

**ESTUDIO ELECTROQUÍMICO DE LA REDUCCIÓN DE CIANOCOMPLEJOS DE
MERCURIO EN ACERO INOXIDABLE Y GRAFITO EN EFLUENTES DE LA
MINERÍA AURÍFERA**

JACOBO ANDRÉS BUSTAMANTE

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

BUCARAMANGA, SANTANDER

2012

**ESTUDIO ELECTROQUÍMICO DE LA REDUCCIÓN DE CIANOCOMPLEJOS DE
MERCURIO EN ACERO INOXIDABLE Y GRAFITO EN EFLUENTES DE LA
MINERÍA AURÍFERA**

JACOBO ANDRÉS BUSTAMANTE

**Trabajo de grado presentado para optar al título de
INGENIERO METALÚRGICO**

DIRECTOR

Dr. ANGEL MANUEL MELÉNDEZ REYES

CODIRECTOR

M.Sc. JULIO ELÍAS PEDRAZA ROSAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

BUCARAMANGA, SANTANDER

2012

DEDICATORIA

Le dedico este triunfo en mi vida primero que todo a Dios, por brindarme durante todos mis años de estudios sabiduría, entendimiento y ciencia.

A mi mamá María V. Bustamante por darme su amor apoyo y por todo el sacrificio que realizó para que yo obtuviera este logro, y también por darme la herencia del estudio que será algo que nadie podrá quitarme.

A mi hermano Jorge Mario Palma Bustamante, porque además de ser mi hermano y amigo a lo largo de toda mi vida se ha comportado como un papá para mí e inculcarme desde niño el amor por la investigación y la curiosidad.

A mi abuelo Carlos Bustamante (lázaros) que le faltó un año más de vida para acompañarme con este triunfo que siempre quiso ver.

A mis amigos con los que compartí en la carrera, Neil, Albert, Harrison, Cusi, Fabio (orni), y a mis amigos que conocí por fuera de los estudios, Sergio, María Alejandra, Helga, Pinilla, Renzo, Karina porque han hecho mi estadía en Bucaramanga muy agradable con tantos buenos momentos compartidos. A María Fernanda Porras por ser una motivación más al final para obtener este logro.

AGRADECIMIENTOS

A *COLCIENCIAS* por la financiación del presente Trabajo de grado, a través del proyecto titulado "Remoción de cianuro y mercurio presentes en los efluentes de la minería del oro mediante fotoelectrólisis" (Código Colciencias: 1102-521-28875, Código UIS: 9416).

A mi director *Ángel M. Meléndez* por su constante apoyo, dedicatoria y por tantas enseñanzas que me dejó a lo largo de la realización de este proyecto de investigación.

A mi codirector *Julio E. Pedraza* por su experiencia.

Al grupo de investigación *GIMBA* por darme la oportunidad de realizar esta investigación y por facilitarme el uso de sus instalaciones de los laboratorio en la sede de Guatigurá.

A *Carolina Mendoza* y el laboratorio de microscopía por el servicio de FESEM-EDS.

A todos los *técnicos de la escuela de ingeniería metalúrgica* por su colaboración prestada a lo largo de toda la realización del proyecto.

Al *Prof. Ignacio González Martínez* de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM, México), por sus recomendaciones en el tema central de la investigación.

A los *Profesores Ignacio González y Custodio Vásquez Quintero* por su tiempo, amable atención en la revisión y discusión del escrito, y las sugerencias realizadas al mismo para mejorarlo.

A la *Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales* quienes nos ofrecieron todo su apoyo y conocimiento.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. GENERAL	17
2.2. ESPECÍFICOS	17
3. ANTECEDENTES	18
3.1. ELECTRODEPOSICIÓN	18
3.2. VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA	18
3.3. REMOCIÓN DE MERCURIO	19
4. EXPERIMENTAL	21
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	23
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
6.1. ESPECIACIÓN QUÍMICA	24
6.2. ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DE MERCURIO (II) SOBRE GRAFITO Y ACERO INOXIDABLE	26
6.2.1. VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA	26
6.2.2. Voltamperometría de corriente muestreada	31
6.3. ANÁLISIS DE LA DEPOSICIÓN DE MERCURIO POR SEM- EDS	33
6.4. REMOCIÓN SIMULTÁNEA DE CIANURO Y MERCURIO EN UNA CELDA DE DOS ELECTRODOS	34
7. CONCLUSIONES	39
8. RECOMENDACIONES	40
BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXO	45

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Potencial a circuito abierto y polarización determinados para los electrodos de grafito y acero inoxidable en contacto con una solución 0.02 M KCN + 1 mM HgCl ₂ en 0.1 M K ₂ SO ₄ .	29

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	Diagrama de distribución de especies para una solución acuosa 0.02 M KCN + 1 mM HgCl ₂ obtenido con el software HYDRA-MEDUSA.	24
Figura 2	Diagrama Eh vs pH para una solución acuosa 0.02 M KCN + 1 mM HgCl ₂ obtenido con el software HYDRA-MEDUSA.	25
Figura 3	Voltamperograma característico de la reducción de mercurio sobre un electrodo de grafito impregnado con parafina en una solución 0.02 M KCN + 1 mM HgCl ₂ en K ₂ SO ₄ 0.1 M ($v = 100 \text{ mVs}^{-1}$).	27
Figura 4	Voltamperogramas característicos de la reducción de mercurio sobre un electrodo de a) grafito y b) acero inoxidable, en una solución 0.02 M KCN + 1 mM HgCl ₂ en 0.1 M K ₂ SO ₄ ($v = 100 \text{ mVs}^{-1}$).	28
Figura 5	Porcentajes de recuperación de mercurio a distintos potenciales, obtenidos sobre un electrodo de a) grafito (pulso de oxidación 0 V vs NHE) y b) acero inoxidable (pulso de reducción 0,17 V vs NHE).	30
Figura 6	Voltamperometría de corriente muestreada para el electrodo de a) grafito ($t = 8,61 \text{ s}$) y b) acero inoxidable ($t = 4,61 \text{ s}$) en una solución 0.02 M KCN + 1 mM HgCl ₂ en 0.1 M K ₂ SO ₄ . En el recuadro se presentan las curvas de corriente muestreada desde 300 ms hasta 1500 ms.	32
Figura 7	a) Cronoamperograma y b) cronopotenciograma correspondiente al crecimiento de núcleos de mercurio sobre un electrodo de acero inoxidable obtenidos en una solución 0.02 M KCN + 1 mM HgCl ₂ en 0.1 M K ₂ SO ₄ .	33

Figura 8	Micrografías de FESEM del depósito de mercurio sobre acero inoxidable AISI 316L obtenido a) potencioestáticamente y b) galvanostáticamente.	34
Figura 9	Espectro de EDS representativo de los depósitos obtenidos sobre acero inoxidable AISI 316L.	35
Figura 10	Electrodos de acero inoxidable a) durante y b) después del experimento.	38

LISTA DE ANEXOS

		Pág.
Anexo 1	MONTAJE DE LA REDUCCION DE MERCURIO Y OXIDACION DE CIANURO EN UNA CELDA DE 2 ELECTRODOS	45

Trabajos de investigación presentados en eventos académicos.

Jacobo Andrés Bustamante, Julio Elías Pedraza Rosas, Ángel M. Meléndez. Estudio comparativo de la reducción de mercurio (II) sobre acero inoxidable y grafito. En: V seminario Colombiano de Electroquímica, Universidad de Antioquia, septiembre/2012.

Jacobo Andrés Bustamante, Julio Elías Pedraza Rosas, Ángel M. Meléndez. Estudio electroquímico de la reducción de cianocomplejos de mercurio en acero inoxidable y grafito en efluentes de la minería aurífera. Poster presentado con motivo del lanzamiento del Doctorado en Ingeniería de Materiales en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales en la sede principal de la Universidad Industrial de Santander, noviembre/2012.

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO ELECTROQUÍMICO DE LA REDUCCIÓN DE CIANOCOMPLEJOS DE MERCURIO EN ACERO INOXIDABLE Y GRAFITO EN EFLUENTES DE LA MINERÍA AURÍFERA.

AUTOR: BUSTAMANTE, Jacobo Andrés

PALABRAS CLAVE:Remediación de agua contaminada, electrodeposición metálica, técnicas electroquímicas.

DESCRIPCIÓN: Se investigó la electro reducción de los cianocomplejos de mercurio (II) a partir de una solución preparada con 0.02 M de cianuro y 1 mM de mercurio (II) sobre 0.1 M de sulfato de potasio, sobre grafito y acero inoxidable AISI 316L, por una combinación de métodos electroquímicos (potencial a circuito abierto, voltamperometría, cronoamperometría y cronopotenciometría) y análisis de EDS acoplado al FESEM. Con el objetivo de aplicar este material seleccionado por sus mejores características en una celda fotoelectroquímica, y que el presente estudio sirva de base para escalar el proceso en un reactor fotoelectroquímico, se propone una estrategia experimental para determinar el potencial, la corriente y la densidad de corriente apropiada para realizar la electrorreducción de mercurio bajo control mixto. Se discuten las ventajas y desventajas de usar acero inoxidable y grafito para realizar la remoción de mercurio y se determina la naturaleza del depósito obtenido mediante microscopía electrónica de barrido. Finalmente para completar los resultados del proyecto se lleva a cabo simultáneamente la degradación de cianuro y la remoción de mercurio en una celda electroquímica. Para realizar esto último se trabajó en conjunto en la etapa final de otro trabajo de investigación y el trabajo de grado puede consultarse en la referencia [10].

*Proyecto de Grado

**Facultad Ingenierías Físicoquímicas Escuela Ingeniería Metalúrgica Director: Angel Meléndez

Co director: Julio E. Pedraza

ABSTRACT

TITLE:ELECTROCHEMICAL STUDY OF THE REDUCTION OF CYANOCOMPLEX OF MERCURY (II) ON STAINLESS STEEL AND GRAPHITE IN GOLD MINING EFFLUENT

AUTHOR:BUSTAMANTE, Jacobo Andrés

KEY WORDS: Wastewater remediation, metal electrodeposition, electrochemical techniques.

DESCRIPTION: Mercury (II) reduction has been investigated in a prepared solution of 0.02 M of cyanide and 1 mM of mercury (II) supported in 0.1 M of potassium sulfate on stainless steel AISI 316L and ultra high purity graphite, by a combination of electrochemical methods (open circuit potential, cyclic voltammetry, sampled current voltammetry, chronoamperometry and cronopotenciometry) and EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) analysis coupled to FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) and analyzing the Pourbaix type speciation diagrams to predict if it would get mercury and in that state. In order to both use this process in a photoelectrochemical cell, and obtaining the parameters to scale up in a photoelectrochemical reactor, here in an experimental strategy is proposed for determining the potential, current and current density appropriated to performed mercury reduction under diffusional control avoiding parasit reactions. The choice of appropriated potential is fundamental to carry out the process. The advantage and disadvantage of using stainless steel and graphite to remove mercury are discussed. In addition, the nature of the deposit obtained was determined using a field emission scanning electron microscopy. Finally to complement the results of the project the cyanide degradation [10] with the mercury removing was simultaneously carried out in a two electrodes cell.

*Proyecto de Grado

**Facultad Ingenierías Físicoquímicas Escuela Ingeniería Metalúrgica Director: Angel Meléndez

Co director: Julio E. Pedraza

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia hay algunas regiones cercanas a yacimientos auríferos donde la principal actividad económica es la extracción de oro. Debido a que los habitantes en estas zonas tienen limitaciones económicas y sociales, ven a la minería del oro como una fuente de ingreso para subsistir; o en el caso de grupos al margen de la ley, como fuente de financiación para la adquisición de armas [1]. En este contexto, la extracción de oro se realiza de manera rudimentaria con el uso de mercurio y cianuro, a través de la amalgamación de oro en los concentrados y la posterior cianuración en las colas. Estas sustancias son altamente tóxicas y nocivas para la vida natural.

Los desechos acuosos de la minería artesanal del oro son vertidos a los recursos hídricos que terminan afectando no sólo al entorno cercano, sino que el impacto ambiental alcanza proporciones mayores. Por esto, a nivel mundial Colombia es el país que más contamina con mercurio, al grado de emitir aproximadamente 200 toneladas de mercurio por año [1].

Actualmente existen varias alternativas para remover ambos contaminantes por separado, pero hasta donde se sabe son escasas las propuestas para tratar simultáneamente ambos compuestos. Las primeras pueden involucrar varias etapas, producir desechos, tener un costo elevado, y en otros casos el contaminante sólo es confinado en alguna matriz trasladando el problema de un lugar a otro [2-7]. Una de las formas más promisorias para tratar al mercurio (II) y al cianuro es por electrólisis. Si al proceso electroquímico se le asiste con energía solar el proceso fotoelectroquímico es, además, atractivo desde el punto de vista energético y ambiental.

Se estudia la electrodeposición de mercurio sobre grafito y acero inoxidable AISI 316L, para ser evaluados como posibles materiales de cátodo, ya que no forman amalgama con el mercurio. Así, se evita trasladar el problema de contaminación al electrodo y de esta forma puede ser fácilmente recuperado.

Por la naturaleza y complejidad del proceso, es necesario determinar las condiciones involucradas (potencial, densidad de corriente, entre otras) para realizar la reducción electroquímica de mercurio y la oxidación fotoelectroquímica de cianuro. Así, esta investigación se enfoca en el estudio de la reducción electroquímica de mercurio (II) a partir de una solución acuosa de 0.02 M cianuro (520 ppm), la cual contiene concentraciones similares a las utilizadas en procesos de cianuración [8]. Mientras que la concentración de mercurio (II) fue establecida en 1mM (206 ppm), este valor es 91 veces más grande que el reportado en la literatura [9]; sin embargo, debido a la forma rudimentaria de la extracción de oro y que para esta se utilizan grandes cantidades de mercurio, se decidió tomar como punto de partida el valor antes mencionado. El estudio de la degradación de cianuro puede encontrarse en otro trabajo de grado [10]. Con ambas investigaciones se determinan las condiciones para tratar simultáneamente ambos contaminantes y se estudian los aspectos fundamentales de cada proceso.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

- Realizar un estudio comparativo de la reducción de mercurio (II) en cátodos de acero inoxidable 316 y grafito, para determinar el material de electrodo más adecuado para remover mercurio (II) de soluciones con cianuro y ser usado en una celda fotoelectroquímica.

2.2. ESPECÍFICOS

- Determinar por técnicas electroquímicas (potencial a circuito abierto y voltamperometría) el material del cátodo que presente la menor polarización para llevar a cabo la reducción de mercurio (II) en un medio de cianuro.
- Determinar por voltamperometría cíclica en cuál de los materiales de electrodo la deposición de mercurio ocurre en un mayor grado.
- Evaluar el material del cátodo en una celda de dos electrodos y determinar cualitativamente la remoción de mercurio.

3. ANTECEDENTES

3.1. ELECTRODEPOSICIÓN

La electrodeposición metálica involucra la reducción de un ion o complejo metálico y puede ser descrita por la siguiente reacción:



Cuatro aspectos fundamentales están involucrados en el proceso de electrorreducción [11]:

- 1) La interfase conductor electrónico/conductor iónico donde ocurre el proceso de deposición.
- 2) La cinética y el mecanismo del proceso de reducción.
- 3) Los procesos de nucleación y crecimiento cristalino.
- 4) La estructura y propiedades de los depósitos.

Las técnicas electroquímicas son útiles para estudiar los aspectos antes mencionados.

3.2. VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA

Es una técnica electroquímica eficaz en el estudio de los procesos que involucran reacciones de reducción u oxidación de diversas especies químicas. Se utiliza ampliamente en campos como electroquímica, bioquímica, hidrometalurgia y geoquímica, entre otros [12]. Esta técnica se utiliza cuando se estudia un compuesto o proceso por primera vez; con el fin de observar los diferentes procesos que ocurren en una interfase e identificar los potenciales a los cuales la especie es electroquímicamente activa. En la voltamperometría cíclica la perturbación en el electrodo de trabajo es una variación lineal de potencial en función del tiempo. El voltaje que se le aplica al electrodo de trabajo es barrido linealmente desde el potencial a circuito abierto hasta un límite predeterminado, el

cual se conoce como potencial de inversión. De los registros de corriente en función del potencial se obtiene un voltamperograma [13].

La corriente registrada en la voltamperometría tiene dos contribuciones, la corriente faradaica que está relacionada con la transformación electroquímica, mientras que la corriente capacitiva que se debe a la carga de la doble capa.

3.3. REMOCIÓN DE MERCURIO

El uso excesivo de mercurio y cianuro para la obtención de oro, por la minería artesanal y a pequeña escala, ha llevado a proponer alternativas para remover estos contaminantes en los efluentes líquidos que van a terminar en los recursos hídricos. En lo que respecta a la remoción del mercurio, ésta puede realizarse por diversos procesos químicos.

Los procesos químicos para la remoción de mercurio abarcan la utilización de compuestos orgánicos e inorgánicos. Con el agente quelante 1,3-benzenodiamidoetanotiol, la remoción de mercurio es irreversible [14]; sin embargo, durante la remoción se liberan protones, H^+ , que al reaccionar con cianuro forman ácido cianhídrico. El carbón activado es otro reactivo utilizado [15], pero para su uso deben tenerse en cuenta varios factores como el pH, el tiempo de contacto y la concentración inicial del metal. Hay otros métodos como el uso de aerogel de sílice, poliacrilamida o una combinación de éstos [16], los cuales también funcionan y tienen un buen resultado pero también necesitan condiciones muy específicas para su uso.

Por otra parte, diversos minerales como la atapulgita, bentonita, caolín, magnetita, vermiculita y zeolita, han mostrado una buena eficiencia como filtros y pueden usarse in situ, lo que es una ventaja muy importante [2]. El uso de otros minerales como la montmorillonita modificada con grupos tioles también muestra gran capacidad de remoción. El problema con el uso de minerales es el tratamiento posterior que se le debe dar a estos por contener metales pesados. La mayor remoción de mercurio (II) se obtiene con el uso de sulfuro de calcio o de sodio [3],

el cual al reaccionar con mercurio (II) forma cinabrio (HgS), un compuesto estable que es la forma mineral en la que se encuentra el mercurio en la naturaleza, y que no es perjudicial para el bioma. Por medio de flotación con aire, el cinabrio puede ser separado en la espuma de flotación [4]. Recientemente se han realizado investigaciones sobre el uso de dietilditiocarbamato de sodio [5], el cual presenta una eficiencia mayor que la de los sulfuros inorgánicos.

También han sido propuestas alternativas basadas en el intercambio iónico a través de membranas líquidas [6] y la utilización de membranas de polímeros complejos, como por ejemplo la polietilenimida [7].

Los procesos electroquímicos y redox han mostrado ser eficientes removiendo iones mercurio en los efluentes industriales; estos procesos abarcan métodos como la electrocoagulación del agua utilizando electrodos de aluminio y hierro [17], la electrólisis [18], y la fotocatalisis [19]. Aquí se seleccionó la electrodeposición para remover mercurio (II) y simultáneamente oxidar cianuro fotoelectroquímicamente.

4. EXPERIMENTAL

Electrodos de disco (diámetro 6,15 mm) fueron construidos con una barra de grafito y otra de acero inoxidable 316L inmersos en teflón. Los electrodos planos fueron elaborados con láminas de acero inoxidable 316L de las siguientes dimensiones: 2 cm de ancho y 4 cm de largo. Un electrodo de grafito impregnado con parafina fue preparado con un electrodo de grafito de grado espectroscópico en parafina fundida [8]. Con el propósito de obtener una superficie homogénea y reproducible, a los electrodos de grafito de ultra alta pureza (Alfa Aesar) se les realizó un desbaste con lijas Bühler hasta el número 400, mientras que el electrodo de grafito impregnado con parafina fue renovado en una hoja de papel blanco. En el caso de los electrodos planos y de disco de acero inoxidable, se desbastaron hasta obtener una superficie a espejo utilizando un paño de piel de durazno Buehler, y una mezcla de polvo de alúmina ($0.05 \mu\text{m}$) y agua desionizada. Al iniciar cada nuevo experimento la superficie de los electrodos fue desbastada o pulida en el caso del grafito y el acero, respectivamente.

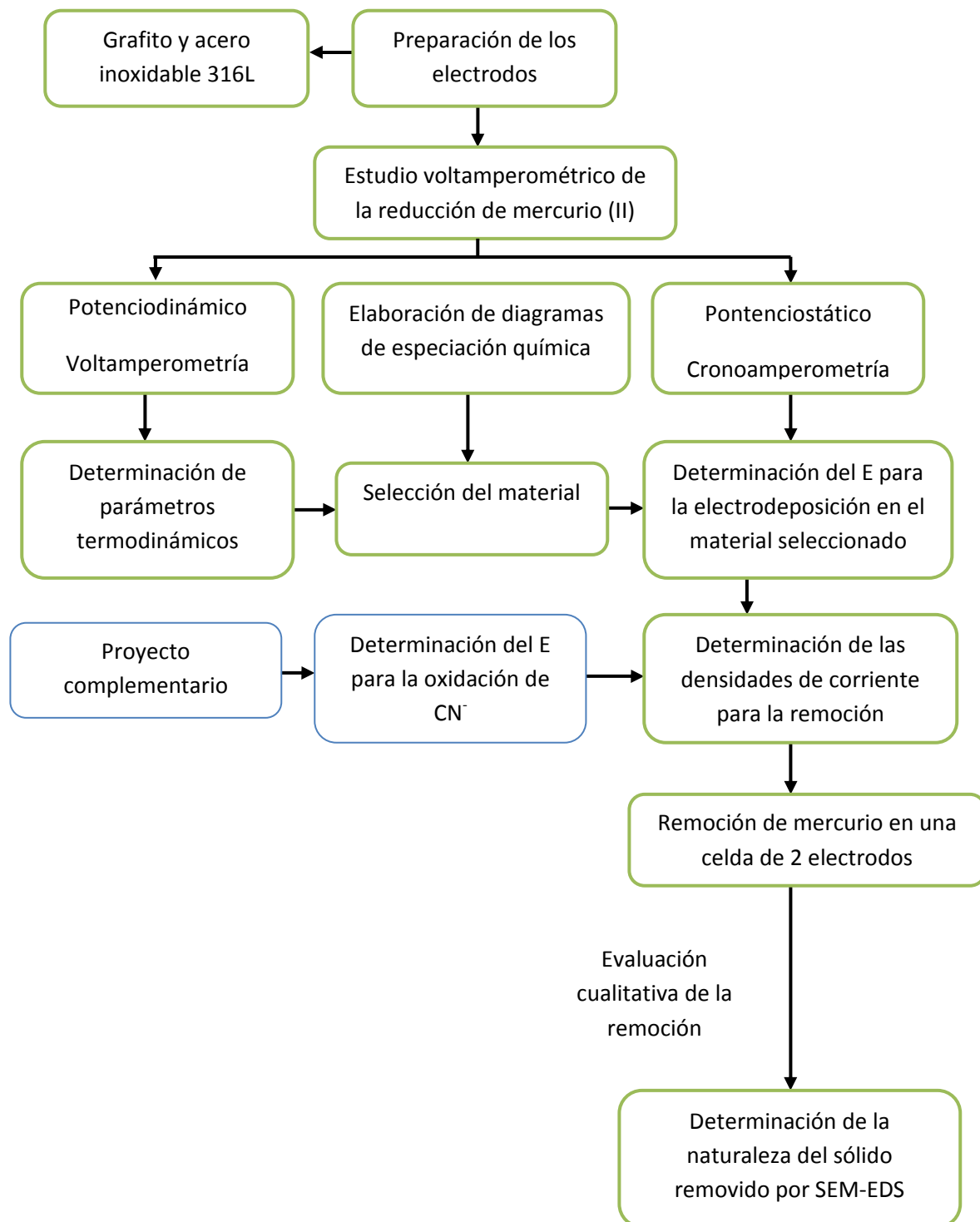
Todas las soluciones se prepararon con agua desionizada. Las soluciones empleadas fueron de 0.02M KCN (520 ppm CN^-) y 10^{-3}M HgCl_2 (206 ppm) en $0.1 \text{M K}_2\text{SO}_4$ a pH 11, el cual fue ajustado con KOH.

Las mediciones electroquímicas se realizaron en una celda convencional de tres electrodos (capacidad 75 mL) y en una celda con los compartimientos anódico y catódico separados por un puente salino 3M KCl , con un potencióstato GAMRY 600. El oxígeno presente en la solución fue removido burbujeando nitrógeno grado 4.5 (AGA FANO), agitándola constantemente durante 30 minutos antes de iniciar los experimentos y manteniendo una atmósfera de nitrógeno sobre la solución durante la medición. Se utilizó un electrodo de referencia de calomel saturado (GAMRY) colocado en un capilar Luggin. El contraelectrodo fue una barra de grafito de ultra alta pureza (Alfa Aesar). El valor del potencial a circuito abierto para los materiales estudiados se midió hasta que el potencial alcanzara un valor estable.

La remoción cianuro y mercurio se realizó en una celda de dos compartimientos separados con un puente salino de concentración 3 M KCl. Para contener el agar antes de ser gelificado, la celda cuenta con dos paredes de vidrio poroso. En el compartimiento anódico se hizo pasar aire, mientras que en el catódico nitrógeno. La oxidación se realizó, con agitación de la solución con una barra magnética y el flujo de aire, sobre un electrodo de N-TiO₂ de 1.6 cm²; mientras que la reducción de mercurio (II) sobre dos electrodos de acero inoxidable AISI 316L, cada uno con un área de 12 cm² y agitación con flujo de nitrógeno. La oxidación del cianuro libre se midió por titulación con 0.01 M de nitrato de plata.

Las micrografías del microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM) se obtuvieron a 1 kV con el equipo JSM-7600F.

5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

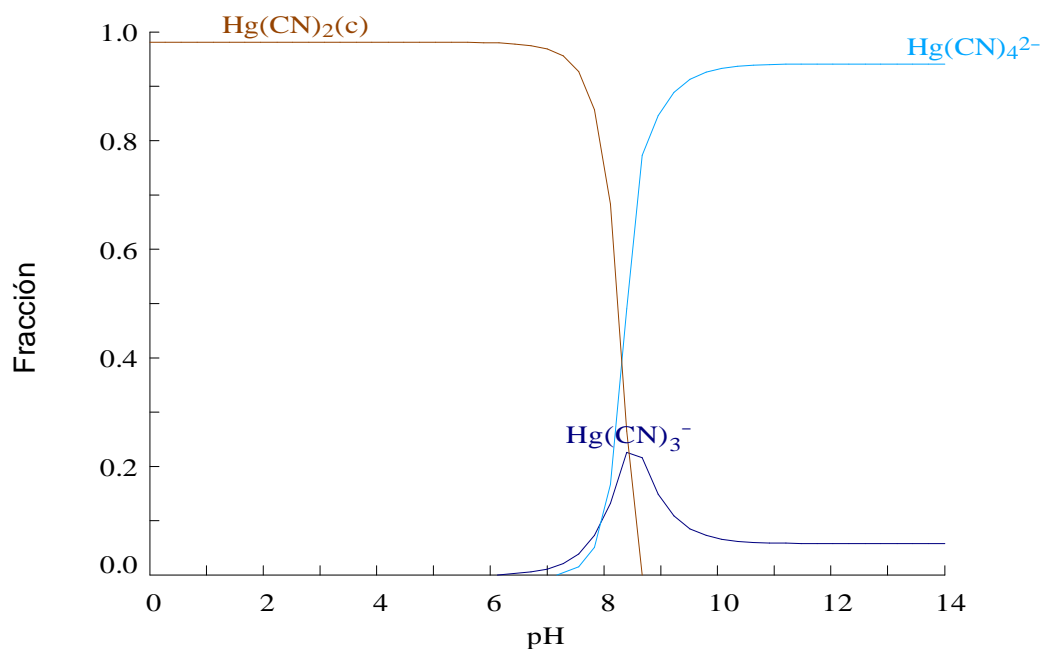


6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. ESPECIACIÓN QUÍMICA

Con el fin de establecer cuáles son las especies químicas presentes en una solución conteniendo mercurio (II) y cianuro, en la Figura 1 se presenta el diagrama de distribución de especies para una solución de 1mM HgCl_2 y 0.02 M KCN en 0.1 M K_2SO_4 . A pH 11, que es la condición establecida para evitar la hidrólisis de cianuro, la especie predominante es el tetracianocomplejo de mercurio (II), $\text{Hg}(\text{CN})_4^{2-}$, el cual coexiste con el $\text{Hg}(\text{CN})_3^-$, pero esta especie sólo se encuentra en el 6 %. De aquí en adelante se hará referencia a estas especies químicas como mercurio (II).

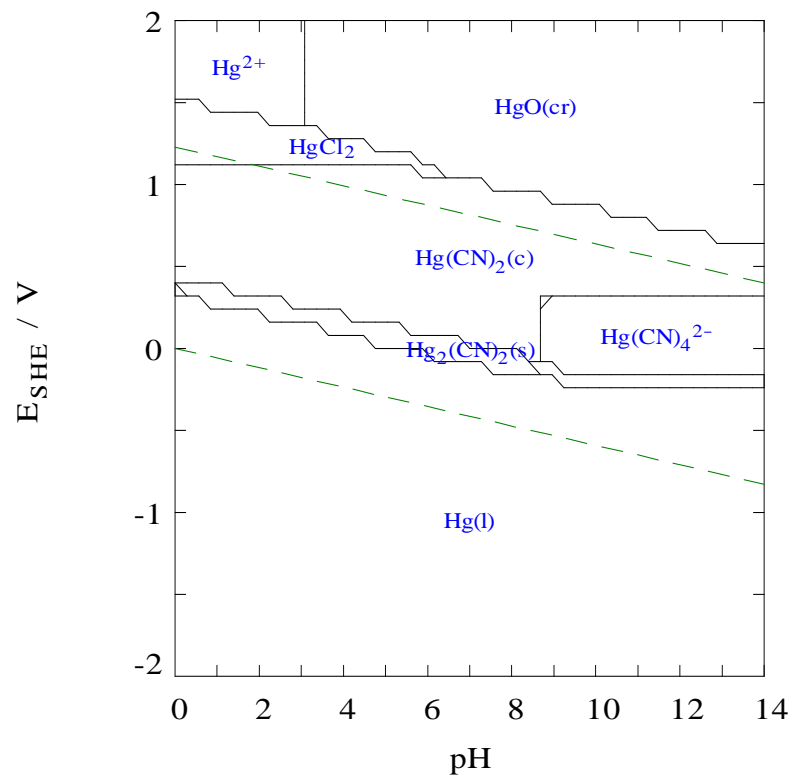
Figura1. Diagrama de distribución de especies para una solución acuosa 0.02 M KCN + 1 mM HgCl_2 obtenido con el software HYDRA-MEDUSA.



Fuente: autor.

En residuos acuosos, las altas concentraciones de cianuro con respecto a la del mercurio llevan a que la especie predominante sea el $\text{Hg}(\text{CN})_4^{2-}$ [20]. Los complejos mixtos de cianuro y cloruro, $\text{Hg}(\text{CN}^-)_2\text{Cl}^-$ y $\text{Hg}((\text{CN}^-)_2\text{Cl}_2)^{2-}$ [21], también pueden existir pero no son las especies termodinámicamente más estables [21,22]. La Figura 2 muestra que para el pH seleccionado, la reducción del cianocomplejo predominante produce mercurio metálico.

Figura. 2. Diagrama Eh vs pH para una solución acuosa 0.02 M KCN + 1 mM HgCl_2 obtenido con el software HYDRA-MEDUSA.



Fuente: autor.

6.2. ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DE MERCURIO (II) SOBRE GRAFITO Y ACERO INOXIDABLE

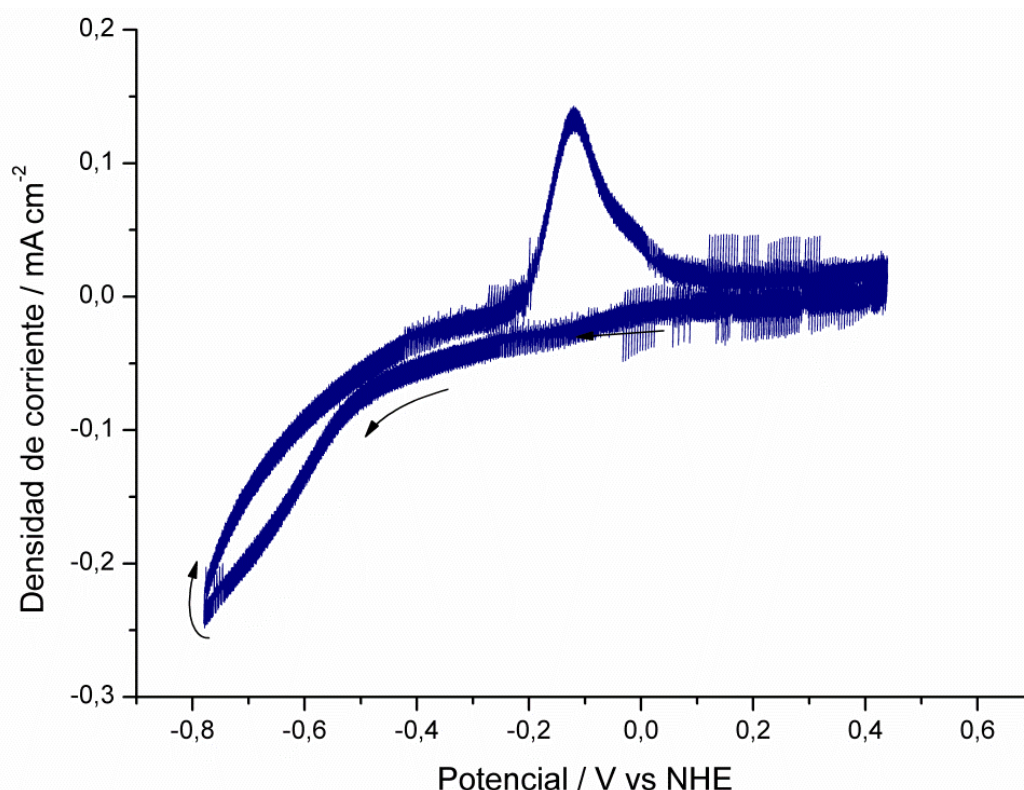
6.2.1. VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA

Con el objetivo de estudiar el comportamiento electroquímico del mercurio (II) en cianuro, se realizaron estudios de voltamperometría cíclica. Como el grafito tiene una mayor área superficial por su porosidad, primero se realizaron mediciones voltamperométricas sobre un electrodo de grafito impregnado con parafina, con el objetivo de rellenar los poros y tener una superficie lisa, para así poder comparar directamente las densidades de corriente del grafito con las del acero inoxidable. Así, el electrodo de grafito con parafina sólo fue caracterizado para alcanzar este fin.

En la Figura 3 se presenta un voltamperograma característico de la reducción y oxidación de mercurio (II). El barrido fue iniciado a partir del potencial a circuito abierto (0.217 V vs NHE), registrándose una corriente de tipo capacitiva hasta un potencial cercano a -0.49 V vs NHE. Esta señal también se presenta cuando el electrodo es caracterizado en una solución sin mercurio (II). Posterior al potencial antes mencionado, ocurre la reducción de mercurio (II). Esto es indirectamente confirmado por la aparición del pico de oxidación que se obtiene al invertir el barrido de potencial. Cabe señalar que en la zona catódica no se observa un pico asociado a la reducción de mercurio, sino un continuo aumento de la corriente en el intervalo de potencial comprendido entre -0.49 V y -0.76 V vs NHE. Posterior a este potencial la velocidad del proceso aumenta debido a la reacción de evolución de hidrógeno (HER) (Figura 3 y 6a). Así, a partir de -0.76 V vs NHE la reducción de mercurio (II) ocurre de manera simultánea con la HER

Se realizó un experimento voltamperométrico con el electrodo de acero inoxidable sin remover el oxígeno de la solución, y el pico de oxidación del mercurio no fue registrado. Esto se debe a que el oxígeno en la solución es capaz de disolver los núcleos metálicos por una reacción redox, y produciendo nuevamente complejos de cianuro.

Figura 3. Voltamperograma característico de la reducción de mercurio sobre un electrodo de grafito impregnado con parafina en una solución 0.02 M KCN + 1 mM HgCl₂ en K₂SO₄ 0.1 M ($v = 100 \text{ mVs}^{-1}$).



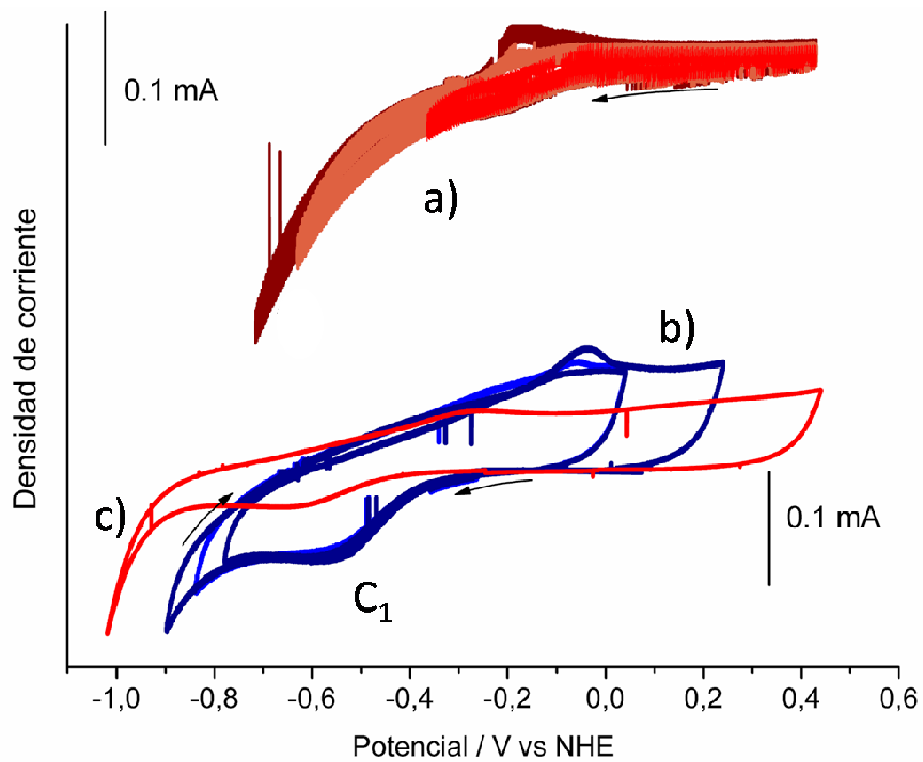
Fuente: autor.

En la Figura 4 se presentan de manera comparativa los voltamperogramas para el grafito y el acero inoxidable en 0.02 M KCN y 1 mM HgCl₂, cambiando el potencial de inversión catódico. En el caso del acero inoxidable se observa un primer pico, C₁ (Figura 4b), el cual que puede atribuirse a la reducción de la capa pasiva de óxido cromo característica de este tipo de materiales. Esto es corroborado porque en una solución sin mercurio el pico C₁ también se presenta (Figura 4c).

Debido a que el proceso de reducción de mercurio (II) se presenta como un aumento continuo de la corriente, en lugar de un pico bien definido, el potencial de inversión para el cual inicia la reducción de mercurio (II) es indirectamente

determinado por la aparición del pico de oxidación. A este potencial catódico le fue restado el OCP, para obtener la energía necesaria para realizar la reducción de mercurio (polarización). Los valores determinados son presentados en la Tabla 1, encontrando que la polarización es similar para ambos materiales. Sin embargo, la reducción del mercurio ocurre a un menor potencial en el grafito (-0,45 V vs NHE) que en el acero inoxidable (-0,80 V vs NHE).

Figura 4. Voltamperogramas característicos de la reducción de mercurio sobre un electrodo de a) grafito y b) acero inoxidable, en una solución 0.02 M KCN + 1 mM HgCl₂ en 0.1 M K₂SO₄ ($v = 100 \text{ mVs}^{-1}$).



Fuente: autor.

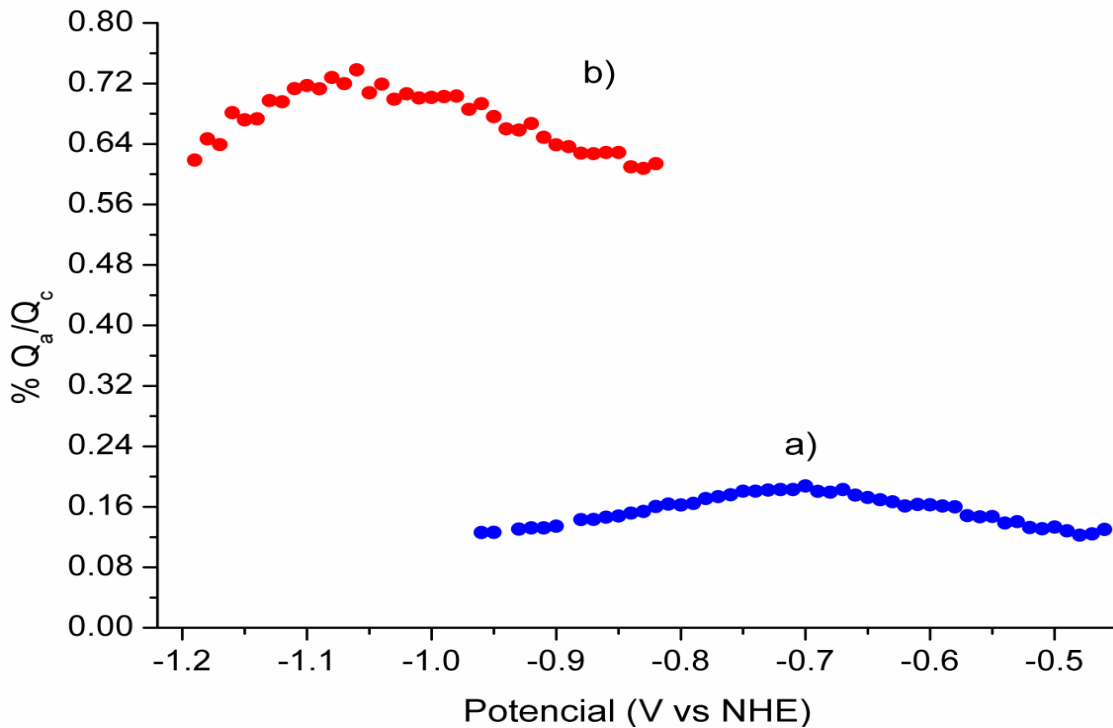
Tabla 1. Potencial a circuito abierto y polarización determinados para los electrodos de grafito y acero inoxidable en contacto con una solución 0.02 M KCN + 1 mM HgCl₂ en 0.1 M K₂SO₄.

Electrodo	OCP V vs NHE	E_{aplicado} – OCP V vs NHE
Grafito	0.290	0.641
Acero inoxidable 316L	-0.142	0.677

Es importante señalar que conforme el barrido de inversión es más negativo el pico de oxidación aumenta. Sin embargo, al seguir aumentando el potencial de inversión para estos materiales el pico de oxidación no sigue aumentando. Esto puede atribuirse a dos razones principalmente, por un lado el mercurio puede depositarse en los poros del grafito lo que dificulta su oxidación o, por el otro, la poca adherencia del mercurio a ambos sustratos puede ocasionar su desprendimiento. Con el objetivo de tener una medición cuantitativa de esto se realizaron experimentos de cronoamperometría de doble pulso.

En las cronoamperometrías se impuso un primer pulso de reducción durante un tiempo determinado, y luego se aplicó un pulso de oxidación de 0 V vs NHE para el grafito y 0,17 V vs NHE para el acero inoxidable, durante el mismo tiempo que duró el pulso de reducción. De acuerdo al primer principio de Faraday de la electrólisis [13], la carga es directamente proporcional a la cantidad del compuesto que reacciona, por lo que una manera de determinar qué proporción del mercurio (II) reducido es posteriormente oxidado, sobre cada material de electrodo, es a través del cociente entre la carga anódica, Q_a, y catódica, Q_c, relación que se conoce como la recuperación. La carga se obtiene integrando el área bajo la curva de cada cronoamperograma. Consecuentemente, una manera de saber qué tan adherente es un depósito metálico con el potencial catódico aplicado es, a través de gráficos como los de la Figura 5 [23].

Figura 5. Porcentajes de recuperación de mercurio a distintos potenciales, obtenidos sobre un electrodo de a) grafito (pulso de oxidación 0 V vs NHE) y b) acero inoxidable (pulso de reducción 0,17 V vs NHE).



Fuente: autor.

En el caso ideal, la recuperación de mercurio el cociente Q_a/Q_c debe ser cercano al 100 %; sin embargo, para el grafito este valor es cercano al 15 % (Figura 5a). Esto puede ser atribuido, ya sea a una pobre adherencia del mercurio metálico y/o a que el mercurio depositado penetre al interior del electrodo, evitando su posterior oxidación. En el caso del acero inoxidable (Figura 5b), la recuperación es mucho mayor que en el grafito ($61\% < Q_a/Q_c < 74\%$), por lo que la adherencia del depósito es mucho mayor. Ya que se quiere separar el mercurio líquido del electrodo (ver sección 6.1), entonces el acero se presenta como la mejor opción para remover mercurio.

Cuando se realiza la voltamperometría, la velocidad a la que ocurre el proceso es diferente a la cual ocurre la perturbación, por ello se realizaron diferentes curvas

corriente vs potencial a partir de cronoamperogramas, para eliminar la influencia de la velocidad de perturbación y que la medición sólo dependa de la variable energética.

6.2.2. Voltamperometría de corriente muestreada

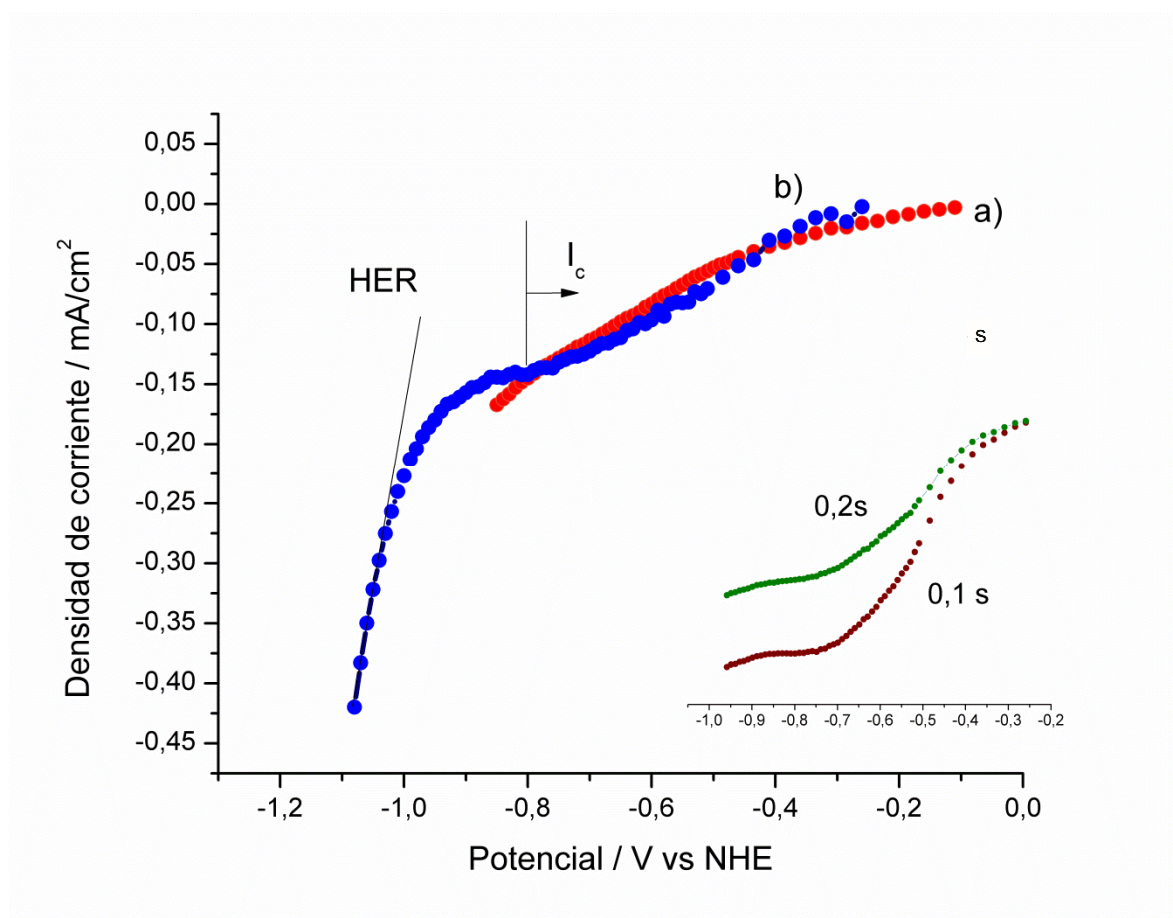
La voltamperometría de corriente muestreada es un método que permite comparar experimentos para los cuales la capa de difusión es constante, siendo equiparable a la voltamperometría de electrodo de disco rotatorio (RDE) en estado estacionario [24]. Este método parte de la realización de experimentos de cronoamperometría en un intervalo amplio de potencial, para los cuales se muestrea la corriente correspondiente a cada pulso de potencial a un tiempo fijo. En la figura 6 se presenta la voltamperometría de corriente muestreada para el grafito y el acero inoxidable.

Para ambos materiales hay una zona donde no ocurre la reducción de mercurio (II), la cual fue determinada por voltamperometría cíclica a distintos potenciales de inversión. Estos potenciales son menores a -0.8 V vs NHE en el caso del acero inoxidable y que -0.45 V vs NHE en el caso del grafito. Posteriormente, la corriente adquiere una pendiente pronunciada, que aumenta continuamente y que involucra la reducción de mercurio y posteriormente, con un nuevo cambio de pendiente la evolución de hidrógeno.

Como el acero inoxidable se presenta por los estudios anteriores como el mejor material de electrodo para la remoción de mercurio, se estableció el potencial adecuado para realizar la electrodeposición. Considerando que con el tiempo de electrólisis la concentración de mercurio (II) disminuye, y por tanto el potencial de electrodo se desplaza hacia potenciales más negativos, entonces se eligió un potencial de -0.90 V vs NHE. De acuerdo a lo mostrado en la Figura 6, es recomendable que el potencial de electrodo no exceda -1.0 V vs NHE, ya que a potenciales mayores la evolución del medio es cada vez más importante. Sin

embargo, estos valores pueden modificarse alrededor de los potenciales antes mencionados dependiendo de la concentración inicial de mercurio.

Figura 6. Voltamperometría de corriente muestreada para el electrodo de a) grafito ($t = 8,61$ s) y b) acero inoxidable ($t = 4,61$ s) en una solución 0.02 M KCN + 1 mM HgCl_2 en 0.1 M K_2SO_4 . En el recuadro se presentan las curvas de corriente muestreada desde 200 ms hasta 100 ms.



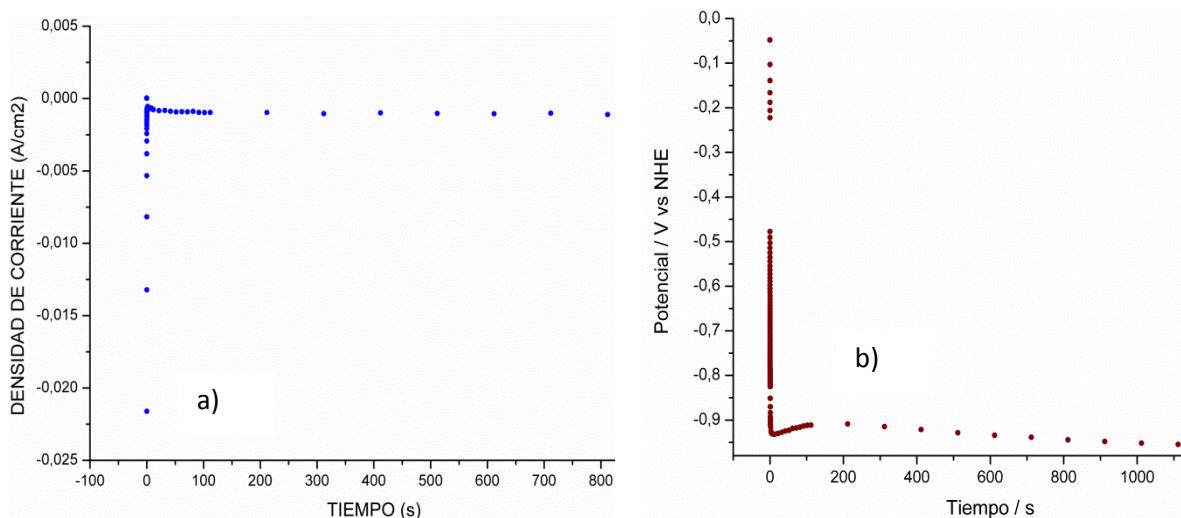
Fuente: autor.

Muestreando la corriente a tiempos más cortos ha sido posible observar el paso de cobre (II) a cobre (I) [25]. En el recuadro de la Figura 6 se presentan las curvas corriente vs potencial obtenidas a tiempos cortos; sin embargo, no es posible observar el paso de mercurio (II) a mercurio (I).

6.3. ANÁLISIS DE LA DEPOSICIÓN DE MERCURIO POR SEM- EDS

Con base en el diagrama Eh vs pH (Figura 2), la reducción de mercurio (II) produce mercurio metálico. Sin embargo, hasta el momento no se tiene evidencia experimental de ello, así con el fin de determinar la naturaleza química del depósito formado sobre el electrodo, se realizó un análisis por SEM-EDS. Para esto se realizaron dos tipos de crecimiento, uno potencioestático imponiendo un pulso de potencial de $-0,9\text{ V}$ vs NHE (Figura 7a) y otro galvanostático imponiendo una corriente de $-1,045\ \mu\text{A}$ (Figura 7b).

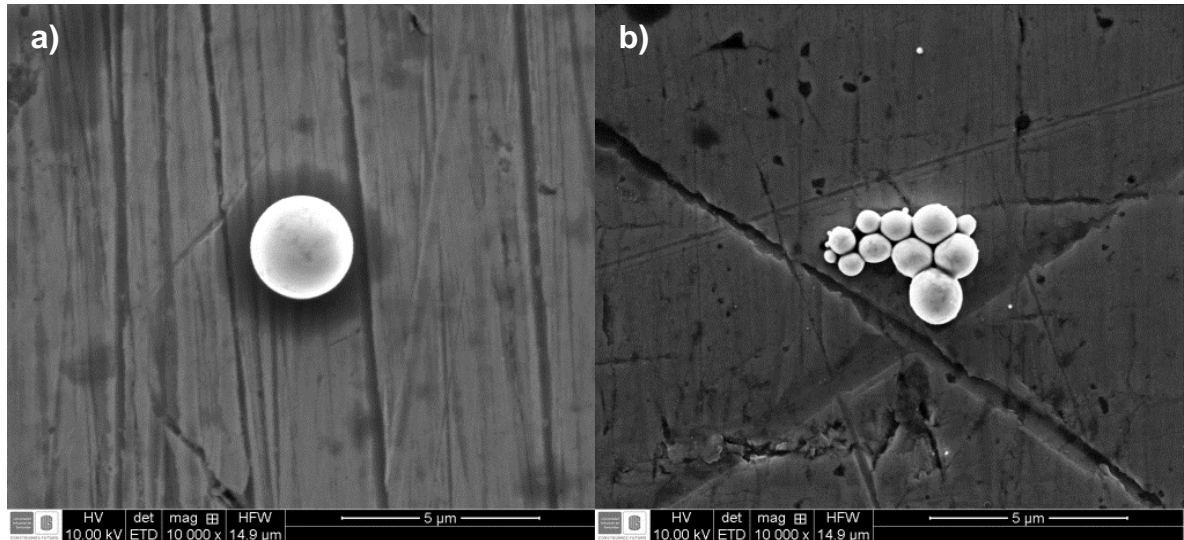
Figura 7.a) Cronoamperograma y b) cronopotenciograma correspondiente al crecimiento de núcleos de mercurio sobre un electrodo de acero inoxidable obtenidos en una solución $0.02\text{ M KCN} + 1\text{ mM HgCl}_2$ en $0.1\text{ M K}_2\text{SO}_4$.



Fuente: autor.

El crecimiento potencioestático genera núcleos aislados y de forma esférica (Figura 8a), de tamaños más grandes comparados con los obtenidos galvanostáticamente, mientras que en el crecimiento galvanostático no se tienen depósitos completamente esférico y estos se aglomeran unos con otros (Figura 8b).

Figura 8. Micrográficas de FESEM del depósito de mercurio sobre acero inoxidable AISI 316L obtenido a) potencioestáticamente (pulso de potencial impuesto -0.9 V vs NHE) y b) galvanostáticamente (corriente impuesta $-1.045 \cdot 10^{-3}\text{ mA}$).

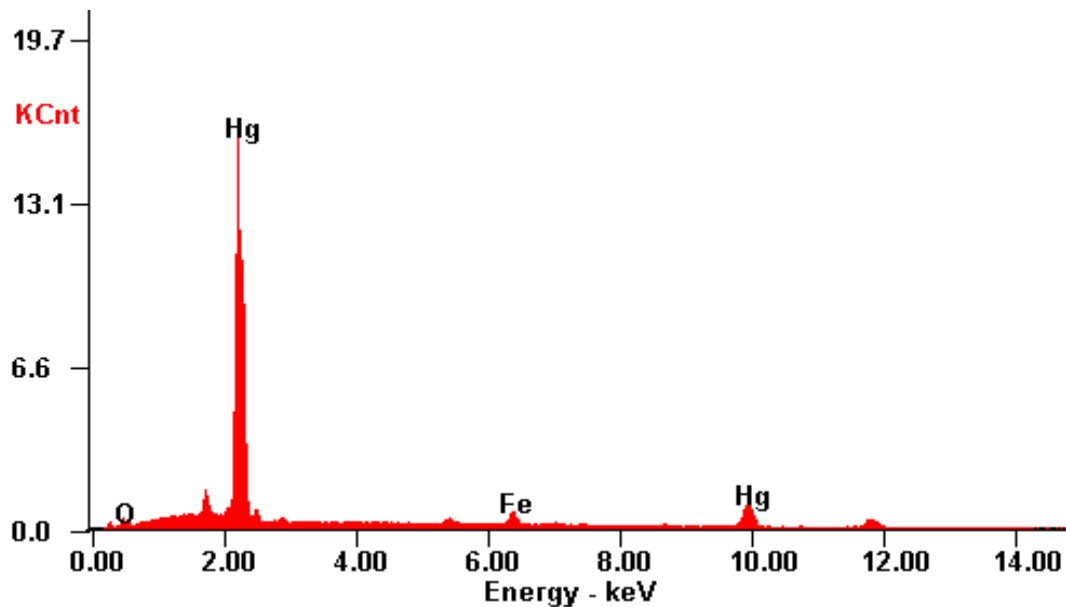


En la Figura 9 se presenta el espectro representativo de EDS de los análisis puntuales realizados a los núcleos depositados sobre el acero inoxidable. El análisis muestra que los núcleos están formados de mercurio metálico, lo que corrobora los resultados obtenidos por el diagrama Eh vs pH (Figura 2) y abre la posibilidad de recuperar al mercurio.

6.4. REMOCIÓN SIMULTÁNEA DE CIANURO Y MERCURIO EN UNA CELDA DE DOS ELECTRODOS

Debido a que el potencial seleccionado para la oxidación de cianuro se encuentra en una condición de control mixto, se realizó una medición potencioestática para la oxidación de cianuro en -0.9 V vs NHE , con la mayor agitación posible utilizando una barra de agitación en la solución. Así, se obtuvo que el proceso alcanza una densidad de corriente de -0.372 mA cm^{-2} .

Figura 9. Espectro de EDS representativo de los depósitos obtenidos sobre acero inoxidable AISI 316L.



Fuente: autor.

Generalmente las celdas electroquímicas a nivel industrial sólo utilizan uno de los electrodos para obtener un producto de valor agregado, por ejemplo, en la electrosíntesis, la electrorecuperación de zinc, aluminio, los recubrimientos metálicos por electrodeposición, entre otros. Por lo tanto, el control del potencial en el electrodo opuesto, ya sea del cátodo o el ánodo, no es necesario controlarlo estrictamente en un valor determinado (aunque esto es lo deseable, como en el caso particular de la electrorecuperación de zinc). Sin embargo, el principal reto que se tiene al emplear ambos electrodos, en nuestro caso para remover simultáneamente dos contaminantes, uno de ellos en el ánodo y otro en el cátodo, es que debido a que se trata de reacciones distintas el potencial para llevar a cabo tanto la reacción anódica como catódica es diferente.

En diversos trabajos que anteceden a éste [26-28], se ha impuesto una diferencia de potencial cercana a 2V para realizar la simultánea oxidación en un ánodo y la

reducción en un cátodo de especies químicas distintas; sin embargo, esta aproximación presenta dos grandes problemas para realizar los procesos electroquímicos. En primer lugar, en estos trabajos no se determinó el potencial adecuado para realizar la oxidación y/o reducción de las especies químicas y por tanto, aunque empíricamente se haya encontrado una condición experimental para realizar uno de los dos procesos electroquímicos, como el proceso contrario (reducción u oxidación) no se controla, el proceso global debe ser ineficiente. En segundo lugar, no se midió el potencial en el ánodo y el cátodo durante el proceso electroquímico, y como con el paso del tiempo el potencial debe cambiar con el cambio de la composición de la solución, entonces el tiempo de duración de la fotoelectrólisis y la electrólisis no se conoce y por tanto, ¡la eficiencia de los procesos disminuyen aun más!

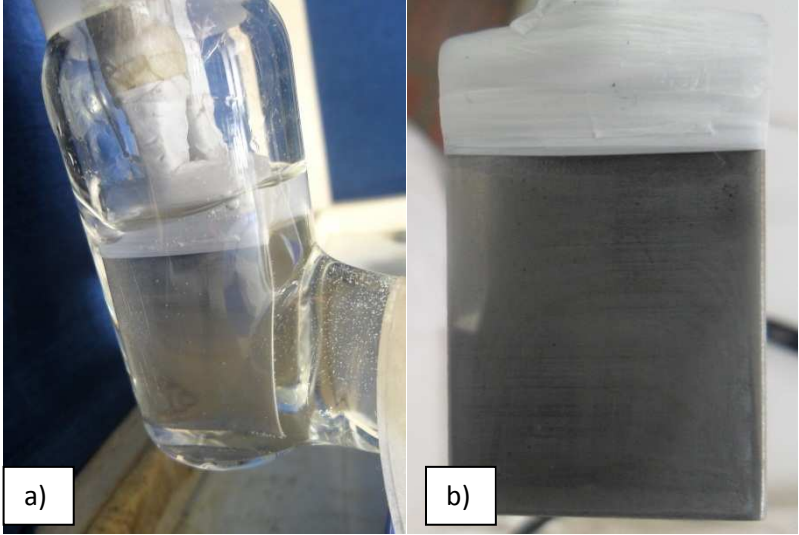
Con el propósito de alcanzar las diferencias de potencial adecuadas (determinadas aquí y en la referencia [10]), para llevar a cabo los procesos fotoelectroquímico y electroquímico en una celda de dos electrodos, se impuso una corriente fija. Así, la estrategia que se tuvo para solucionar el reto que se surge de poder alcanzar los potenciales adecuados, 1.39 V vs NHE en el caso de la fotoelectrooxidación de cianuro y -0.9 V vs NHE para la electrorreducción de mercurio (II), fue modificar las áreas de cada electrodo para alcanzar las densidades de corriente adecuadas asociadas a los potenciales antes mencionados.

Debido a que la presencia de oxígeno aumenta la degradación de cianuro y la ausencia de oxígeno evita la redisolución del mercurio metálico, la descontaminación de estos compuestos se realizó en una celda con compartimientos separados por un puente salino, haciendo pasar aire en el compartimiento anódico y nitrógeno en el catódico. Como la geometría, configuración y dimensiones del reactor electroquímico con que se contaban (Anexo), para realizar la descontaminación de las soluciones, son diferentes a las de la celda utilizada en los estudios previos, se realizó una medición

potenciostática imponiendo un pulso de potencial de 1.39 V vs NHE, para realizar la oxidación de cianuro sobre un electrodo de N-TiO₂ (área: 1.6 cm²), con la mayor agitación posible utilizando una barra de agitación pequeña en la solución. Así, se obtuvo que el proceso de oxidación alcanza una densidad de corriente de 5.57 mA cm⁻² (debido a la inferior condición hidrodinámica), suministrando una corriente de 8.91 mA. Esta magnitud de corriente fue seleccionada para llevar a cabo la remoción simultánea. Procediendo de manera similar para llevar a cabo la reducción de mercurio, el área catódica fue establecida en 24 cm². De esta manera el área geométrica del cátodo es 15 veces más grande que el del N-TiO₂.

La fotoelectrooxidación de cianuro en el tiempo es alcanzada en 150 minutos [10], en el caso del mercurio (II) no fue posible determinar el grado de remoción; sin embargo, se identificó la naturaleza del depósito de mercurio. En la Figura 10a se presenta el aspecto del electrodo de acero inoxidable durante la electrólisis y al finalizar la remoción (Figura 10b). Como se puede observar en la Figura 10b, el electrodo adquiere una coloración negruzca y opaca, la cual puede ser retirada fácilmente de manera mecánica y esta corresponde al mercurio metálico depositado.

Figura 10. Electrodo de acero inoxidable a) durante y b) después del experimento.



Fuente: autor.

7. CONCLUSIONES

El material más adecuado para realizar la remoción de mercurio fue el acero inoxidable 316L, ya que aproximadamente el 75% del mercurio puede ser recuperado de su superficie.

Para la concentración de mercurio (II) estudiada es necesario remover el oxígeno presente en la solución, para evitar la disolución del mercurio.

El control del intervalo de potencial para reducir al mercurio es primordial para evitar la reacción parásita de evolución de hidrógeno.

8. RECOMENDACIONES

- Realizar mediciones de cianuro, mercurio (II) y otros aniones metálicos en vertidos de distintas zonas de extracción de oro por la vía artesanal, para poder preparar en el laboratorio soluciones contaminadas representativas de esta actividad.
- Estudiar soluciones con diferentes concentraciones de mercurio y cianuro para establecer las condiciones de operación en un reactor electroquímico.
- Estudiar el efecto que tienen otras especies iónicas presentes en vertidos mineros, por ejemplo, Zn (II), Fe (II), Fe(III) y Cu(II), sobre la reducción de mercurio (II).
- Utilizar los resultados obtenidos en esta investigación para escalar el tamaño de la celda y determinar la viabilidad de esta alternativa de remediación usando la energía solar.
- Determinar cuantitativamente la reducción de mercurio en una celda de 2 electrodos.
- Con el fin de imponer y medir la corriente y los potenciales de oxidación y reducción en el ánodo y cátodo, respectivamente, se sugiere utilizar una fuente de poder *ad hoc* y un multímetro de alta impedancia con un electrodo de referencia, debido a que al aumentar de tamaño el reactor electroquímico, la corriente impuesta será más grande y la medición debe perturbar lo menos posible al sistema durante la operación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Siegel, "Threat of mercury poisoning rises with gold mining boom" [en línea]. En: Yale environment 360 (enero 2011, New Haven), Yale School of Forestry & Environmental Studies. <http://e360.yale.edu/feature/threat_of_mercury_poisoning_rises_with_gold_mining_boom/2354/> [Consulta: noviembre / 2011].
- [2] R. Melamed, A. Benvindo da Luz, Efficiency of industrial mineral ion the removal of mercury species from liquid effluents. Science of the Total Environment 368 (2006) 403-406.
- [3] M. Misra, J. Lorengo, U.S Patent, October 1996.
- [4] F. Tessele, M. Mirsa and J. Rubio, Removal of Hg, As and Se ions from gold cyanide leach solutions by dissolved air flotation. Minerals Engineering 11 (1998) 535-543.
- [5] J.A. Lorengo, The removal of mercury from cyanide leaches solutions using dithiocarbamates. Tesis de maestría, Universidad de Nevada, Estados Unidos, 1996.
- [6] K. A. Larson, J.M Wiencek, Mercury removal from aqueous streams utilizing microemulsion liquid membranes. Environmental Progress 13 (1994) 253-262.
- [7] H. Bessbousse, T. Rhlalou, J.F. Verchere, L. Lebrun, Sorption and filtration of Hg(II) ions from aqueous solutions with a membrane containing poly(ethylenimine) as complexing polymer. Journal of Membrane Science 325 (2008) 997–1006.

- [8] A.M. Meléndez, R. Arroyo, I. González, On the reactivity of sulfosalts in cyanide aqueous media: structural, bonding and electronic aspects. *ChemPhysChem*, 11 (2010) 2879–2886.
- [9] W. Scott Rader, L. Solujic, E.B. Milosavljevic, J.L. Hendrix, J.H. Nelson, Photocatalytic detoxification of cyanide and metal cyano-species from precious-metal mill effluents, *Environmental pollution*, 90, (1995). 331-334, 1995.
- [10] L.F. Ardila Alvarado, S.N. Fuentes Torres, Estudio electroquímico de la degradación de cianuro con luz visible utilizando películas de óxido de titanio dopado con nitrógeno, N-TiO₂. Trabajo de pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [11] M. Paunovic, M. Schlesinger, Fundamentals of electrochemical deposition. WileyInterscience. 2a ed. E.U.A., 2006.
- [12] M. Escamilla Hernández, El efecto del medio electrolítico en la electrodeposición de plata sobre carbón vítreo en una mezcla de disolventes, NH₃/H₂O. Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica de Pachuca, México, 2009.
- [13] C.M.A. Brett, A.M. O. Brett, Electrochemistry: principles, methods and applications. Oxford University, Gran Bretaña, 1993.
- [14] M.M. Matlock, B.S. Howerton, D.A. Atwood, Irreversible precipitation of mercury and lead. *Journal of Hazardous Materials B84* (2001) 73-82.
- [15] M. MadhavaRao, D.H.K. Kumar Reddy, P. Venkateswarlu, K. Sessaiah, Removal of mercury from aqueous solutions using activated carbon prepared from agricultural by-product/waste. *Journal of Environmental Management* 90 (2009) 634-643.

- [16] H. Ramadan, A Ghanem, H. El-Rassy, Mercury removal from aqueous solutions using silica, polycrylamide and hybrid silica-polycrylamide aerogels. *Chemical Engineering Journal* 159 (2010) 107-115.
- [17] C. P Nanseu-Njiki, S. R. Tchamango, P. C. Ngom, A. Darchen, E. Ngameni, Mercury (II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials* 168 (2009) 1430-1436.
- [18] J. Barron-Zambrano, S. Laborie, PhViers, M. Rakib, G. Durand, Mercury removal and recovery from aqueous solutions by coupled complexation-ultrafiltration and electrolysis. *Journal of Membrane Science* 229 (2004) 179-186.
- [19] M. I. Litter, Heterogeneous photocatalysis: transition metal ions in photocatalytic systems. *Environmental* 23 (1999) 89–114.
- [20] W.S. Rader, L. Solujic, J.L. Hendrix, Photochemistry of aqueous dicyanomercury (II) and potassium tetracyanomercurate (II). *Journal of Solar Energy Engineering* 116 (1994) 125-129.
- [21] D. A. Dzombak, R. S. Ghosh, G. M. Wong-Chong, Cyanide in water and soil: chemistry, risk, and management. Taylor & Francis, E.U.A. 2006.
- [22]. A.G. Sharpe. The chemistry of cyano complexes of the transition metals, Academic Press, Londres, 1976, 291-296.
- [23] J. Vázquez-Arenas, G. Vázquez, A.M. Meléndez, I. González, The effect of the $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ step on copper electrocrystallization in acid noncomplexing electrolytes. *Journal of Electrochemical Society* 154 (2009) 473-481.
- [24] N. Leventis, X. Gao, In the presence of very fast comproportionation, sampled current voltammetry and rotating disk electrode voltammetry yield equal two versus

one-electron limiting current ratios. Reconciliation through analysis of concentration profiles. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 500 (2001) 78–94.

[25] C. Nila, I. González, The role of pH and Cu(II) concentration in the electrodeposition of Cu(II) in NH_4Cl solutions. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 401 (1996) 171-182.

[26] L.C. Jacome Contreras, Y.P. Cárdenas, Evaluación e implementación de un sistema catódico en una celda fotoelectroquímica para la producción de hidrógeno a partir de aguas contaminadas con cianuro. Trabajo de pregrado, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2008.

[27] J.C. Osma Afanador y A.G. Tobo Nino, Evaluación del proceso fotoelectrolítico de remoción de Hg(II) en soluciones cianuradas utilizando como fotoánodo TiO_2 soportado en acero inoxidable AISI.SAE 304. Trabajo de pregrado, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010.

[28] E.L. Castellanos Leal, Obtención de fotoánodos de N- TiO_2 con actividad fotocatalítica con luz visible para su uso en la reducción fotoelectrocatalítica de mercurio. Trabajo de pregrado, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2012.

ANEXO

FIGURA I. CELDA DE DOS ELECTRODOS DE COMPARTIMIENTOS SEPARADOS UTILIZADA PARA LA REDUCCIÓN DE MERCURIO Y OXIDACIÓN DE CIANURO.

