


Diseño de una técnica electroquímica para recuperar platino y cobre a partir de residuos automotrices

Emrick Quinn Bruno, Navarrete López Alejandra Montserrat, Ortiz Romero Vargas María Elba, Salazar Peláez Mónica Liliana, Guzmán Rangel Georgina, Ramírez-Quirós Yara*

Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ciencias Básicas. Av. San Pablo No. 420, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02128. México.

*Autor para correspondencia: yararq@azc.uam.mx

ORCID : 0000-0003-4078-210X

Recibido:

10/mayo/2024

Aceptado:

12/diciembre/2024

Palabras clave:

Recuperación electroquímica, cobre, platino

Keywords:

Electrochemical recovery, copper, platinum

RESUMEN

El objetivo de este proyecto fue la recuperación de cobre y platino a partir de desechos automotrices, utilizando técnicas electroquímicas en solución acuosa. La implementación de los ánodos de las celdas electroquímicas incluyó el uso de materiales de fácil adquisición y costo relativamente bajo. Se realizaron análisis por difracción de rayos X (DRX) para caracterizar las muestras y evaluar la eficiencia del proceso en términos de la masa electrodepositada por unidad de energía eléctrica consumida. En el caso del platino, el proceso incluyó un análisis en microscopía electrónica de barrido para confirmar la presencia de este elemento. La caracterización inicial de los materiales depositados en los ánodos correspondientes indica la presencia del metal que se deseaba recuperar. La investigación realizada requiere continuidad para el establecimiento de las condiciones óptimas de operación para este proceso.

ABSTRACT

The objective of this project was to recover copper and platinum from automotive waste using electrochemical techniques in aqueous solution. The implementation of the electrochemical cell anodes involved the use of readily available materials and relatively low cost. X-ray diffraction (XRD) analyses were conducted to characterize the samples and assess process efficiency in terms of mass electro-deposition per unit of consumed electrical energy. For platinum, the process included scanning electron microscopy analysis to confirm its presence. The initial characterization of materials deposited on the corresponding anodes indicates the presence of the desired metal for recovery. Further research is needed to establish optimal operating conditions for this process.

Introducción

El cobre fue uno de los primeros metales utilizados por el hombre, marcando la historia de la humanidad por completo. Se usó durante siglos como moneda de cambio y como materia prima para aplicaciones como esculturas, tuberías, conductores eléctricos y utensilios de cocina (Muñoz, 2013).

Actualmente el cobre es uno de los metales más utilizados a nivel mundial, denominado como el metal rojo, y es posible utilizarlo en su forma pura o en aleaciones. Debido a su alta conductividad eléctrica, térmica y a su nulo magnetismo, tiene una amplia aplicación en las industrias emergentes como transmisor de datos, audio e imagen (Gunn, 2014).

Muchas partes de automóviles contienen cobre para distintas aplicaciones, como las bujías, que están constituidas por un núcleo de cobre recubierto por porcelana y un electrodo de níquel, iridio o platino en la punta. Las bujías son parte fundamental para cualquier motor de combustión interna y se estima que cada año se generan 70,000 toneladas de desechos de bujías en el mundo, 17% de esta masa contiene cobre que puede ser recuperado y devuelto al mercado.

Por otra parte, el platino es un metal noble extremadamente raro, blanco-grisáceo, maleable y muy dúctil. Se encuentra en yacimientos de arsenitos y sulfuros asociados al cobre y níquel. Por su actividad catalítica y su baja reactividad, es usado en distintas industrias, principalmente en la química para reacciones de deshidrogenación, deshalogenación, oxidación, etc. (Gunn, 2014). Este metal presenta baja toxicidad en su estado metálico y en el área médico-científica se aplica en la construcción de marcapasos e instrumentación quirúrgica y recientemente se ha incursionado en la investigación de tratamientos alternativos para el cáncer (Rodríguez-Gómez, 2017).

A partir del 2012, la demanda de platino aumentó exponencialmente por el auge de catalizadores automotrices usados para mitigar la producción de gases invernadero. Sin embargo, la minería de platino genera un alto impacto ambiental en el lugar de la extracción, encontrándose contaminación de cuerpos de agua por nitratos en un radio de hasta 15 kilómetros alrededor de las menas de platino y la contaminación de sales de platino, asociada con distintos tipos de cáncer (Bollero, 2012).

En la actualidad, la demanda de platino asciende a 178 toneladas métricas, con un precio en el mercado al día 6 de marzo de 2023 de \$34.4 millones de dólares por tonelada, siendo uno de los metales mejor valuados (Krishnan, 2023).

Gracias a la demanda tecnológica y de consumo que se vive en la actualidad, tanto el cobre como el platino se encuentran en la mira de organismos gubernamentales de países como Estados Unidos, Canadá e incluso la Unión Europea, debido a que su uso constante ha provocado una producción desmedida de desechos de estos metales (Gunn, 2014).

Se estima que más del 30% de cobre que circula en el mercado actual proviene del reciclaje. El método más usado para el reciclaje del cobre es la pirometalurgia, proceso que emite agentes altamente contaminantes como dioxinas y furanos, grandes cantidades de gases de efecto invernadero y, además, consume enormes cantidades de energía. En segundo lugar, se encuentran las técnicas de extracción mecánica, que se utilizan principalmente en plantas de reciclaje de metales y basura electrónica y presentan el inconveniente de la variabilidad de la pureza en el producto recuperado. Estas técnicas separan el metal de lo que se denomina "desechos con menor beneficio económico" para la posterior comercialización del producto en bruto (Cui y Forsberg, 2003).

Los procesos electrolíticos de recuperación de metales se aplican preferentemente en casos específicos en los que se requiere cobre con una pureza superior al 98%, siendo todavía un campo sin aprovechar, ya que menos del 20% del cobre comercializado en el mundo es obtenido por un método electrolítico (Yifei, 2015). Se ha encontrado que la recuperación de cobre a partir de soluciones ácidas de decapado, con un pH de 1 y densidad de corriente de 4 A dm⁻², tiene un rendimiento promedio de entre 30% y 80% del material que se encuentra en solución (Collivignarelli et al., 2019). La implementación de un método electrolítico funcional y efectivo para el reciclaje de los núcleos de bujías implicaría un ahorro energético anual estimado de 66,000 Mw. Este ahorro energético evitaría la emisión a la atmósfera de entre 300 a 400 millones de toneladas de dióxido de carbono al año a nivel global (Agencia Internacional de Energía, 2020), abriendo un nuevo mercado de reciclaje de aproximadamente \$1,750 millones de pesos.

La recuperación de platino a partir de convertidores catalíticos se hace a través de procesos pirometalúrgicos, mediante la fundición del sustrato catalítico utilizando hornos de arco sumergido e incluso métodos de inducción electromagnética (Alvarado Hernández, 2016). También están las técnicas hidrometalúrgicas, que rinden entre el 72% al 98% de platino, sin embargo, durante este proceso se expiden compuestos peligrosos y altamente contaminantes como gases de amoníaco y cloro (Barakat y Mahmoud, 2004).

Nuevos métodos hidrometalúrgicos, como el proceso INCO (Birchall, 1978), logra eficiencias de recuperación que oscilan entre el 90% y 95% y una pureza del 99.5% en el producto final. Entre los inconvenientes de este proceso se pueden mencionar que tiene una cinética de extracción lenta y el sulfuro de dioctilo utilizado presenta un muy bajo punto de inflamabilidad (Alguacil, 1995).

Otros métodos de recuperación de platino en catalizadores automotrices hacen uso de compuestos orgánicos para la recuperación y refinado del metal, sin embargo, estos procesos son complicados y costosos debido a los componentes necesarios para llevarse a cabo (Alguacil, 1995).

Existen distintos estudios sobre la recuperación electroquímica del platino, uno de ellos utilizó electrodos de carbono vítreo y una solución de cloruro de sodio, logrando eficiencias no mayores al 18% (Harrar et al., 1984). Otros métodos electroquímicos para la extracción del platino combinan métodos de electrodeposición con procesos de fundición a temperaturas altas, lo cual implica un gasto energético mucho mayor al de los procesos electroquímicos tradicionales y se logran recuperaciones de alrededor del 30% (Dong, 2015).

Es de vital importancia desarrollar y aplicar técnicas verdaderamente limpias y económicamente viables para la recuperación de minerales críticos tal como es el caso del cobre y el platino; la electrólisis en medio acuoso puede ser una gran alternativa para esto, si se lleva a cabo de manera correcta, tan sólo para estos dos metales implicaría una reducción de entre 300 y 400 millones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, y un mercado emergente de cerca de 18 mil millones de pesos.

Metodología

Procedimientos experimentales para la recuperación del cobre

Preparación mecánica del núcleo de bujías

Las bujías usadas en los experimentos fueron bujías NGK modelo BKR5EGP, preparadas mecánicamente con ayuda de un tornillo de banco para romper la estructura exterior de la bujía, conformada por un marco de acero relleno de cerámica, y exponer su núcleo. Después, se realizó una limpieza superficial con acetona para eliminar cualquier impureza por una mala combustión.

Preparación de los ánodos 'inox'

Se utilizaron 10 placas de acero inoxidable (inox) de 15 cm de largo por 10 cm de ancho y 3 mm de grosor para la electrodeposición de cobre. Las placas se limpiaron superficialmente con acetona y se secaron en la estufa a 105°C, con la finalidad de eliminar cualquier rastro de humedad. Previo al montaje del sistema electroquímico, las placas se llevaron a peso constante de manera individual.

Electrodeposición de cobre

Se diseñó un circuito para la electrodeposición de cobre de los núcleos de bujía, el cual constaba de una fuente de alimentación con voltaje y corriente variables con un medidor de voltaje y corriente continua integrado de la marca SNAN, modelo DP01. Como cátodo de la celda se utilizaron los centros de bujía, uno para cada experimento. El ánodo de la celda consistió en las placas inox descritas anteriormente.

Cómo electrolito de celda se utilizó una solución de CuCl_2 con una concentración de 0.5 M, preparada a partir de cloruro cúprico $\text{CuCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Fermont, A.C.S. E=99%).

Se realizaron 5 corridas independientes (todas por duplicado) variando la corriente en cada una de ellas, desde un valor inicial de 0.5 amperios y alcanzando un valor final de 2.5 amperios, con incrementos regulares de 0.5 amperios. Cada electrodeposición se llevó a cabo durante 1 hora 30 minutos.

Secado y almacenamiento del material obtenido

Pasado el tiempo de electrodeposición de cada experimento, se retiraron ambos electrodos de la celda para secarlos en estufa eléctrica a 105°C hasta obtener peso constante.

De la superficie de cada ánodo 'inox' se obtuvo una muestra del recubrimiento depositado para su posterior análisis por medio de difracción de rayos X.

Procedimientos experimentales para la recuperación del platino

Preparación mecánica del convertidor catalítico

La estructura cerámica del convertidor catalítico, previamente fragmentada, se trituró con ayuda de un mortero de porcelana para aumentar el área superficial y promover un mayor contacto entre la muestra sólida y la solución de digestión, aumentando así la superficie de reacción para los pasos posteriores.

Digestión del convertidor catalítico

La solución digestora consistió en una dilución al 50% de agua regia (AR) preparada con una proporción de 3:1 de HCl y HNO₃. Todas las soluciones utilizadas se prepararon con agua desionizada, obteniendo el volumen suficiente para cubrir la muestra sólida. La digestión se realizó bajo la campana de extracción.

La solución digestora se agregó sobre el convertidor catalítico triturado, mezclando suavemente para promover el contacto entre la solución y todo el material particulado. Se permitió que la mezcla reposara durante 7 días, moviendo ocasionalmente para favorecer la digestión del convertidor. Posteriormente, la fase líquida se filtró por gravedad y por último se filtró al vacío, recuperando los sólidos húmedos retenidos en un embudo Büchner.

Preparación de los electrodos de grafito

Para la recuperación electrolítica del platino se utilizaron como ánodos barras de carbono de 5 cm de largo y 1 cm de diámetro. Las barras se limpiaron superficialmente con acetona para eliminar impurezas superficiales, se secaron en estufa a 105°C y cada una se llevó a peso constante.

Electrodeposición de platino

La electrodeposición de la solución obtenida del filtrado del sistema de digestión se llevó a cabo en una celda electrolítica constituida por 2 electrodos de carbono, uno funcionando como cátodo y el otro como ánodo. El electrodo utilizado como ánodo fue reutilizado durante todos los experimentos, ya que la reacción de oxidación de la celda ocurrió en el electrolito que se encontraba alrededor de éste, generando gas cloro (Cl₂), entre otros compuestos. Como electrolito de la celda se utilizó la misma solución filtrada del sistema de digestión. Se realizaron 5 experimentos con dos réplicas cada uno. El primer experimento operó con una corriente de 0.5 amperios durante 80 minutos. La corriente se varió progresivamente con incrementos de 0.5 amperios para cada experimento, hasta alcanzar una corriente final de 2.5 amperios. Cabe destacar que para cada experimento se usaron distintos voltajes para obtener la intensidad de corriente requerida, ya que la resistencia intrínseca del circuito impedía alcanzar dicha corriente con un potencial eléctrico menor.

Secado y almacenamiento del material obtenido

Pasado el tiempo de electrodeposición de cada experimento, se retiraron ambos electrodos de la celda para secarlos en estufa eléctrica a 105°C hasta obtener peso constante.

Análisis de muestras

Difracción de Rayos X

Se utilizó el difractómetro X'Pert Pro de Panalytical para obtener los difractogramas de los materiales obtenidos en las electrodeposiciones de cobre y platino. Las muestras fueron irradiadas con rayos X de Cu-K α de 1.5418 Å de longitud de onda. El intervalo de recolección de datos fue de 4 a 80 grados, con un tamaño de paso 0.02 (2 θ), utilizando un detector X'Celerator. Las mediciones se realizaron a 40 kV y 40 mA, con un tiempo de barrido de 0.4s. Para la visualización e interpretación de los resultados se empleó el software QualX2, desarrollado por el Instituto Di Cristallografía CNR, en conjunto con las bases de datos POWCOD desarrolladas por la Universidad de Vilna.

Las muestras de cobre y platino para difracción de rayos X se prepararon raspando con una espátula de acero inoxidable el respectivo material electrodepositado, que posteriormente se trituró en mortero de porcelana y se tamizó para recuperar las partículas más finas y homogéneas.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido Carl Zeiss AG SUPRA™ 55VP con intervalo de resolución entre 1.7nm a 1.0kV y 4 nm a 0.1kV. Las mediciones se llevaron a cabo en un rango de vacío de 2 a 133 Pa y un voltaje de aceleración de 0.1 a 30 kV. Las imágenes se procesaron con una resolución de 3072 x 2304 píxeles aplicando el software SmartSEM™ con Windows® XP.

El análisis por MEB se realizó sobre el material del convertidor catalítico, en una muestra triturada en mortero previa a la digestión de la muestra, para confirmar la presencia de platino

Una vez terminada la digestión, las muestras se filtraron al vacío, se enjugaron con agua desionizada y se llevaron a peso constante en estufa eléctrica a 105°C. El material sólido recuperado se conservó en viales para dar seguimiento a la recuperación de platino a partir de la fase sólida, realizando de nuevo el análisis por MEB.

Resultados y discusión

Recuperación del cobre

Los núcleos de bujía se conforman por una varilla terminada en punta de aproximadamente 2 mm de diámetro por 1.5 cm de largo, cubierta por una capa de una mezcla de polvo negro y un líquido con características físicas similares a las del combustible gastado. Una vez limpiado el núcleo de bujía, presentó un aspecto metálico de color rosa pálido, casi plateado, indicando que su composición no es sólo de cobre.

Al comenzar el experimento la fuente de alimentación se ajustó a su máxima capacidad de amperaje, con un potencial de corriente fijado a 0 volts. Para la primera corrida de electrólisis del cobre, con la corriente de 0.5 amperios, se logró establecer a un voltaje de 6.5V.

Pasados 38 minutos de la electrodeposición, la capa externa del núcleo de la bujía comenzó a adelgazarse, dejando expuesto un material de color cobrizo, a la vez que se formaba un depósito, presumiblemente de cobre, en el ánodo. El núcleo gastado se recubrió gradualmente de una sal blanca (Figura 1A). La celda se polarizó gradualmente hasta que su amperaje disminuyó hasta cero antes de los 90 minutos, tiempo establecido en el diseño del experimento. Al finalizar la electrodeposición con la polarización del cátodo, el ánodo de acero inoxidable mostró la formación de una capa metálica-cobriza sobre la superficie sumergida en el electrolito (Figura 1B). Este recubrimiento presentó un cambio de color significativo después de secarlo a la estufa, tornándose a color verde olivo (Figura 1C).

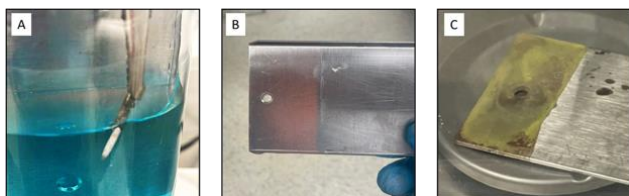


Figura 1. A. Cátodo (núcleo de bujía) de la celda de electrodeposición de cobre después de su polarización. B. Ánodo 'inox' de la celda de electrodeposición de cobre, antes del secado en estufa. C. Ánodo 'inox' de la celda de electrodeposición de cobre, después del secado en estufa.

Los difractogramas obtenidos de muestras recuperadas de los ánodos inox, a los diferentes voltajes de cada corrida de electrodeposición de cobre se muestran en la figura 2.

Se puede observar que las posiciones de los principales picos coinciden entre las corridas realizadas a diferentes intensidades de corriente. Tres de las seis señales presentes corresponden a posiciones características de los compuestos NiZn (referencia 00-152-3094) y CuCl (referencia 00-900-8842), según datos reportados por la Crystallography Open Database, desarrollada por la Universidad de Vilna.

La composición de los núcleos de bujía contiene cantidades importantes de Ni y Zn (Green Spark Plug Co. Ltd., 2024), por lo que es razonable pensar que en la primera parte del proceso electroquímico estos elementos se remueven de la capa superficial del cátodo para depositarse junto con una fracción de cobre sobre el ánodo de placa inox (Figura 1B).

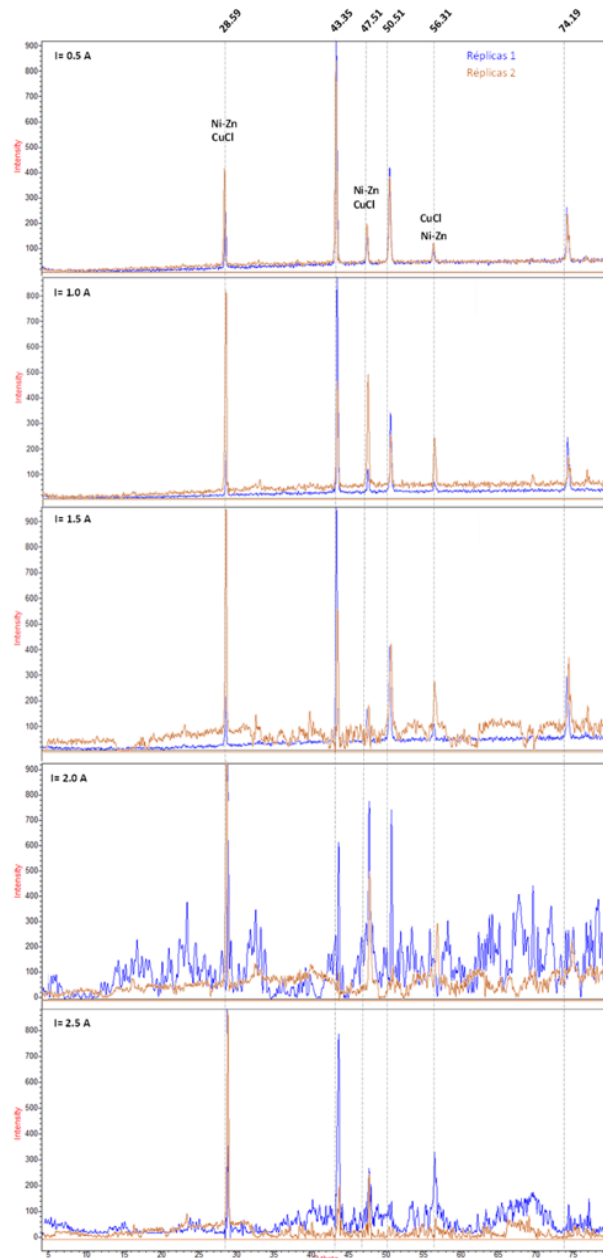


Figura 2. Comparación de los difractogramas obtenidos para los diferentes sistemas de electrodeposición del Cu.

La composición arrojada por el DRX semeja a la plata alemana, una aleación de cobre-níquel-cinc utilizada con fines decorativos con características físicas muy cercanas a las de la plata (Del Castillo Rodríguez, 2016).

Después del secado en la estufa, el extremo de los ánodos donde se llevó a cabo la electrodeposición adquirió un aspecto no metálico y un color verde claro (Figura 1C). Esta descripción concuerda con la del cloruro de níquel, cuya alta solubilidad en agua (2.54 kg/L) impediría que se notara su presencia antes de sacar el ánodo de la estufa (Carl Roth, 2016).

La alta concentración de iones cloruro en la solución electrolítica (1.0 M de Cl⁻) justifica que de igual manera se formen las sales correspondientes de los otros metales presentes.

El adelgazamiento y eventual remoción de la capa superficial del núcleo de bujía dejó expuesto su centro de cobre. La oxidación del cobre metálico Cu⁰ a Cu¹⁺ (0.521 V) en presencia de iones cloruro (Cl⁻), promueve la formación de cloruro de cobre (I) (CuCl), que exhibe una baja solubilidad (~54mg/L), por lo que quedaría depositado sobre el cátodo (Carl Roth, 2015). Este proceso de deposición en el cátodo polarizó la celda, abatiendo el amperaje hasta cero. La presencia de este compuesto se confirmó mediante difracción de rayos X (DRX).

La eficiencia global del proceso se determinó en función del consumo energético, la cual está dada por la siguiente ecuación (Bard y Faulkner, 2001):

$$\eta \left(\frac{kw}{gh} \right) = \frac{E}{m} \quad \text{Ec. 1}$$

En donde: n es la eficiencia global del sistema.

E es la energía consumida en kilowatts h

m es la masa electrodepositada en la celda en gramos

La energía-eficiencia obtenida en cada experimento se reporta en la figura 3.

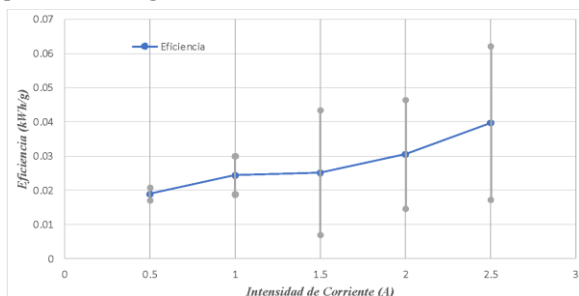


Figura 3. Eficiencias de la electrodeposición de cobre a diferentes intensidades de corriente.

La eficiencia global del sistema, expresada por la relación masa depositada/energía consumida, reveló que la corrida con una mayor eficiencia promedio fue la realizada a 2.5 amperios; es posible que esto sea debido a que no se alcanzaron las condiciones de operación de mayor eficiencia para la celda electroquímica.

Recuperación del platino

La pulverización de la piedra catalítica produjo un polvo fino de color gris oscuro en el que se encontraron partículas metálicas dispersas. El material pulverizado se analizó cuantitativamente con Espectroscopía por Dispersión de Energía (EDS) y cualitativamente por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Los resultados de estos análisis se muestran en la figura 4.

ELEMENTO	% EN MASA	
	INICIAL	FINAL
O	53.26	38.3
Na	0.5	nd
Mg	5.01	0.72
Al	15.68	2.76
Si	13.99	8.16
P	1.64	0.29
K	0.48	nd
Ca	1.1	nd
Fe	1.35	0.37
Ce	4.15	0.34
Pt	2.84	nd
Total	100	100

nd: no detectado.

Figura 4. Composición de la muestra de convertidor catalítico triturado antes (izquierda) y después (derecha) de la digestión ácida. Los datos de composición fueron obtenidos por EDS y las imágenes corresponden al análisis por MEB a 200 aumentos.

Los resultados del EDS muestran que los elementos mayoritarios en la composición de la piedra catalítica son oxígeno, aluminio y silicio, demostrando la presencia de aluminosilicatos como componentes de la estructura de la piedra. La imagen de MEB muestra cuerpos de forma cilíndrica con una sección transversal uniforme y una morfología filamentososa, reminiscente de la estructura de un espagueti, atribuibles a un soporte de fibra de aluminosilicatos (Krasnyi, 2023). Después de la digestión, las concentraciones de estos elementos reducen en cerca del 50% de la concentración original de O y Si y en mayor cantidad para el caso del Al. Es probable que esto ocurriera como consecuencia de haber realizado la digestión solamente con agua regia diluida y sin calentamiento de la muestra, impidiendo que hubiera una mayor destrucción de la fracción cerámica. En cambio, se removieron carbono, calcio, titanio, fósforo y platino del soporte cerámico del convertidor catalítico casi en su totalidad durante la digestión, con lo que se confirma la presencia del metal de interés en la solución de digestión a partir de la cual se realizó su electrodeposición.

El líquido recuperado de la digestión del convertidor catalítico presentó un color amarillo - verdoso y un pH=1, ambas características coincidentes con las propiedades del ácido cloroplatínico (New Jersey Department of Health and Senior Services, 1998) resultante de la digestión con agua regia (Matjie, 2005). Esta solución fue al mismo tiempo la fuente de platino y el electrolito de la celda. Durante la electrodeposición también se observó la formación sólidos rojizos en el ánodo, posiblemente correspondientes a algún óxido de hierro, así como la formación de burbujas de gas en el cátodo.

Los análisis de DRX del producto depositado sobre los ánodos de grafito no mostraron resultados reproducibles al aplicar el mismo amperaje (entre réplicas), ni consistentes al aumentar gradualmente la intensidad de corriente (entre corridas), posiblemente debido a la alta heterogeneidad de las muestras recuperadas de la superficie del electrodo.

A simple vista, los difractogramas obtenidos no permiten la identificación de picos debido a la superposición de señales. Estas señales podrían estar relacionadas con los elementos mayoritarios, causando interferencia. Con la ayuda del software QualX2 desarrollado por el Instituto Di Cristalografía CNR, en conjunto con las bases de datos POWCOD desarrolladas por la Universidad de Vilna se confirmó la presencia de los compuestos de platino: FePt (referencia 00-900-4222), Fe₃Pt (referencia 00-152-3658) y Pt₅Ti₃ (referencia 00-152-2192D) (Altomare, 2016). De estos compuestos, se omite la identificación del Pt₅Ti₃ en la figura, dado que en la composición del convertidor catalítico determinada por EDS no se reportó la presencia de titanio. Las señales correspondientes de estos compuestos se reportan en la figura 5, que recopila los difractogramas obtenidos a 1.0 y 1.5 A, dado que fueron los que muestran menos ruido de interferencia.

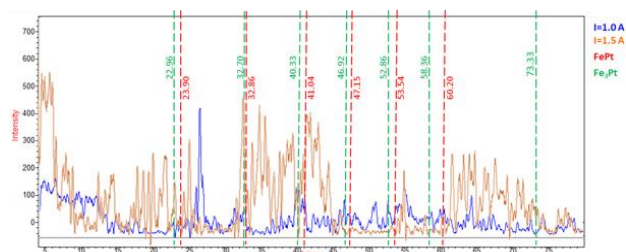


Figura 5. Difractogramas de los depósitos de platino obtenidos a 1.0 y 1.5 amperios, destacando las señales asociadas a los compuestos con platino.

También se detectó la presencia de otros compuestos que pudo deberse a reacciones indeseadas por la presencia de los elementos calcio, oxígeno, hierro, magnesio y fósforo en el lixiviado, recuperados de la fase sólida por efecto de la digestión ácida por un tiempo prolongado (Sabnis, 2004).

La resistencia eléctrica está dada por la ley de Ohm (Alexander y Sadiku, 2001):

$$R = \frac{v}{I} \quad \text{Ec. 2}$$

En donde:

R es la resistencia eléctrica medida en ohmios

v es la diferencia de potencial (voltaje) medida en voltios

I es la corriente eléctrica medida en amperios

Para el circuito diseñado, el valor de este parámetro impidió aplicar una corriente menor a 6.5 voltios, impidiendo la electrodeposición selectiva de platino.

La eficiencia global del proceso se determinó aplicando la Ec. 1 a las condiciones de operación de la celda para la recuperación de platino. Las energía-eficiencias promedio de cada corrida para esta parte de la investigación se muestran en la figura 6.

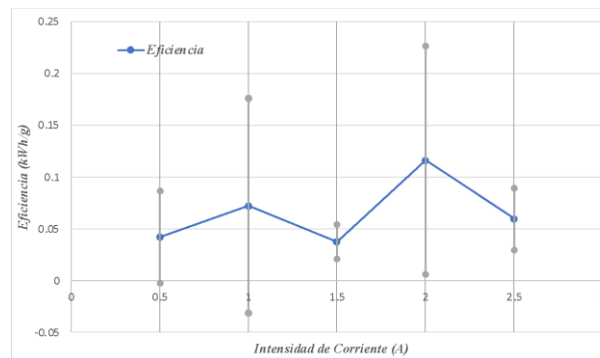


Figura 6. Valores de las eficiencias de cada uno de los experimentos para la electrodeposición del lixiviado del convertidor catalítico.

La eficiencia del proceso varió drásticamente en función de las intensidades de corriente aplicadas en cada experimento. La mejor eficiencia se observa cuando se aplicó una intensidad de corriente de 2.0 A. Sin embargo, el difractograma de esa corrida no es suficientemente claro. En cambio, el obtenido con 1.0 A resultó ser el que muestra picos más definidos y esa corrida fue la más reproducible como lo muestra el valor de su desviación estándar. Es posible que, al depositarse menos material en el ánodo, las interferencias que sobreponen las señales sean menos y permitan mayor definición.

Conclusiones

La utilización de cloruro de cobre (CuCl₂) como electrolito en la extracción de cobre a partir de núcleos de bujía resultó en la purificación efectiva del metal mediante la electrodeposición del recubrimiento circundante de níquel-cinc. La oxidación moderada que sufrió el cobre metálico expuesto, una vez que dicho recubrimiento fue retirado por completo, resultó en la polarización de la celda debido a la precipitación del CuCl formado.

Este proceso, no contemplado en el diseño del experimento, previno la pérdida de cobre durante el proceso. Los difractogramas de las muestras de estas electrodeposiciones revelaron que el uso del núcleo de bujía como ánodo fue beneficioso para la obtención de cobre purificado.

En la extracción de platino, se observó que la digestión con agua regia no fue suficientemente selectiva, por la presencia de metales distintos al platino en el convertidor catalítico, que interfirieron con la electrodeposición. Se propone realizar una lixiviación previa con ácido clorhídrico o nítrico para eliminar estos metales antes de la digestión con agua regia, y utilizar un compuesto que realice una precipitación selectiva, como el cloruro de amonio, lo cual facilitaría la electrodeposición de platino de alta pureza.

Sin embargo, estas propuestas aún deben ser probadas y, en su caso, optimizadas en el laboratorio.

En cuanto a la electrodeposición de platino, las difracciones de rayos X de las muestras no mostraron presencia de carbono en los electrodos, lo que sugiere que estos no participaron en las reacciones de la celda y son adecuados para la electrodeposición de metales del grupo del platino.

Se evaluó la eficiencia global de cada celda en términos de la masa electrodepositada por unidad de energía eléctrica consumida debido a que se observó la formación de varios compuestos inesperados, mientras ocurría la electrodeposición.

Para la celda de cobre, se determinó que la eficiencia aumentó proporcionalmente a la energía eléctrica consumida, sugiriendo la posibilidad de incrementar el potencial eléctrico y la corriente hasta alcanzar un punto de máxima eficiencia.

En el caso de la celda de platino, se encontró que la mayor eficiencia se alcanzó con una corriente eléctrica de 2 amperios, lo que podría indicar la máxima eficiencia de la celda electroquímica y una mejor electrodeposición. No obstante, este experimento debe ser optimizado para evitar la incertidumbre que generan los difractogramas de baja definición.

En general, se logró la separación efectiva del cobre contenido en desechos automotrices mediante técnicas electroquímicas en solución acuosa, obteniendo cobre metálico de alta pureza. En cuanto al platino, se sugiere considerar pasos adicionales, tales como la posible lixiviación previa con ácido clorhídrico y el uso de un agente de precipitación selectiva como el cloruro de amonio, como posibles estrategias para obtener platino de alta pureza mediante electrodeposición.

Referencias

Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2012). *Fundamentos de Circuitos Eléctricos* (6ª ed.). McGraw-Hill.

Alguacil, F. J. (1995). El refinado de los metales del grupo del platino. *Revista de Metalurgia*, 31(4), 246-255. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1995.v31.i4.957>

Altomare, A., Corriero, N., Cuocci, C., Falcicchio, A., Moliterni, A., Rizzi, R. (2015). QUALX2.0: a qualitative phase analysis software using the freely available database POW_COD. *J. Appl. Cryst.* 48, 598-603.

Alvarado Hernández L. (2016), Recuperación de Pt y Pd de convertidores catalíticos de desecho mediante sistemas lixiviantes de bajo impacto ambiental, Proyecto terminal en Maestría en Ciencias e Ingeniería Ambientales, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

Barakat, M., & Mahmoud, M. A. (2004). Recovery of platinum from spent catalyst. *Hydrometallurgy*, 72(3-4), 179-184. [doi.org/10.1016/s0304386x\(03\)00141-5](https://doi.org/10.1016/s0304386x(03)00141-5)

Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. Wiley.

Birchall, D. W. (1978). *The International Nickel Company: an historical profile*. Institute for Research in Public Policy.

Bollero, D. (2012). El drama del platino: contaminar para dejar de contaminar. Público. Consultado en: <https://www.publico.es/ciencias/drama-del-platino-contaminar-dejar.html>

Carl Roth. (2015). Ficha de datos de seguridad conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2020/878/UE [Conjunto de datos]. En *Cobre(I) cloruro ROTI@METIC 99,995 % (4N5) (Versión 3)*. [https://www.carlroth.com/medias/SDB-CN81-](https://www.carlroth.com/medias/SDB-CN81-31ESES.pdf?context=bWFzdGVyFHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzMTY3NjF8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oMDIvaGUyLzkwODE2Nzg4ODg5OTAucGRmfDcxOGY5OWZlZDdhYWQ4NWEzZmZxczJmO0GE5MzhkZTgzZjcxZmFmMjQ4ZWl2MGE5ZDhmMjQ1NTMyMDdhYmFmNTY)

[31ESES.pdf?context=bWFzdGVyFHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzMTY3NjF8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oMDIvaGUyLzkwODE2Nzg4ODg5OTAucGRmfDcxOGY5OWZlZDdhYWQ4NWEzZmZxczJmO0GE5MzhkZTgzZjcxZmFmMjQ4ZWl2MGE5ZDhmMjQ1NTMyMDdhYmFmNTY](https://www.carlroth.com/medias/SDB-CN81-31ESES.pdf?context=bWFzdGVyFHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzMTY3NjF8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oMDIvaGUyLzkwODE2Nzg4ODg5OTAucGRmfDcxOGY5OWZlZDdhYWQ4NWEzZmZxczJmO0GE5MzhkZTgzZjcxZmFmMjQ4ZWl2MGE5ZDhmMjQ1NTMyMDdhYmFmNTY)

Carl Roth. (2016). Ficha de datos de seguridad conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2020/878/UE [Conjunto de datos]. En *Cloruro de níquel (II) hexahidratado ≥97 %, extra puro (Versión 3)*. [https://www.carlroth.com/medias/SDB-7312-](https://www.carlroth.com/medias/SDB-7312-ESES.pdf?context=bWFzdGVyFHNIY3VyaXR5RF0YXNoZWV0c3wzNjE3NDI8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oMTMvaGZkLzkwNzg1NDIxMzk0MjJlucGRmfGNjZjVhNThjY2VlODAwNzljMWIxZjg4YTQ2ZjQxNTU1MWI4NWQwMjA1ZjE5ZTc1N2FiNWFlkZDRjYTdjYzZlYjY)

[ESES.pdf?context=bWFzdGVyFHNIY3VyaXR5RF0YXNoZWV0c3wzNjE3NDI8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oMTMvaGZkLzkwNzg1NDIxMzk0MjJlucGRmfGNjZjVhNThjY2VlODAwNzljMWIxZjg4YTQ2ZjQxNTU1MWI4NWQwMjA1ZjE5ZTc1N2FiNWFlkZDRjYTdjYzZlYjY](https://www.carlroth.com/medias/SDB-7312-ESES.pdf?context=bWFzdGVyFHNIY3VyaXR5RF0YXNoZWV0c3wzNjE3NDI8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oMTMvaGZkLzkwNzg1NDIxMzk0MjJlucGRmfGNjZjVhNThjY2VlODAwNzljMWIxZjg4YTQ2ZjQxNTU1MWI4NWQwMjA1ZjE5ZTc1N2FiNWFlkZDRjYTdjYzZlYjY)

Collivignarelli, M. C., Bertanza, G., Bestetti, M., Crotti, B. M., & Miino, M. C. (2019). Electrolytic Recovery of Nickel and Copper from Acid Pickling Solutions Used to Treat Metal Surfaces. *Water Air and Soil Pollution*, 230(5). <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4158-1>

Cui, J., & Forssberg, E. (2003). Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 99(3), 243-263. [https://doi.org/10.1016/s03043894\(03\)00061-x](https://doi.org/10.1016/s03043894(03)00061-x)

Del Castillo Rodríguez, F. (2016). *Lecturas de ingeniería. otras aleaciones* (Vol. 24). Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/Otras%20aleaciones_2017-1.pdf

Dong, H., Zhao, J., Chen, J., Wu, Y., & Li, B. (2015). Recovery of platinum group metals from spent catalysts: A review. *International Journal of Mineral Processing*, 145, 108–113. doi.org/10.1016/j.minpro.2015.06.009

Green Spark Plug Co. Ltd. (s. f.). (2024). Términos y variantes de bujías. <https://es.gsparkplug.com/shop/spark-plug-terms-and-variants>

Gunn, G. (2014). *Critical Metals Handbook* (1a ed.). Wiley.

Harrar, J. E., & Stephens, F. S. (1984). Recovery of platinum from concentrated sodium chloride brine by electrodeposition on vitreous carbon. <https://doi.org/10.2172/5191121>

Krasnyi, B. L., Ikonnikov, K. I., Lemeshev, D. O., Bernt, D. D., Sizova, A. S., Galganova, A. L., & Rodimov, O. I. (2023). Effect of drying method on binder migration and properties of a high-temperature filter based on aluminosilicate fibers. *Refractories and Industrial Ceramics*, 63(5), <https://doi.org/10.1007/s11148-023-00758-5>

Krishnan, B. (2023). El platino seguirá al volante en 2023, el paladio por detrás. Investing.com México. Consultado en: <https://mx.investing.com/analysis/el-platino-seguiraal-volante-en-2023-el-paladio-por-detras200462581>

Matjie, R. H., Scurrrell, M. S., & Bunt, J. (2005). The selective dissolution of alumina, cobalt, and platinum from a calcined spent catalyst using different lixiviants. *Minerals Engineering*, 18, 801-810.

Muñoz, M. (2013). El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 21(2), 248-261. doi.org/10.4067/s071833052013000200008

New Jersey Department of Health and Senior Services. (1998). Hazardous Substance Fact Sheet - Chloroplatinic Acid. En New Jersey Department of Health and Senior Services (N.o 16941-12-1). <https://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0406.pdf>

Rodríguez-Gómez M. (2017). Uso de cisplatino y derivados de platino en quimioterapia, Trabajo de grado, Universidad Complutense, Facultad de Farmacia.

Sabnis, R. W. (2004). *Handbook of Acid-Base Indicators*. CRC Press.

Yifei Z. (2015), Análisis ambiental de la producción de cobre, Tesina en Master Universitario en Ingeniería Geológica y de Minas, Universidad Politécnica de Catalunya.