepositado, observándose que en el tratamiento realizado a 5 y 6 horas se tiene la misma recuperación disminuyendo luego a las 7 horas de tratamiento. En cuanto a la ley del zinc, el comportamiento sigue la misma tendencia de las recuperaciones, 40.59%, 40.59% y 37.88%, observándose que a las 5 y 6 horas de tratamiento se tiene la mayor ley, disminuyendo cuando se realiza el tratamiento a 7 horas.

Tabla 3
Balace metalúrgico de pruebas a pH 3 con 5, 6 y 7 horas de tratamiento y 2.5 volt

Tiempo	Producto	Teso		Ley	Cont.Met.	Recuperación
Min		gr	%	%	gr	%
5	Zn Elec	11068	59.59	40.59	44.93	62.53
5	Resíduo	75.05	40.41	40.02}	26.93	37.47
5	Calcina	185.73	100.00	38.69	71.86	100.00
6	Zn Elec	110.68	59.59	40.59	44.93	62.53
6	Resíduo	75.05	40.41	35.38	26.93	37.47
6	Calcina	185.73	100.00	38.69	71.86	100.00
7	Zn Elec	1107.33	49.93	37.88	41.79	58.16
7	Resíduo	78.4	50.07	38.35	30.07	41.84
7	Calcina	185.73	100.00	38.69	71.86	100.00

Discusión de resultados

La refinación del zinc por el método no convencional electrodisolución electrodeposición a partir del mineral oxidado proporcionó hallazgos muy interesantes para la refinación electrolítica del zinc, tanto en la variación de pH del sistema de disolución electrodeposición, tiempo de tratamiento del sistema, la ley del zinc electrodepositado, la ley del zinc y su recuperación, que es conveniente analizarlo individualmente.

El pH de electrodisolución electrodeposición y la recuperación del Zn electrodepositado

Es importante considerar que el pH es de gran importancia en el proceso de refinación del zinc por este método, en relación a la calidad del mineral y el rendimiento del proceso de electrodisolución electrodeposición, considerando la necesidad de controlarlo para realizar un proceso adecuado, teniendo en cuenta, que maximiza el rendimiento del mineral y minimiza el arrastre de impurezas. En ese sentido se propuso realizar el estudio a pH 1, 2 y 3, con 5, 6 y 7 horas de tratamiento electrolítico ya que la lixiviación de las calcinas de zinc en el proceso convencional es ácido y variado, fluctuando entre 0.5 y 1.5 de pH, además con fines de observar el pH óptimo para una buena recuperación de zinc electrodepositado, teniendo como parámetros de control el tiempo de disolución electrodeposición y la recuperación del zinc.

De acuerdo a los hallazgos encontrados, el pH óptimo para la disolución electrodeposición es en el que se obtiene en proporciones porcentuales aceptables, siendo los resultados del balance metalúrgico las pruebas realizadas a pH 1, en el que la recuperación se encuentra en el orden del 73.18%, de zinc en peso, en recuperaciones porcentuales similares obtenidas a pH 2, 73.18%, en contraste con las proporciones porcentuales obtenidas a pH 3 encontrándose entre 59.59% y 49.93%, observándose un decrecimiento significativo de casi 30 puntos porcentuales.

Como se evidencia las mayores recuperaciones en peso se obtienen a pH 1 tanto a 5, 6 y 7 horas de tratamiento con recuperaciones que se encuentran en el rango de 85.82%, 85.84% y 85.82% de zinc electrodepositado en los períodos de 5, 6 y 7 horas de tratamiento de electrodeposición en contraste con las recuperaciones obtenidas a pH 2 y 3, en que las recuperaciones decrecen encontrándose entre 78.24%, 78.24% y 66.28% a pH 2 y 62.53%, 62.53% y 58.16% a pH 3 en los períodos respectivos. En este sentido de acuerdo a estos resultados se evidencia que las mayores

recuperaciones de Zn electrodepositado se consigue a pH 1.

Amini y Pritzker, (2018), consideraron importante el estudio de la variable pH en la refinación del zinc por electrodisolución electrodeposición, ya que esta es fundamental para la recuperación del metal electrodepositado, así como disminuir el arrastre de impurezas en el proceso, teniendo en cuenta además, el tipo y concentración del electrolito utilizado. Así mismo, Peralta (2019), aplicando el criterio de la importancia de la evaluación del pH en función de la recuperación del zinc electrodepositado, realizó una serie de pruebas de laboratorio a diversos valores de pH, para estudiar el valor de acidez y la variación de las recuperaciones, hasta encontrar el pH óptimo en que se obtengan buenas recuperaciones. Así, para Li y Binnermans (2021) en estudios realizados a la recuperación del metal electrodepositado en función del pH, consideraron que ambas variables van a depender de las características del tipo de metal que se esté tratando, pero a la vez, también consideraron evaluar otras variables que se encuentren asociadas a la recuperación. En ese sentido, Lee, Kuon, Kyongkeun, Díaz (2015), al evaluar las recuperaciones utilizando electrolitos de FeCl₃ y HCl establecieron niveles de pH en los que se obtienen mayores recuperaciones, así mismo a través del control de esta variable se logró evitar el arrastre de impurezas que perjudican la calidad del producto final.

El tiempo de electrodeposición y la recuperación de zinc electrodepositado.

El tiempo considerado para la electrodisolución electrodeposición del zinc fue de 5, 6 y 7 horas - de tratamiento en el sistema, reportando hallazgos muy interesantes en la recuperación y concentración del metal.

El Zinc electrodepositado en las pruebas realizadas en los períodos de 5, 6 y 7 horas reportó recuperaciones en peso de 73.18%, 73.18% y 73.18% a pH 1, 73.18%, 73.18% y 73.18% a pH 2 y 59.59%, 59.59% y 49.93% a pH 3, así mismo los contenidos metálicos en estos períodos de tratamiento fueron de 61.67 gr, 61.68 gr y 61.67 gr a pH 1, 51.22 gr, 51.85 gr y 47.63 gr a pH 2, y 44.93 gr, 44.93 gr y 41.79 gr a pH 3, reportando recuperaciones de zinc electrodepositado que es conveniente analizarlas por períodos de tratamientos.

Las recuperaciones de zinc electrodepositado en los períodos de tratamiento 5, 6 y 7 horas se encuentran en el orden de 85.82%, 85.84% y 85.82% a pH 1, 78.24%, 72.15% y 66.28% a pH 2, 62.53%, 62.53% y 58.16% a pH 3. Como se puede observar las mayores recuperaciones se

obtienen a períodos de disolución de 5 y 6 horas de tratamiento evidenciado en todas las pruebas, así mismo a 7 horas de tratamiento esta tiende a decrecer. En este sentido, el período óptimo en el que se obtiene la mayor recuperación de zinc electrodepositado es de 6 horas con un nivel de pH 1. Para, Leung, Poncede León, Walch (2011), el tiempo de electrodisolución electrodeposición del zinc mediante la oxidación del mineral, va a depender de las características del mineral que se esta refinando, conjugando con otros factores que intervienen en el proceso. Desde este punto de vista, Tafoya y Chuck (2021), consideraron que el tiempo es una variable indispensable en la electrodisolución electrodeposición del mineral, por su importancia en la separación del contenido metálico, depositado en el zin metálico, por lo que es indispensable su evaluación para obtener buenos resultados en la recuperación del zinc electrodepositado en el producto final. Así mismo, Peralta (2019), considera que para optimizar el proceso de refinación del zinc por el método electrodisolución electrodeposición es necesario obtener el tiempo óptimo de electrodeposición, este se consigue aplicando criterios en pruebas de cinética. Así, para Jung, (2022) y Zhang, Sun, Ge, (2022), es indispensable el control del tiempo en el proceso de electrodisolución electrodeposición ya que este se encuentra asociado a otras variables como el pH y el voltaje de la energía entre otros, siendo necesario para obtener buenos resultados en las recuperaciones en peso, ley del zinc electrodepositado y contenidos sólidos, segn la naturaleza del metal. De acuerdo a estos autores es importante evaluar el tiempo de electrodisolución electrodeposición, teniendo en cuenta la relación existente entre el tiempo, la recuperación, la ley de metal electrodepositado y los contenidos sólidos.

La ley del zinc electrodepositado en las pruebas realizadas a pH 1, 2 y 3 con tiempos de electrodeposición de 5, 6 y 7 horas, reportaron contenidos de 45.37%, 45.38% y 45.37% a pH 1, 33.38%, 38.15% y 35.04% a pH 2, y 40.59%, 40.59% y 37.88% a pH 3, para 5, 6 y 7 horas de electrodisolución electrodeposición. Este reporte nos muestra la obtención de una mayor ley a pH 1, sin embargo, el tiempo óptimo es 6 horas en el que se consigue el mayor porcentaje de ley, en contraste con los resultados obtenidos a pH 2 y 3. Por lo tanto la optimización del proceso de electrodisolución, electrodeposición del zinc se optimiza realizando el proceso electro químico a pH 1 y 6 horas de electrodeposición. Para Zhongwen Bao ., Al T., Bain, Heather, Shrimpton., Finrock, Ptacek y Sopla, (2022) la ley del zinc electrodepositado va a depender de la ley del

mineral de cabeza con el que se inicia el proceso. Jung, (2022), consideran que la ley del metal electro depositado es importante el la refinación del zinc, manteniendose estándares y procedimientos para el método convencional; por lo que es mecesario realizar estudios para mejorar el método de electrodisolución electrodeposición con fines de obtener un producto de calidad. Leung, Poncede LEón y Walch, (2011), consideran que la concentración del metal electrodepositado o ley del metal es muy importante para efectos comerciales en el mercado nacional e internacional, condición que hace necesario la búsqueda de mejorar la metodología para la comercialización del producto final.

Por último, como planteó Peralta (2019) es conveniente optimizar la refinación del zinc por el método de electrodisolución electrodeposición evaluando las variables pH de solución electrolítica y tiempo de electrodeposición como parámetros importantes para obtener mayor recuperación y una buena ley en producto final del proceso, así como Amini y Pritzker, (2018), quienes consideraron la conveniencia de realizar estudios a diferente niveles de ph y diferentes tiempos de electrodeposición, así como diferentnes tipos de electrolitos puros o combinados para mejorar la calidad del producto terminado y optimizar el proceso de refinación electrolítica del zinc por el método de electrodisolución electrodeposición a partir del mineral oxidado esfalerita.

Conclusiones

La mayor recuperación de zinc electrodepositado, por el método de electrodisolución electrodeposición del mineral oxidado, tanto en porcentaje de recuperación, porcentajes de concentración como en contenido metálico se consigue realizando el proceso electroquímico a pH 1.

- El tiempo óptimo de electrodisolución electrodeposición del zinc en el que se consigue la mayor recuperación es 6 horas de tratamiento electrolítico.
- La presencia o arrastre de impurezas interfiere disminuyendo la recuperación del zinc electrodepositado en condiciones óptimas.

Referencias Bibliográficas

- Amini K., Pritzker M. D. (2018). Electrodeposition and Electrodisolution of Zinc in Mixed Methanesulfonate/BAed Electrolytes. *Electrochimica Acta*.
- Dean, R. A. (2000). La investigación tecnológica en las ciencias de la ingeniería e innovación tecnológica. *Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Corto*.
- Emanuele E., Bassl A., Macelli A., Mete C., Strada J., Bozzini B. (2022). Ciclo de electrodos de zinc en electrolitos de solventes eutécticos profundos: un estudio electroquímico. *Moléculas*, 28(3).
- Ghaleb A.M., Ahmed A.Q., (2022). Structural, electronic, and optical properties of sphalerite ZnS compounds. *Chalcogenide Letters*, 19(5), 309-318.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación científica. Mexico: NC GrawHill/OInteramericana.
- Jung K., K. Y. (2022). Efecto de las variables de recubrimiento en la reacción de evolución de oxígeno de los electrodos de Ni-Zn-Fe para la electrólisis de agua alcalina. *Catalizadores*, 12(3), 3-45.
- Koj V. M., Seriotkin Y. V., Deviatliarova A. S., Goryainov S.V., Khoury H. N., Sharygin V. V., Koury H. N., Danilovskii V. A. (2020). Esfalerita de temperatura ultraalta de mármoles metamórficos de combustión ricos en Zn-Cd-Se, complejo de Daba, Jordania central: paragénesis, química y estructura. *minerales*, 10(9), 822.
- Kos. S., Zupancic nGosar M., Miler M. (2022). Solid Carriers of Potentially Toxic Elements and Their Fate in. *Minerals*, 12.
- Lee S.H., Kuon O.H., Kyongkeun Y., Díaz R. . (2015). Eliminación de Zn de sedimentos contaminados por FeCl₃ en solución de HCl. *Metales*, 5(4), 1812-1820.
- Leung P.K., Poncede León C., I., Walch F. (2011). Zinc deposition and dissolution in methanesulfonic acid onto a carbon composite electrode as the negative electrode reactions in a hybrid redox flow battery. *Electrochimica acta*, 56(18), 6536-6546.
- Li X., Binnermans K. (2021). Disolución Oxidativa de Metales en Disolventes Orgánicos. *Sociedad Química Estadounidense*, 121(8), 4506-4530.
- Markos H., Hugleberg S., Valetakari D., Salmi T., Murzin D., Lahtinen M. (2022). - Modelado cinético de una reacción sólido líquido. Reducción de hierro térmico a hierro ferroso con sulfuro de zinc. *ciencias de la ingeniería química*, 59(4), 919-930.
- Nexa Resources Cajamarquilla S.A. (1992). Manual de Planta. Lima, Perú, Lima: NexaResources.
- Pan J., Wen Y., Cheng J., Junqing S. (2013). Deposición y disolución de zinc en ácido sulfúrico sobre un electrodo compuesto de grafito-resina como reacciones de electrodo negativo en baterías de flujo redox ácidas a base de zinc. *Electroquímica aplicada*, 43(6).
- Peralta, Y. E. (2019). Estudio de la electro-obyección del zinc, mediante la electrodisolución de minerales oxidados. (Tesis para optar al título de Ingeniero Metalurgista). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Arequipa, Perú.
- Sánchez H., Reyes C., Mehía K. (2015). Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística. Lima: Universidad Ricardo Palma.
- Santos s., Machado T., Correia J., Reis M., Ismael M., Carvalho J. (2010). Lixiviación con sulfato/cloruro férrico de zinc y elementos menores de un concentrado de esfalerita. *Ingeniería de Minerales*, 3, 606-615.
- Soler, P. (2018). *Materiales aislantes térmicos: tipos y aplicaciones*. Obtenido de Ventilación eficiente: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/materiales-aislantes-termicos/>
- Staton M.R., Taylor C.D., Gemery P.A. Shanke W.I. (2006). In which magazine was the article published? En R. Barnhisel (Ed.), *7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*. St. Louis MO.: American Society of.
- Tafoya N.A., Chuck C., (2021). Estudio de la Electrooxidación de un Concentrado de Zinc. *Materiales*, 14(11).
- Xu Z., Wu M. (2022). Toward Dendrite-Free Deposition in Zinc-Based Flow. *Batteries*, 8(117).
- Yaaya, J. E. (1992). Obtención de concentrados bulk Pb-Ag a partir de los residuos de la lixiviación en la UP Refinería de Zinc de Cajamarquilla. (Tesis para optar el Título profesional. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Lima, Perú.
- Yaya, J. E. (2021). Estudio para la flotación Bulk Pb – Ag, de una pulpa de la lixiviada en ácido caliente de la refinación electrolítica del Zn, a nivel de laboratorio, UMA. *Ñawparisun*, 2(2), 35-44.
- Yuday S.K., Deckembachy D., Schienelder J.J. (2022). Baterías secundarias de zinc-aire: una visión de los aspectos de recarga. *Baterías*, 8(11).
- Zay K., Gorbachev B., Adigamov A., Narochny I. (2022). Termodinámica y electroquímica de la interacción de la esfalerita con

- compuestos que contienen hierro (II) en relación con la flotación. *Recursos*, 11(12).
- Zhang H., Sun Ch., Ge M. (2022). Review of the Research Status of Cost-Effective Zinc-Iron. *Bateries*, 8(202).
- Zhongwen Bao .,Al T., Bain J., UnHeather K., Shrimpton Y., Finfrock Z., Ptacek C. J., Sopla D.W. (2022). Desgaste de esfalerita y controles sobre la migración de Zn y Cd en roca estéril de mina: un estudio integrado desde la escala molecular hasta la escala de campo. *eoquímica et Cosmochimica Acta*, 318, 1-18.