

ESTUDIO ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y RECUPERACIÓN DE METALES EN PILAS ALCALINAS Y BATERÍAS DE ION-LITIO USADAS

ECONOMICAL STUDY OF HYDROGEN PRODUCTION AND METAL RECOVERY IN SPENT ALKALINE CELLS AND LITHIUM-ION BATTERIES

José Antonio Guevara-García, Maritza Morales Pizarro, Beatriz Morales Chamorro, Yecenia Moreno Macias, Jessica Hernández Cortés.

Laboratorio de Investigación en Bioinorgánica y Biotecnología (LIByB), Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología. Universidad Autónoma de Tlaxcala. Carr. A Apizaquito S/N, Apizaco, Tlaxcala. México.

*Email: jaguevarag@garzas.uatx.mx.

Recibido: 22 de septiembre de 2023

Aceptado: 30 de octubre de 2023

RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio económico en base a los resultados en la línea de investigación sobre pilas y baterías usadas que se desarrolla en nuestro grupo de investigación. El objetivo ha sido generar tecnologías de aprovechamiento de estos residuos para producir valor agregado que haga atractivo su reciclado y evitar su disposición final en vertederos en México, generar estadísticas con información relevante sobre las prácticas de uso que aporten elementos para innovar tecnologías y gestionar políticas nacionales al respecto, y aportar proyecciones económicas que faciliten la toma de decisiones e incentiven la inversión en plantas de reciclado de estos residuos. Los resultados obtenidos señalan que existe una sub-utilización de las pilas primarias, las cuales se desechan con cerca del 50% de energía residual, misma que puede ser aprovechada para transformarse en un vector energético, como en el caso del hidrógeno, y que puede ser parte de una primera etapa de un proceso de reciclado, con lo cual se evitaría su impacto ambiental. Si, además, el proceso incluye la recuperación de metales, se tiene el potencial de generar grandes beneficios económicos, sobre todo en el caso de las baterías de ion-Li, con un alto contenido de cobalto. En este sentido, la conclusión más importante de esta investigación es la urgente necesidad que tiene nuestro país de aprovechar los residuos generados por todos los dispositivos portátiles de reserva de energía, de tecnologías anteriores y emergentes, en plantas industriales con tecnología nacional, que, además de los beneficios económicos, eviten seguir impactando al medio ambiente con metales pesados provenientes de estas fuentes.

Palabras Clave: pilas y baterías, ion-Li, hidrógeno, economía.

ABSTRACT

This article presents an economic study based on the results of the line of research on used cells and batteries that is developed in our research group. The objective has been to generate technologies for using this waste to produce added value that makes its recycling attractive and

avoids its final disposal in landfills in Mexico, generating statistics with relevant information on use practices that provide elements to innovate technologies and manage national policies, and provide economic projections that facilitate decision-making and encourage investment in recycling plants for this type of residue. The results obtained indicate that there is an underutilization of primary batteries, which are discarded with about 50% of residual energy, which can be used to produce an energy vector, as in the case of hydrogen, and that can be part of a first stage of a recycling process, thereby avoiding its environmental impact. If, in addition, the process includes the recovery of metals, it has the potential to generate great economic benefits, especially in the case of Li-ion batteries, with a high cobalt content. In this sense, the most important conclusion of this research is the urgent need for our country to take advantage of the waste generated by all portable energy reserve devices, of old and emerging technologies, in industrial plants with national technology, which, in addition of the economic benefits, avoid continuing impacting the environment with heavy metals from this source.

Keywords: cells and batteries, Li-ion, hydrogen, economics.

1. INTRODUCCIÓN

Nos encontramos en una situación mundial en donde la alta demanda de aparatos electrónicos portátiles es cada vez mayor, con ello aumenta la cantidad requerida de pilas y baterías como fuente de alimentación en estos dispositivos, y se incrementa el impacto ambiental por los residuos generados, debido a que la frecuencia de reemplazo del dispositivo, pila o batería es muy alta.

En 2020, se vendieron en la Unión Europea (UE) 229,000 toneladas de baterías portátiles. Ese mismo año, se acopiaron para su reciclaje 99,000 toneladas de pilas portátiles usadas, esta cifra representa cerca de la mitad (47%); mientras que de 2009 a 2020, la cantidad recogida representó casi la mitad (Eurostat, 2023). Este logro se debe a la Directiva sobre Pilas (Directiva 2006/66/CE sobre pilas y acumuladores portátiles) que busca minimizar el impacto negativo de las pilas y acumuladores en el medio ambiente, y que mandata que los residuos de pilas y acumuladores deben recogerse y reciclarse; se debe lograr una alta tasa de recolección y reciclaje para garantizar un alto nivel de protección ambiental y recuperación de materiales. Se proyecta que el mercado mundial de baterías alcalinas crecerá de \$7.76 mil millones de USD en 2021 a \$ 10.86 mil millones de USD en 2028 a una tasa compuesta anual del 4.9% en el período de 2021 a 2028 (Fortune, 2023). A pesar del impacto global de la COVID-19, este mercado prácticamente no se contrajo, al contrario, observó un repentino aumento.

En cuanto a los residuos generados, en 2021, había aproximadamente 63,000 toneladas métricas de chatarra de baterías disponibles para reciclaje en Europa, y se prevé que esta cifra aumente continuamente a lo largo de la década, hasta superar las 260,000 toneladas en 2030. La chatarra de baterías para reciclaje tiene dos fuentes principales: las baterías que llegan al final de su vida útil y los desechos de las fábricas de baterías (Statística, 2023).

Un promedio de ocho pilas alcalinas desechables es consumido por persona al año en los Estados Unidos (EUA) de acuerdo con la USEPA. Con una población de aproximadamente 305 millones de personas, esto se traduce en un estimado de 2,440 millones de pilas utilizadas y eliminadas (Krekeler *et al.*, 2012).

En México una de las principales preocupaciones es la contaminación ambiental producida por la eliminación de pilas y baterías usadas; esto se debe al rápido crecimiento de la demanda de los equipos electrónicos portátiles que las utilizan como fuentes de energía y dado que en México no existe reciclaje de estos residuos, estos se confinan en los rellenos sanitarios en cantidades de cientos de toneladas al año (Guevara García & Montiel Corona, 2012).

Guevara-García y Montiel-Corona (2012) determinaron el voltaje residual de 700 pilas de tipo "AA" seleccionadas al azar de las cuatro marcas de mayor incidencia después de una campaña de recolección de pilas usadas. Sus resultados mostraron que el 36 % de las pilas tuvieron un voltaje residual en el intervalo de 1.2-1.4 V, mientras que 70 % de las pilas tuvo voltajes mayores de 1.0 V, observándose desperdicio de energía en estos dispositivos. Un cálculo aproximado señala que en México se comercializan todos los años alrededor de 420 millones de pilas solo de tipo "AA" (Guevara-García & Montiel-Corona, 2014), de las cuales 189 millones contendrían la energía residual suficiente disponible para otras aplicaciones. La recuperación de la energía residual de las pilas y baterías usadas no se ha tenido en cuenta hasta ahora (Toro *et al.*, 2023), y podía ser económicamente atractivo.

Por otro lado, las baterías de iones de litio (BIL) se han vuelto omnipresentes en la sociedad moderna con una aplicación generalizada en dispositivos electrónicos, vehículos eléctricos y almacenamiento en red a gran escala. Las proyecciones de crecimiento para este mercado no muestran signos de desaceleración, y muchas industrias, particularmente la de movilidad eléctrica, aprovechan el bajo costo, la alta confiabilidad y densidad de energía de estas baterías. A pesar de los beneficios que aportan, el uso cada vez mayor de baterías de iones de litio conducirá inevitablemente a cantidades sustanciales de desechos de baterías. Actualmente se está desarrollando una nueva industria en torno a la recuperación de minerales valiosos de baterías de iones de litio gastadas. Aunque todavía está en su infancia, se prevé que el mercado del reciclaje de baterías experimente un crecimiento considerable durante la próxima década (Statística, 2023).

El valor de mercado del reciclaje de baterías de iones de litio en todo el mundo se estimó en 6,500 millones de USD en 2022. Se prevé que esta cifra crezca con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) de más del 20 por ciento en la próxima década, alcanzando los 35,100 millones de USD en 2031 (Statística, 2023). Las Baterías de Ion-Litio gastadas que terminan en tiraderos o simplemente son tiradas de manera irresponsable, son causantes de la contaminación por Co y Li del suelo y de los cuerpos de agua subterránea, ya que cuando llueve sus componentes son lixiviados. Además, la gran demanda de baterías de Ion-Litio traerá consigo el agotamiento de Li y Co, dos recursos no renovables (Parra Degante *et al.*, 2022).

Por otro lado, el hidrógeno puede jugar un papel crucial dentro de una estrategia global de energía sostenible a nivel mundial para cumplir con el doble desafío del cambio climático y la disminución de los recursos de petróleo, ya que es tanto un combustible transportable y un almacenamiento de energía a largo plazo en las principales redes eléctricas y otros sistemas de suministro de energía estacionaria (Montiel Corona *et al.*, 2009; Falcone *et al.*, 2021). La electrólisis del agua es una tecnología muy importante para una producción de hidrógeno a gran escala. Este proceso se propone como parte inicial del reciclado, lo que aunado a la recuperación de metales y producción de materia prima, puede conducir al manejo sustentable de este recurso, y ayudar a evitar que se agoten las reservas de metales como manganeso (Mn) y Li (Guevara-García *et al.*, 2013). Además, este proceso de reciclado integral impulsaría la creación de empresas y la generación de fuentes de trabajo, y evitaría el impacto ambiental de los metales tóxicos en los rellenos.

En México existen argumentos que han evitado el reciclado de pilas, tales como un supuesto balance económico negativo, es decir, las plantas industriales para el reciclado de las pilas no son económicamente viables (Román Moguel, 2008; Parraguirre Cuéllar *et al.*, 2019). Pero existen nuevas consideraciones que cambiarían esta situación, tales como: 1) el incremento en su producción y consumo; 2) la aparición de nuevas tecnologías donde incorporan metales con mejor cotización como el Co y Li; la demanda de materia prima de los productores de pilas, como el dióxido de manganeso electrolítico (DME) y el hidróxido de litio (HL), que en pocos años sobrepasaría la producción y las reservas, por lo que se incrementaría su precio considerablemente (Wang *et al.*, 2014); 3) el costo ambiental, aquí abordado como la emisión de CO₂-eq que se estima puede evitarse al recuperar metales de residuos y no de la minería.

Este trabajo compila datos experimentales y la proyección económica como evidencia para ayudar a reevaluar proyectos de plantas industriales para el reciclado de las pilas y baterías usadas. Uno de los objetivos de este trabajo es de establecer la cantidad de energía residual en las pilas usadas y de hacer la proyección económica del uso de esta energía en estos residuos con respecto a su posible aplicación en una planta industrial de reciclado.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1. Valorización económica de pilas alcalinas usadas

Nuestro grupo de investigación reportó la obtención de hidrógeno por electrólisis de agua utilizando la energía residual de las pilas usadas tipo “AA” (Guevara-García *et al.*, 2013; Morales Chamorro, 2015), como etapa inicial de una posible planta de reciclado. Los resultados mostraron un promedio de capacidad eléctrica de 369.4 mAh y potencia fue de 2.00 Wh, por pila usada, esto es, 14.78% y 66.87%, respectivamente, del promedio de capacidad y potencia reportado para pilas y baterías alcalinas de fábrica (Buchmann, 2013).

Tomando como base el tratamiento de una tonelada de pilas usadas y tratando sólo la fracción de las pilas con voltajes entre 1400 – 1600 mV, esto es, el 70% de las pilas “AA”. Podemos aplicar este mismo porcentaje a los otros tipos de pilas, tomando los datos de Guevara-García y Montiel-Corona (2012). Tenemos entonces el número de pilas de cada tipo que pueden procesarse y el porcentaje estimado de mAh y Wh que se pueden recuperarse de cada una.

Los resultados que se obtienen están consignados en la Tabla 1.

Tabla 1. Proyección de los resultados obtenidos de las baterías utilizadas en otros tipos de pilas y baterías y la energía teórica recuperada.

	Pilas “AAA”	Pilas “AA”	Pilas “C”	Pilas “D”	Baterías de 9 Volt	TOTAL
Capacidad ¹	1100 mAh	2500 mAh	7000 mAh	14000 mAh	3600 mAh	
Potencia ¹	1.4 Wh	3 Wh	9 Wh	18 Wh	25.2 Wh	

Capacidad recuperada ²	162.54 mAh	369.4 mAh (14.78%)	1034.32 mAh	2068.64 mAh	531.94 mAh	
Potencia recuperada ²	0.94 Wh	2.00 Wh (66.87%)	6.02 Wh	12.04 Wh	16.85 Wh	
Pilas útiles en 1 Ton ³	2517	9101	770	1428	168	13983
Capacidad recuperada en 1 Ton	409.10 Ah	3361.82 Ah	796.28 Ah	2953.66 Ah	89.16 Ah	7610.01 Ah
Potencia recuperada en 1 Ton	2.37 kWh	18.20 kWh	4.63 kWh	17.19 kWh	2.82 kWh	45.22 kWh

(1) Buchmann, Isidor (2013). Cadex Electronics Inc. Página en internet: http://batteryuniversity.com/learn/article/cost_of_power

(2) Calculado por pila con los resultados de este trabajo a partir del porcentaje recuperado para las pilas tipo "AA (en negritas).

(3) Utilizando el porcentaje por tamaño de pila vs. peso total (%) de Román Moguel (2008) [Tabla 4, pág. 19] se obtiene el peso de cada tipo de pila en 1 Ton, luego, utilizando el peso promedio de pilas individual de Román Moguel (2008) [Tabla 4, pág. 19], se obtuvo el número de pilas de cada tipo en 1 Ton. Finalmente, se utilizó el dato de Guevara-García y Montiel-Corona (2012) de 41.71 % como porcentaje de pilas útiles para recuperación de energía para dar el número de pilas útiles en 1 tonelada.

Los resultados de la Tabla 1 muestran que aproximadamente se puede disponer de cerca de 14,000 pilas de diferentes tamaños para extraer energía de una tonelada de pilas usadas. De estas, obtendríamos 7.6 kWh de corriente y 45 kWh de potencia.

Considerando una planta de reciclado de pilas usadas de 80 toneladas mensuales, se producirían, con una estimación a la baja, 3617 kWh/mes solamente utilizando las pilas usadas entre 1.4 y 1.6 V.

Para darnos una idea de la dimensión que tiene esta cantidad de energía exponemos un par de ejemplos en los que esta energía podría utilizarse. En primer lugar, se podrían recargar 72.35/mes baterías de plomo ácido de 50 kWh de capacidad, y utilizarse para mover vehículos eléctricos dentro y fuera de la planta. También se podrían recargar 861,282 celulares/mes con batería de litio (20 g) con densidad de corriente de 210 Wh/Kg (Zu y Li, 2011). Convirtiendo a corriente, esto resulta en 609 KAh/mes que se puede utilizar en procesos electroquímicos, por ejemplo, para producir aproximadamente 28,000 L de H₂/mes considerando un rendimiento del 10%; o bien, 1.1 toneladas/mes de zinc metálico, a razón de 3.3 Kg de Zn por 1 kWh, según Wiaux y Waefler (1995). Esta cantidad de corriente puede ser utilizada también para producir Dióxido de Manganeso Electrolítico (DME) a partir del reciclado de pilas usadas, que en total ascendería a 103 ton de DME (Xie et al., 2022).

Ahora bien, en cuanto a la factibilidad de recabar 80 toneladas de pilas usadas, según datos de Román Moguel (2008), en el año 2013 se recolectarían 7,633 toneladas de pilas usadas con la infraestructura que cuenta el país. Esta cantidad es muy superior a las 960 toneladas que se podrían reciclar en la planta hipotética, es decir, esta planta solo reciclaría el 12.58% del total de las pilas usadas en 2013. Desafortunadamente, no hay disponibles datos de recolección de pilas usadas

actualizados, sin embargo, para formarse una idea de la energía que podría recuperarse, se realizó el ejercicio del cálculo con los datos proyectados por Román Moguel (2008), y los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Proyección de la energía teórica recuperada que podría obtenerse con los datos de Román Moguel (2008) [Tabla 5, pág. 20]

año	Toneladas		kAh	kWh
	desechadas	recolectadas		
2012	25556	6133	46672.2	277318
2013	27261	7633	58087.2	345144
2014	29169	9334	71031.8	422058
2015	31211	11236	85506.1	508061
2016	33396	13598	103481	614865

Esta Tabla nos muestra con claridad el potencial energético y económico que tiene la recuperación de energía en nuestro país. Actualmente, el reciclado de pilas usadas en México es prácticamente nulo, por lo cual es sumamente importante incorporar prácticas de manejo de estos residuos para aprovecharlos, aunado a la creación de tecnologías y planes de negocios que, a su vez, estén siendo incentivadas por una legislación adecuada para este propósito. Además, hay que señalar el enorme impacto positivo al medio ambiente que tendría lograr un porcentaje importante de recuperación y reciclado. Este impacto también tiene un beneficio económico basado en consideraciones de costos de remediación de, por ejemplo, mantos acuáticos alcanzados por plumas de lixiviado de rellenos sanitarios saturados de metales pesados, una gran cantidad de los cuales provienen de las pilas usadas (Guevara-García *et al.*, 2012).

2.2 Valorización económica de baterías de ion-litio usadas

En cuanto a la BIL, la recuperación de energía no es posible debido a que, en su mayoría, las baterías se encuentran sin carga al momento de ser acopiadas. El principal valor económico reside en la recuperación de metales valiosos, pero también en las emisiones de CO₂-eq que se pueden evitar con la llamada minería urbana, es decir, la extracción de metales de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

Parra Degante y col. (2019) hacen una proyección del ahorro de emisiones que se lograría al recuperar los metales componentes de las BIL, en base a las baterías de ion-Li que potencialmente se pueden reciclar en México, sus resultados estiman en 832,500 kg CO₂-eq/Kg de BIL, el ahorro de emisiones, mientras que el valor comercial de los metales recuperados se aproxima a 2.8 millones de USD/año, siendo esta la primera aproximación que se tiene en México.

Un ahorro adicional proveniente de sustituir el calentamiento por parrilla de las soluciones lixiviantes, utilizando la energía proveniente de la entalpía de hidratación del ion Li, y al evitar la

calcineración del material catódico, proceso que destruye la red cristalina que hospeda al ion Li^+ e impide la liberación de la energía de hidratación, permite optimizar el proceso en cuanto a uso de energía eléctrica (Parra de Gante *et al.*, 2022).

Finalmente, los resultados del ahorro de emisiones de $\text{CO}_2\text{-eq}$, la ganancia neta de los metales extraídos y el ahorro económico de energía eléctrica, se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Ahorro energético, ahorro de emisiones y valoración económica del proceso de reciclado de baterías de ion-litio, extrapolado al Total de LIB's susceptibles de ser recicladas en México por año (1).

CONCEPTO	MONTO	UNIDADES
Ahorro de emisiones de $\text{CO}_2\text{-eq}$	832500	Kg
Valor comercial de los metales recuperados	2.8	Millones de USD
Ahorro económico de energía eléctrica	834165	USD

(1) Se calculó que existen 46'620,000 de baterías de ion-Li en México que potencialmente pueden reciclarse. Ref. de Parra Degante y col. (2019).

(2) Cada 14 LIB producen 20 g de material catódico que genera un ahorro de emisiones de $\text{CO}_2\text{-eq}$ de 0.25 Kg, al obtener los metales Co, Ni, y Mn por reciclado y no extraídos de minas.

(3) 14 LIBs generan 0.83 USD de ganancia por el valor comercial de los metales recuperados. Ref. de Parra Degante y col. (2019).

(4) La lixiviación del material catódico de 14 LIBs cuesta 5.00 MN de electricidad.

Es importante mencionar que existen factores que pueden modificar, tanto al alza como a la baja, esta estimación. Por ejemplo: el costo de la infraestructura, consumibles y salarios, implicados en el proceso industrial de la recuperación de metales, además del costo de transporte de la materia prima y las campañas/centros de acopio para una recaudación 100% efectiva de equipos usados. En contraposición tenemos la posibilidad de incrementar las ganancias si se recuperan metales valiosos como el oro, plata y tierras raras, si se recicla también las tarjetas electrónicas de los celulares; aunado a esto, la demanda de baterías de iones de litio aumentará aún más: el precio del carbonato de litio subió un 47% de 2015 al 2017, y se prevé que seguirá incrementándose rápidamente. Además, se encuentra el hecho de que las baterías de ion-litio también se usan para tabletas, computadoras portátiles, otros dispositivos portátiles, y automóviles eléctricos, cuyo número seguramente aumentará.

(1)

3. CONCLUSIONES

Este estudio nos muestra con claridad el potencial energético y económico que tiene la recuperación de energía de las pilas usadas en nuestro país. Actualmente, el reciclado de pilas usadas en México es prácticamente nulo, por lo cual es sumamente importante incorporar prácticas de manejo de estos residuos para aprovecharlos, aunado a la creación de tecnologías y planes de negocios que, a su vez, estén siendo incentivadas por una legislación adecuada para este propósito. Además, hay que señalar el enorme impacto positivo al medio ambiente que tendría lograr un porcentaje importante de recuperación y reciclado. Este impacto también tiene un beneficio económico basado en consideraciones de costos de remediación de, por ejemplo, mantos acuáticos alcanzados por plumas de lixiviado de rellenos sanitarios saturados de metales pesados, una gran cantidad de los cuales provienen de las pilas usadas (Guevara-García, 2012).

El reciclaje de baterías de ion-Li genera varios beneficios: ambiental, económico y social. En el aspecto ambiental, si extrapolamos a las baterías de ion-Li que potencialmente se pueden reciclar en México, esto nos arroja 832,500 kg CO₂-eq/Kg de ahorro de emisiones. En el aspecto económico, el valor comercial de los metales recuperados se aproxima a 2.8 millones de USD, siendo esta una primera aproximación que se presenta. En el plano social, el reciclado puede cumplir un papel adicional al de ser una fuente alterna de materias primas: el de aliviar la presión entrópica en los sitios de extracción, lo cual se traduciría, entre otras cosas, en coadyuvar a recuperar los ecosistemas y mejorar las condiciones de vida de los pobladores de los sitios donde se realiza la extracción de metales y materias primas. Además, en el contexto nacional, la generación de tecnología propia posibilita la creación de empresas, generando empleos, activando la economía y posibilitando las condiciones de independencia tecnológica, política y económica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Buchmann, Isidor (2013). Cadex Electronics Inc. Página en internet: http://batteryuniversity.com/learn/article/cost_of_power

Eurostat (2023). Waste statistics - recycling of batteries and accumulators. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_recycling_of_batteries_and_accumulators&stable=0

Falcone, P. M., Hiete, M., & Sapio, A. (2021). Hydrogen economy and sustainable development goals: Review and policy insights. *Current opinion in green and sustainable chemistry*, 31, 100506.

Fortune (2023). Fortune Business Insight. Alkaline Battery Market. <https://www.fortunebusinessinsights.com/alkaline-battery-market-103298>

Guevara-García, J. A., & Montiel-Corona, V. (2012). Used battery collection in central Mexico: Metal content, legislative/management situation and statistical analysis. *J. Environ. Manage.*, 95, S154-S157.

Guevara-García, J. A., Montiel-Corona, V., & Landry, T. D. (2012). Fate and risk evaluation of WEEE including spent batteries and compact fluorescent lamps in Mexico. *International Journal of Environmental Science and Engineering Research*, 3(3), 11-24.

Guevara-García, J.A, Morales Chamorro, B., González Contreras, B.M., Munive Rojas, M.A. (2013). Obtención de hidrógeno utilizando la energía residual de las pilas usadas. *Chemistry Sciences*, 3(4), 35-37.

Guevara-García, J.A., Montiel-Corona, V. (2014). Pushing Mexico to a Recycle Culture. En el Libro *Mexico in Focus: Political, Environmental and Social Issues*. José Galindo (Ed.). Nova Science Publishers, Inc. Hauppauge, NY, USA. Capítulo 6, pp. 141-176. Series: Latin American Political, Economic, and Security Issues. ISBN: 978-1-63321-885-7.

Krekeler MP, Barrett HA, Davis R, Burnette C, Doran T, Ferraro A, Meyer A. (2012). An investigation of mass and brand diversity in a spent battery recycling collection with an emphasis on spent alkaline batteries: Implications for waste management and future policy concerns. *J Power Sources*. 203:222–226. doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.11.040.

Montiel Corona V., Sánchez Camarillo A.R., Guevara García J.A. (2009). El hidrógeno como combustible y su producción biológica: el futuro nos alcanza. *Revista CiBiyT*, Editada por la Universidad Autónoma de Tlaxcala. 3 (11), 35-42.

Morales Chamorro B. (2015). *Estudio de la energía residual y de la obtención de hidrógeno con pilas usadas*. [Tesis de Licenciatura en Química Industrial no publicada]. Universidad Autónoma de Tlaxcala.

Parra Degante J., Rojas Escobar S., Jaramillo Quintero L.P., Munive Rojas M.A., Guevara-García J.A. (2022). Novel economical method for recovering valuable metals from used Li-ion batteries. *Proceedings of 1st. International Conference on Sustainable Chemical & Environmental Engineering*. SUSTENG 2022. Rethymno, Crete, Greece. Pages 265-266. ISBN 978-618-86417-0-9.

Parra Degante, J., Hernández, J, Mendoza, G., Guevara, J. A. (2019). Reciclado de pilas y baterías III. Recuperación de metales y manejo sustentable. *Colección Memorias de los Congresos de la Sociedad Química de México*. 54° Congreso Mexicano de Química 38° Congreso Nacional de Educación Química. Trabajos estudiantiles y profesionales de Química Ambiental (QSUS), 18-39. Obtenido de <https://sqm.org.mx/wpcontent/uploads/2021/04/CMC-SQM-2019.pdf>

Parraguirre Cuéllar, K., Sánchez U., Sánchez, P., Gonzales, B. M., & Guevara, J. A. (2019). Reciclado de pilas y baterías II. Economía Energética. *Colección Memorias de los Congresos de la Sociedad Química de México*. 54° Congreso Mexicano de Química 38° Congreso Nacional de Educación Química. Trabajos estudiantiles y profesionales de Química Ambiental (QAMB), 96-99. Obtenido de <https://sqm.org.mx/wp-content/uploads/2021/04/CMC-SQM-2019.pdf>

Román-Moguel, G.J. (2008). Asociación Mexicana de Pilas. DETERMINACIÓN DE PELIGROSIDAD DE PILAS USADAS COMPLEMENTADA CON ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. http://www.amexpilas.org/amexpilashtml/dwnpdf/nac_ipn_analisis_ciclovida_pilas.pdf

Statista (2023). Battery recycling worldwide - statistics & facts. <https://www.statista.com/topics/9962/li-ion-battery-recycling/#topicOverview>

Toro, L., Moscardini, E., Baldassari, L., Forte, F., Falcone, I., Coletta, J., & Toro, L. (2023). A Systematic Review of Battery Recycling Technologies: Advances, Challenges, and Future Prospects. *Energies*, 16(18), 6571.

Wang, X., Gaustad, G., Babbitt, C. W., & Richa, K. (2014). Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 53-62.

Wiaux J.-P., Waefler J.-P. (1995). Recycling zinc batteries: an economical challenge in consumer waste management. *Journal of Power Sources*. 57 (1995), 61-65.

Xie, Z., Liu, Z., Tao, C., Li, C., & Chang, J. (2022). Production of electrolytic manganese metal using a new hyperchaotic circuit system. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 4804-4815.

Zuab Chen-Xi, Li Hong. (2011). Thermodynamic analysis on energy densities of batteries. *Energy Environ. Sci.* 4, 2614-2624.