

ESTUDIO DE LA REACCIÓN DE EVOLUCIÓN DE HIDRÓGENO SOBRE  
ELECTRODOS DE COBRE RECUBIERTOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA  
RECUPERACIÓN DE BATERÍAS RECARGABLES GASTADAS

ANDRÉS FELIPE MONSALVE NIÑO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA

2020

ESTUDIO DE LA REACCIÓN DE EVOLUCIÓN DE HIDRÓGENO SOBRE  
ELECTRODOS DE COBRE RECUBIERTOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA  
RECUPERACIÓN DE BATERÍAS RECARGABLES GASTADAS

ANDRÉS FELIPE MONSALVE NIÑO

TRABAJO DE GRADO (MODALIDAD, PROYECTO DE INVESTIGACIÓN) PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

DIRECTOR

SERGIO ISMAEL BLANCO VASQUEZ  
PhD. Corrosión.

CODIRECTOR

PEDRO LUIS DELVASTO ANGARITA  
PhD. Materiales.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA

2020

## DEDICATORIA

A Dios por la salud, la protección ante cualquier adversidad y las bendiciones diarias para realizar cada uno de mis proyectos de vida.

A mis padres Eddinson Armando Monsalve Cristancho y Monica Alexandra Niño Rodriguez, a mis hermanos, Juan David Monsalve Niño y Silvia Fernanda Monsalve Ortiz quienes han sido mi inspiración, mi motivo para seguir adelante y han permitido que alcance cada uno de mis propósitos. Con ellos puedo encontrar amor, tranquilidad y apoyo.

A mis amigos y hermanos Carlos Valencia, Fernando Monsalve y Joice García quienes me brindaron su confianza, su apoyo, y su motivación cada vez que fue necesario.

A todas aquellas personas que me han brindado un espacio en sus vidas, que han contribuido en mi proceso de formación tanto personal como profesionalmente. Dándome su apoyo y enseñanzas con las cuales he podido sobrellevar cada dificultad de la vida

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco inmensamente a Dios por ser mi compañero ante cualquier adversidad, quien me ha dado la oportunidad de conocer grandes personas que han contribuido de cierta manera en la realización de este proyecto de vida.

Igualmente, a los profesores Sergio Ismael Blanco Vásquez y Pedro Luis Delvasto Angarita quienes me brindaron su confianza, tiempo y orientación para realizar un trabajo de calidad y obtener buenos resultados.

Agradezco al Laboratorio de Hidrometalurgia de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS, a los técnicos Ambrosio Carrillo y Javier Gaitán por su apoyo y orientación en la preparación de las soluciones de lixiviación.

Al Grupo de Investigación en Bioquímica y Microbiología (GIBIM) del cual hago parte y que ha sido de gran apoyo en la realización de mi proyecto de grado.

Al laboratorio de microscopía de la Universidad Industrial de Santander (UIS) sede Guatiguará por la prestación de sus servicios y al Ingeniero Carlos Villarreal por su ayuda.

A mis amigos Jose David Barajas, Yonatha Andrés Sanchez, Hector Andrés Rueda, y Andrés Augusto Angarita en los cuales he encontrado una gran amistad y apoyo en mi vida universitaria.

A mis jefes Edgar Trujillo, Ana Maria Iguarán y Edgar Lozano por su apoyo, comprensión y colaboración en cada momento.

Finalmente doy gracias a mis amigos y personas cercanas que han compartido conmigo durante estos años de formación personal y profesional, y con los que he vivido momentos gratos.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	15
1. OBJETIVOS.....	16
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	16
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	16
2. MARCO REFERENCIAL Y ANTECEDENTES.....	17
2.1. MARCO REFERENCIAL.....	17
2.1.1. Baterías de níquel cadmio.....	17
2.1.2. Baterías de níquel metal hidruro.....	17
2.1.3. Celdas electrolíticas.....	17
2.2. ANTECEDENTES.....	18
2.2.1. Producción de hidrógeno.....	18
2.2.2. Electrodo de cadmio y aleación.....	19
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	20
3.1. RECOLECCIÓN Y DESENSAMBLAJE DE BATERÍAS .....	20
3.2. PROCESO DE BENEFICIO DEL MATERIAL ACTIVO OBTENIDO.....	20
3.3. PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE BATERIAS RECARGABLES GASTADAS..	20
3.4. ANÁLISIS QUÍMICO DE LA SOLUCIÓN LIXIVIADA DE BATERIAS RECARGABLES GASTADAS .....	21
3.5. PREPARACIÓN DEL SUSTRATO DE COBRE .....	22
3.6. ELECTRODEPOSICIÓN SOBRE SUSTRATO DE COBRE EMPLEANDO SOLUCIONES OBTENIDAS MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE LOS MATERIALES ACTIVOS.....	23
3.7. ELECTRODEPOSICIÓN CON SOLUCIÓN DE NIQUEL A PARTIR DE REACTIVOS COMERCIALES DE ALTA PUREZA.....	24
3.8. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL DEPÓSITO MEDIANTE LEY DE FARADAY.....	25
3.9. ANÁLISIS DEL RECUBRIMIENTO MEDIANTE SEM Y EDS.....	25
3.10. EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE LA EVOLUCIÓN DE HIDRÓGENO	26
4. RESULTADOS .....	28
4.1. PROCESO DE BENEFICIO DEL MATERIAL ACTIVO OBTENIDO.....	28
4.2. ANÁLISIS QUÍMICO DE LA SOLUCIÓN LIXIVIADA DE BATERIAS RECARGABLES GASTADAS .....	28
4.3. ELECTRODEPOSICIÓN SOBRE SUSTRATO DE COBRE .....	28
4.4. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL DEPÓSITO MEDIANTE LEY DE FARADAY.....	30
4.5. MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....	31
4.6. ESPECTROMETRÍA DE DISPERSIÓN DE ENERGIA DE RAYOS X (EDS) ..	33
4.7. EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE LA EVOLUCIÓN DE HIDRÓGENO ..	36

5. CONCLUSIONES ..... 42  
6. RECOMENDACIONES..... 43  
BIBLIOGRAFÍA..... 44  
ANEXOS..... 48

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Análisis químico por la técnica Absorción atómica de la solución lixiviada del polvo de baterías NiCd y NiMH.....	28
Tabla 2. Ganancias máxicas de los electrodos posterior a la deposición del lixiviado de baterías NiCd y NiMH. ....	30
Tabla 3. Eficiencia de deposición de los electrodos obtenidos del lixiviado de baterías y reactivos puros.....	30
Tabla 4. Cuantificación de los espectros EDS evidenciados de la Figura 6. a la Figura 10. correspondientes a los electrodos CdNi y Ni.....	35

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Montaje de la celda electrolítica para la deposición de Ni-Cd y Ni.....	23
Figura 2. Montaje de la celda para la evaluación electroquímica de los electrodos en la reacción de evolución de hidrógeno (HER). .....	27
Figura 3. Cronoamperograma de deposición de la solución lixiviada del material activo de las baterías NiCd y NiMH, aplicando diferentes potenciales de reducción. T: 27°C, pH: 1,65 .....	29
Figura 4. Imágenes obtenidas mediante SEM de los recubrimientos resultantes de la solución lixiviada proveniente de las baterías recargables recicladas y de la solución rica en níquel. Imágenes tomadas a 2000X a partir de la recepción de electrones retrodispersados (BSE) y electrones secundarios (SE), con tdep de 30 minutos. a) -1900mV b) -2000mV c) -2100mV d) -2200mV e) Niquelado -2000mV .....	31
Figura 6. Análisis EDS mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), para el recubrimiento electrolítico producido a partir de la solución lixiviada proveniente de las baterías recargables gastadas bajo los parámetros: E°dep - 1900 mV, tdep 30min.....	34
Figura 7. Análisis EDS mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), para el recubrimiento electrolítico producido a partir de la solución lixiviada proveniente de las baterías recargables gastadas bajo los parámetros: E°dep - 2000 mV, tdep 30min.....	34
Figura 8. Análisis EDS mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), para el recubrimiento electrolítico producido a partir de la solución lixiviada proveniente de las baterías recargables gastadas bajo los parámetros: E°dep - 2100 mV, tdep 30min.....	34
Figura 9. Análisis EDS mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), para el recubrimiento electrolítico producido a partir de la solución lixiviada proveniente de las baterías recargables gastadas bajo los parámetros: E°dep - 2200 mV, tdep 30min.....	35
Figura 10. Análisis EDS mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), para el recubrimiento electrolítico producido a partir de la solución lixiviada rica en níquel bajo los parámetros: E°dep -2000 mV, tdep 30min. ....	35
Figura 11. Voltamograma de los electrodos CdNi y Ni en 0.01M KOH pH: 12.12 .....	36
Figura 12. Voltamograma de los electrodos CdNi y Ni en 0.1M KOH pH: 13.09	37
Figura 13. Voltamograma de los electrodos CdNi y Ni en 1M KOH pH: 14.30 ...	38
Figura 14. Ensayo potenciodinámico de los electrodos CdNi y Ni en 0.01M KOH pH: 12.12 .....	39

Figura 15. Ensayo potenciodinámico de los electrodos CdNi y Ni en 0.1M KOH pH: 13.09.....	40
Figura 16. Ensayo potenciodinámico de los electrodos CdNi y Ni en 1M KOH pH: 14.30.....	41

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Ilustración de la celda electrolítica empleada .....	48
Anexo B. Cálculo tipo: porcentaje disolución másico .....	48
Anexo C. Informe de resultados absorción atómica .....	49
Anexo D. Cálculo tipo: eficiencia de deposición .....	51
Anexo E. Calculo tipo: normalizado composición de electrodos .....	53

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE LA REACCIÓN DE EVOLUCIÓN DE HIDRÓGENO SOBRE ELECTRODOS DE COBRE RECUBIERTOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA RECUPERACIÓN DE BATERÍAS RECARGABLES GASTADAS\*

**AUTOR:** ANDRÉS FELIPE MONSALVE NIÑO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** RECICLAJE DE BATERÍAS, GENERACIÓN DE HIDRÓGENO, RECUBRIMIENTOS.

### **DESCRIPCIÓN:**

Existen diferentes formas de producir hidrógeno, entre las que se destaca la electrólisis del agua, en la cual se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos, generando la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno. Los electrodos utilizados para la construcción de la celda, normalmente, se construyen de platino, las cuales presentan un bajo sobre potencial para la evolución de hidrógeno. En esta investigación se evalúa una alternativa a los electrodos de platino que hacen costosa la producción de hidrógeno por aleaciones de cadmio y níquel, obtenidas a partir de la electro-recuperación de estos metales, contenidos en residuos de baterías recargables gastadas. Esto se alcanza mediante la lixiviación del contenido interno de éstas y una posterior deposición de los elementos que componen la solución resultante de la lixiviación, sobre un sustrato de cobre, logrando así un recubrimiento homogéneo para su implementación en la reacción de evolución de hidrógeno (HER), a fin de evaluar la posible sustitución de las aleaciones de platino, tratando así de reducir los costos que este proceso de obtención de energía alternativa representa. Esta evaluación del desempeño de los electrodos en la producción de hidrógeno se llevó a cabo mediante la aplicación de un conjunto de ensayos, compuestos por potencial a circuito abierto seguido de una voltamperometría cíclica y, de igual forma, un potencial a circuito abierto seguido de un ensayo potenciodinámico. Estos ensayos se realizan en 3 diferentes soluciones de KOH con las siguientes concentraciones y pH: 1M con pH 14.30, 0.1M con pH 13.09 y 0.01M con pH 12.12.

De esta manera, se logró concluir el rendimiento que presentan los electrodos de aleación obtenidos, con respecto a un electrodo recubierto de níquel puro, como punto de comparación.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Director: PhD. Sergio Ismael Blanco Vásquez. Codirector: PhD. Pedro Luis Delvasto Angarita.

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF THE HYDROGEN EVOLUTION REACTION ON COATED COPPER ELECTRODES OBTAINED FROM THE RECOVERY OF WASTED RECHARGEABLE BATTERIES\*

**AUTHOR:** ANDRES FELIPE MONSALVE NIÑO\*\*

**KEY WORDS:** RECYCLING OF BATTERIES, HYDROGEN GENERATION, COATINGS.

**DESCRIPTION:**

Today we have different ways of generating hydrogen, one of the most important is the water electrolysis, in this way we apply a potential difference between the electrodes generating the water decomposition in hydrogen and oxygen. The electrodes used for the cell building are usually of platinum or alloys of this metal because they have a low overpotential for the hydrogen evolution.

In this research an alternative to the platinum electrodes that makes expensive the hydrogen production is evaluated for nickel and cadmium alloys obtained from the electro-recovery of these metals, obtained from wasted rechargeable batteries. This through the leaching of the mineral inside the batteries (anodic and cathodic active materials), subsequent a electrodeposition of the elements that make up the solution resulting from this leaching on a copper substratum making a homogeneous coating for the implementation in the hydrogen evolution reaction (HER), replacing like this the platinum alloys and therefore significantly reducing costs that this process of obtaining alternative energy represents.

This evaluation of the electrodes performance in the hydrogen production is carried out by the applying of a set of test consisting of an open circuit potential followed by a cyclic voltammetry and by the same way an open circuit potential followed by a potentiodynamic test, these tests are made in 3 different KOH solutions with the following concentrations and pH: 1M con pH 14.30, 0.1M con pH 13.09 y 0.01M con pH 12.12.

In this manner, it is possible to conclude the performance of the specified alloy electrodes with respect to a nickel coated electrode as a point of comparison.

---

\*Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering  
Director: PhD. Sergio Ismael Blanco Vásquez. Codirector: PhD. Pedro Luis Delvasto Angarita.

## INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas actuales de mayor importancia es reducir el nivel de contaminantes presentes en la atmósfera, estos son los principales causantes de problemas que afectan la humanidad como el efecto invernadero, ocasionado en gran medida por la utilización de motores de combustión, los cuales generan gases nocivos para la atmósfera.<sup>1</sup>

De acuerdo con el crecimiento de la población mundial y a la demanda de mejor calidad de vida, la necesidad energética prevista crecerá significativamente. Actualmente, 2/3 de la energía necesaria es suplida por petróleo y gas; la combustión de los derivados del petróleo presenta una gran emisión de gases de efecto invernadero que contribuyen a la contaminación del planeta. Se hace indispensable encontrar una solución a esta demanda de energía mediante alternativas libres como lo es la energía proveniente del hidrógeno. Las propiedades ideales de un combustible son limpieza, conveniencia, abundancia en el planeta e independencia del control extranjero. El hidrógeno posee todas estas propiedades y ha empezado a ser evaluado y promovido mundialmente como la solución ambientalmente amigable para reemplazar los combustibles fósiles y sus derivados.<sup>2</sup> Existen diferentes formas de producir hidrógeno, entre las que se destaca la electrólisis del agua, donde aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos generando la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno.<sup>3</sup> Los electrodos utilizados para la construcción de la celda normalmente se construyen de platino que presenta un bajo sobre potencial para la evolución de hidrógeno.

El propósito de este proyecto es evaluar una alternativa a los electrodos de platino que hacen costosa la producción de hidrógeno por aleaciones de níquel obtenidas de la recuperación de baterías recargables gastadas, logrando así reducir significativamente los costos que este proceso de obtención de energía alternativa representa.

1. PRASAD, P.V.V. THOMAS, J.M.G. NARAYANAN, S. Global Warming Effects, *En: Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, Second Edition, Volume 3, Pages 289-299. 2017.

2. GUPTA, Ram B. Hydrogen Fuel: Production, transport, and storage, CRC press Taylor and Francis Group, 2009, pp. 4-6.

3. URSUA, Alfredo. GANDIA, Luis y SANCHIS, Pablo, "Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 410-426, Feb. 2012,

## 1. OBJETIVOS

### 1.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la reacción de evolución de hidrógeno sobre electrodos de cobre recubiertos obtenidos a partir de la recuperación de baterías recargables gastadas.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Evaluar las condiciones voltaje y corriente para la electrodeposición sobre un sustrato de Cu del Cd-Ni proveniente de baterías recargables gastadas.

Obtener un electrodo recubierto superficialmente con Cd-Ni proveniente de baterías recargables gastadas.

Determinar la morfología, composición química y el comportamiento electroquímico del electrodo durante la reacción de evolución de hidrógeno.

## 2. MARCO REFERENCIAL Y ANTECEDENTES

### 2.1. MARCO REFERENCIAL

**2.1.1. Baterías de níquel cadmio.** Durante muchos años, Ni-Cd fue la opción de batería preferida para radios bidireccionales, equipos médicos de emergencia, cámaras de video profesionales y herramientas eléctricas. El material activo del cátodo en las baterías de Ni-Cd está constituido por oxihidróxido de níquel, mientras que el material activo del ánodo es cadmio metálico, cuando la pila se encuentra cargada.<sup>4</sup>

A fines de la década de 1980, las baterías de Ni-Cd de ultra-alta capacidad sacudieron al mundo con capacidades que eran hasta un 60 por ciento más altas que las Ni-Cd estándar.<sup>5,6</sup>

**2.1.2. Baterías de níquel metal hidruro.** Son baterías comercialmente importantes por su avance tecnológico tanto para el consumidor como para aplicaciones industriales debido a su diseño, flexibilidad, potencia y costo, además de ser amigable con el medio ambiente.<sup>5,6</sup>

Pueden recargarse en cualquier punto del ciclo de carga, son elaboradas libres de cadmio, un producto químico peligroso y que puede llegar a acumularse en el ambiente.<sup>7</sup>

**2.1.3. Celdas electrolíticas.** Son unos dispositivos experimentales usados para generar electricidad en el entorno. A partir de una reacción de óxido reducción en donde las sustancias se encuentran separadas de tal manera que los electrones deben atravesar desde la sustancia reductora hacia la sustancia oxidante.<sup>8</sup>

4. DELVASTO, Pedro. et al. Caracterización fisicoquímica de los materiales activos presentes en pilas gastadas del tipo Ni-Cd segregadas de un lote de pilas desechadas en la ciudad de Caracas. Caracas, Venezuela. Avances en Química, Enero 2015, Vol. 10(1), pp. 11-19.

5. BESENHARD, Jurgen. Handbook of Battery Materials. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. 1999, ISBN 3-527-29469-4

6. LINDEN, Daniel. y REDDY, Thomas. Handbook of Batteries. The McGraw-Hill Companies. New York, United States of America, 2002, ed. 3

7. FETCENKO, Michael. et al. Recent advances in NiMH battery technology. Journal of Power Sources, Marzo 2007, Vol. 165(2), pp. 544-551.

Requieren de la aplicación de una corriente externa para lograr la reacción de reducción y oxidación mediante un proceso de electrólisis.<sup>9</sup>

## 2.2. ANTECEDENTES

**2.2.1. Producción de hidrógeno.** La producción de hidrógeno implica un gran gasto energético en cuanto a sus diferentes fases: producción, almacenamiento y transporte, a este inconveniente se han venido presentando soluciones como el uso de la energía solar para producirlo<sup>10</sup>, por cada kWh obtenido del sol se reduce el consumo de combustibles fósiles en 2,5 kWh, si esta energía fuese empleada en la producción de hidrógeno se reduciría en 0.7 kWh.<sup>11</sup> El sistema de almacenamiento de hidrógeno está compuesto por: el tanque de almacenamiento global, el sistema de material adsorbente, el sistema interno de transferencia de calor y el recipiente a presión.<sup>2</sup> El sistema de transporte de hidrógeno se realiza mediante tuberías, requiere que el gas esté sometido a presiones muy altas (hasta 3000 psi) y el uso de materiales viables con el fin de evitar la fragilidad por hidrógeno; la tecnología de soldadura actual para impactos en tuberías de acero puede provocar este tipo de problemas.<sup>2</sup>

Actualmente la economía del hidrógeno ha sido legislada en términos del bien conocido objetivo de la Unión Europea sobre la política energética a largo plazo denominada 20-20-20 para el año 2020. Por esto, las tecnologías de producción de hidrógeno, distribución, almacenamiento y utilización cumplirán un rol importante en la producción de energía en el futuro cercano.<sup>12</sup> La obtención hidrógeno mediante electrólisis del agua empleando energía solar es la única técnica comercial que no representa emisión alguna de dióxido de carbono a la atmósfera.<sup>13</sup>

9. KELLY, N. A. Hydrogen production by water electrolysis, *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution*, Book 63, Macomb Community College, USA. Elsevier Ltd, 2014, pp. 159-185. 2014.

10. BARTON, John. Y GAMMON, Rupert. The production of hydrogen fuel from renewable sources and its role in grid operations. *Power Sources*. Diciembre 2010, Vol. 195, pp.8222-8235.

11. MOMIRLAN, Magdalena. et al. The Use Of Solar Energy In Hydrogen Production. Denver, USA. *Renewable Energy*, Septiembre – Diciembre 1996, Vol. 9(1-4), pp. 1258-1261.

12. ĐUKIĆ, Ankica. Autonomous hydrogen production system. *International Journal Of Hydrogen Energy*, junio 2015, Vol 40(24), pp. 7465-7474.

13. HOLLADAY, J. D. et al. An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 30 Enero 2009, Vol 139(4), pp. 244-260.

El electrodo ideal para emplearse en la reacción de evolución de hidrógeno (HER) debe presentar características como bajo sobrepotencial, gran área superficial activa, estabilidad física y electroquímica, bajo costo, facilidad de uso y una excelente conductividad eléctrica.<sup>14</sup>

**2.2.2. Electrodo de cadmio y aleación.** Las ventajas de las baterías níquel cadmio incluyen su bajo costo, alta capacidad de potencia y fácil construcción a pesar del conocido efecto de memoria atribuido al electrodo de cadmio. Además, las materias primas utilizadas pueden reciclarse casi por completo; las tasas técnicas de recuperación de níquel y cadmio son muy altas, 96% y 99% respectivamente.<sup>15</sup>

Los electrodos de cadmio constituyen el componente negativo de las celdas níquel-cadmio por décadas, incluso en las celdas menos populares plata-cadmio y cadmio-aire.<sup>16</sup>

La reacción de evolución de hidrógeno gaseoso sobre los electrodos de cadmio en las baterías de níquel-cadmio ocurre como una reacción de sobrecarga en las celdas ventiladas y como una reacción secundaria en las celdas selladas.<sup>17</sup>

Teóricamente, el electrodo de cadmio podría generar algo de hidrógeno cuando la celda níquel-cadmio esta operando a circuito abierto y en mayor magnitud cuando esta se encuentra en el proceso de carga, el potencial del electrodo de cadmio se vuelve más negativo debido al relativamente alto sobrepotencial asociado a este proceso.<sup>18</sup> Es generalmente aceptado que la reacción de evolución de hidrógeno (HER) sobre electrodos de cadmio en presencia de soluciones de NaOH, KOH y CsOH se ajuste a una pendiente de tafel de 0.12V decada<sup>1</sup>, y el coeficiente de transferencia es cercano a 0.5.<sup>19,20</sup>

14. SHIBLI, Sheik. y SEBEELAMOL, J.N. Development of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> mixed oxide incorporated Ni-P coating for electrocatalytic hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, Febrero 2013, Vol. 38(5), pp. 2271-2282.

15. RANDHAWA, Navneet. GHARAMI, Kalpataru. y KUMAR, Manoj. Leaching kinetics of spent nickel-cadmium battery in sulphuric acid. *Hydrometallurgy*, Octubre 2016, Vol. 165(1), pp. 191-198.

16. DANIEL, Claus. y BESENHARD, Jurgen. *Handbook of Battery Materials*. Weinheim: Wiley-VCH.. 2013, ed. 2, Vol 1, pp. 219-221.

17. GANCHE, Jurgen. et al. *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Amsterdam: Elsevier. 2009, Vol 1.

18. BARNAD, R. Cadmium in alkaline solution. *Journal Of Applied Electrochemistry*. 1981, 11(2), pp. 217-237.

19. GROSS, S. y GLOCKING, R.J. The Cadmium electrode. A review of the status of research [Reporte técnico] Seattle, WA, United States. Boeing Co. Septiembre 1976. Final Report of Boing Aerospace Company, Document D180-19046-2.

20. BARD, Allen. y HENNING, Lund, *Encyclopedia of electrochemistry of the elements* New York: Dekker, 1984, 9th ed., pp. 383-547.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. RECOLECCIÓN Y DESENSAMBLAJE DE BATERÍAS

Se recolectaron 15 baterías recargables gastadas de Ni-Cd y Ni-MH de los contenedores del sistema de gestión de residuos de la UIS. Estas baterías se desensamblaron, empleando herramientas manuales, lográndose extraerles 135g de material activo. Este material activo, es una mezcla de los polvos de cátodos y ánodos de dicho conjunto de baterías.

Antes de iniciar el desensamblaje de las baterías, las mismas se sumergieron en una solución acuosa con 4,5 % de NaCl, a fin de descargarlas. Posteriormente, con ayuda de unas pinzas se abre uno de los extremos de las baterías, luego se elimina el cascaron metálico que comprende la parte exterior, se separa la carcasa de la batería del material activo interno, el cual contiene níquel, cadmio, cobalto y tierras raras, entre otros compuestos.<sup>21,22</sup>

#### 3.2. PROCESO DE BENEFICIO DEL MATERIAL ACTIVO OBTENIDO

El material activo obtenido de las baterías se llevó a un molino de bolas, con el fin de reducir el tamaño de sus partículas y posteriormente se secó en un horno a 100 °C, durante 24 horas, para eliminar el exceso de humedad que pueda presentar antes de llevar a cabo el proceso lixiviación.

#### 3.3. PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE BATERIAS RECARGABLES GASTADAS

Para la preparación del lixiviado de baterías se utilizaron 300ml de solución, la cual se preparó a partir de 210ml de agua desionizada dispuesta en un beacker, el cual

21. PIETRELLI, Loris. et al. Characterization and leaching of NiCd and NiMH spent batteries for the recovery of metals. [En línea]. Waste Management, Vol. 25(2), 2005, pp. 221–226.

22. DELVASTO, Pedro. et al. Caracterización fisicoquímica de los materiales activos presentes en pilas gastadas del tipo Ni-Cd

se llevó a una plancha de calentamiento con agitación magnética, se elevó la temperatura del baño a 70°C y se agregó un agitador magnético a la solución, fijando este en 600 rpm, posteriormente se agregaron 72g de ácido cítrico y se agitó hasta homogenizar la solución, seguido de esto se aforó a 300ml con agua desionizada, una vez aforada la solución se agregaron 6,0 g de polvo de baterías e inmediatamente a esto se agregaron 9 ml de peróxido de hidrógeno manteniendo las condiciones descritas anteriormente durante un tiempo de lixiviación de 3 horas.

Al finalizar este tiempo se filtró la solución y se agregó 1,5ml de HCl y se agitó hasta homogenizar, se midió el pH final de la solución (1,65).

Teniendo en cuenta los residuos se realizó el cálculo correspondiente al porcentaje de disolución másico de la siguiente forma:

$$\%Disolución_{(m\acute{a}sico)} = \frac{W_0 - W_f}{W_0} * 100 \quad (1)$$

Dónde: - $W_0$ = Masa inicial [g] - $W_f$ = Masa final [g]
---

#### 3.4. ANÁLISIS QUÍMICO DE LA SOLUCIÓN LIXIVIADA DE BATERIAS RECARGABLES GASTADAS

El análisis de la solución lixiviada proveniente de las baterías NiCd y NiMH se realizó mediante un ensayo de espectrometría de absorción atómica el cual permitió evaluar la concentración de un analito (Cd en este caso) en la muestra.

Esta técnica se basa en gran medida en la ley de Beer-Lambert la cual relaciona la intensidad de luz entrante en un medio con la intensidad saliente después de que en dicho medio se produzca absorción. La relación entre ambas intensidades se expresa a partir de las siguientes ecuaciones.<sup>23</sup>

Para líquidos:

$$\frac{I_1}{I_0} = 10^{-\alpha \ell} = 10^{-\epsilon \ell c} = 10^{-A} \quad (2)$$

donde:

- $I_1, I_0$  son las intensidades saliente y entrante respectivamente.
- $A = \alpha \ell = \epsilon \ell c$  es la absorbancia.
- $\ell$  es la longitud atravesada por la luz en el medio
- $c$  es la concentración del absorbente en el medio.
- $\alpha$  es el coeficiente de absorción.

El principio de funcionamiento de esta técnica se basa en que los electrones de los átomos en el atomizador pueden ser promovidos a orbitales mayores por un instante mediante la absorción de una cantidad de energía (luz de una determinada longitud de onda). Esta cantidad de energía se refiere específicamente a una transición de electrones en un elemento particular, y en general, cada longitud de onda corresponde a un solo elemento.

Como la cantidad de energía inicialmente puesta en la llama es conocida y la cantidad restante en el detector se puede medir, es posible mediante la ley de Beer-Lambert calcular cuántas de estas transiciones tienen lugar y de este modo obtener una señal que es proporcional a la concentración del analito (Cd).

### 3.5. PREPARACIÓN DEL SUSTRATO DE COBRE

El sustrato de cobre empleado fue una lamina de 1mm de espesor la cual se seccionó en cuadrados de 2cm por lado y se perforaron 2 orificios de 7/64" (10,93mm) de diámetro con la ayuda de una broca con el fin de facilitar el acople en el montaje de la celda.

Se desbastó el sustrato con papel abrasivo de SiC 80, 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1200, 1500 y 2000 según los parámetros establecidos en la norma ASTM E3-11.<sup>24</sup> Posteriormente se lavó con agua desionizada y se sometió a limpieza en ultrasonido por 10min cada uno.

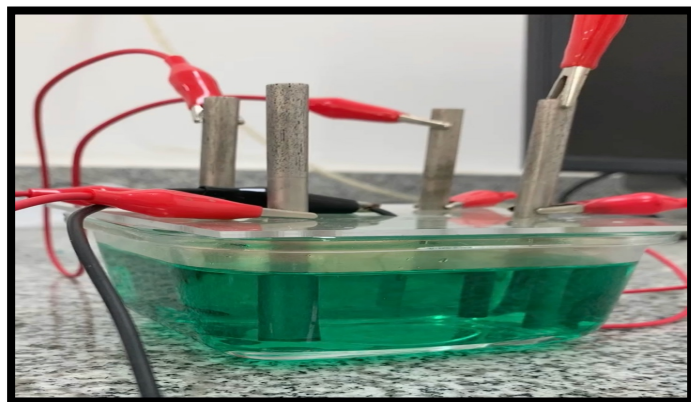
24. ASTM E3-11, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

### 3.6. ELECTRODEPOSICIÓN SOBRE SUSTRATO DE COBRE EMPLEANDO SOLUCIONES OBTENIDAS MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE LOS MATERIALES ACTIVOS

La disposición de la celda se llevó a cabo teniendo en cuenta su aplicación ingenieril, ya que es común en la industria la utilización de celdas con 2 electrodos en los cuales uno de ellos actúa como pseudoelectrodo de referencia conformado por cuatro barras de níquel de alta pureza (99%) que se encuentran en equilibrio electroquímico con los iones de níquel presentes en el electrolito. En el montaje utilizado, se ubicaron las barras de níquel equidistantes con respecto al sustrato de cobre, con el fin de obtener una distribución homogénea de las líneas de flujo y generar así una deposición uniforme sobre el sustrato.

Se evaluaron diferentes potenciales de deposición ( $E^{\circ}_{dep}$ ), aplicando una diferencia de voltaje entre ánodo (barras de níquel) y cátodo (electrodo de cobre) variable desde -1500mV hasta -2500mV, para cada uno de los potenciales evaluados se estudió la influencia del tiempo de deposición en la homogeneidad del recubrimiento, variando este parámetro entre 5 y 30 minutos.

Figura 1. Montaje de la celda electrolítica para la deposición de Ni-Cd y Ni.



Se llevó a cabo el montaje de la celda empleando 4 electrodos de níquel 99% de pureza con las siguientes dimensiones: 10cm de longitud y 0,8cm de diámetro, los

cuales actúan como pseudoelectrodos al estar en equilibrio con los iones de níquel presentes en la solución. Adicionalmente se agregó al montaje el electrodo de trabajo, en este caso, sustrato de cobre de alta pureza (99.9%). Se definieron los valores de corriente variable, Voltaje constante a -1900mV, -2000mV, -2100mV y -2200mV; con un tiempo de deposición de 30min por sustrato. Posteriormente a la deposición se limpió el electrodo con agua desionizada y se eliminó el agua presente en la superficie con la ayuda de un secador industrial.

### **3.7. ELECTRODEPOSICIÓN CON SOLUCIÓN DE NIQUEL A PARTIR DE REACTIVOS COMERCIALES DE ALTA PUREZA**

Con el fin de obtener un recubrimiento con el cual comparar los resultados obtenidos se procedió a realizar un recubrimiento de níquel obtenido a partir de una solución rica en este elemento.

Para la preparación de 300ml de la solución se utilizaron 13,5g de Cloruro de Níquel ( $\text{NiCl}_2$ ), 8,4g de Ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ), y 4,5g de Sulfato de Níquel ( $\text{NiSO}_4$ ). Teniendo en cuenta que esta solución conocida como baño de Watts es ampliamente utilizado en la industria de los recubrimientos.

Con respecto a los parámetros de deposición (voltaje y tiempo), se definieron de igual forma que con la deposición de la solución lixiviada, con el fin de comparar eficientemente los resultados obtenidos de estos recubrimientos.

Se llevó a cabo el montaje de la celda empleando 4 electrodos de níquel 99% de pureza con las siguientes dimensiones: 10cm de longitud y 0,8cm de diámetro, se agregó al montaje el electrodo de trabajo, en este caso, sustrato de cobre de alta pureza (99.9%). Una ilustración de la celda empleada se encuentra en el Anexo A. Se definieron los valores de corriente variable, voltaje constante a -1900mV, -2000mV, -2100mV y -2200mV; con un tiempo de deposición de 30min por sustrato.

Posteriormente a la deposición se limpió el electrodo con agua desionizada y se eliminó el agua presente en la superficie con la ayuda de un secador industrial.

### 3.8. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL DEPÓSITO MEDIANTE LEY DE FARADAY

La ley de Faraday de la electrolisis permite conocer la masa depositada en un recubrimiento, mediante esta se analizó la eficiencia de la deposición en los ensayos realizados.

$$m = \frac{M \times Q}{z \times F} \quad (3)$$

Donde:

- m es la masa de la sustancia producida en el electrodo (en gramos).
- Q es la carga eléctrica total que pasó por la solución (en coulombs).
- F es la constante de Faraday.
- M es la masa molar de la sustancia (en gramos por mol).
- z es el número de valencia de la sustancia como ion en la solución (electrones por ion).

### 3.9. ANÁLISIS DEL RECUBRIMIENTO MEDIANTE SEM Y EDS

Posteriormente a la obtención del recubrimiento se procedió a realizar el análisis por la técnica Microscopia Electrónica de Barrido (SEM por sus siglas en ingles). En el cual se induce un haz de electrones sobre la muestra a diversas magnificaciones (2000X y 5000X); donde se obtuvieron imágenes de alta resolución gracias a los electrones secundarios (SE) para detectar morfología e imágenes de baja resolución pero gran contraste, de igual forma mediante el análisis por electrones retrodispersados (BSE) se observaron variaciones de composición. Este análisis

fue realizado en el laboratorio de microscopia de la Universidad Industrial de Santander (UIS), usando el microscopio electrónico de barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650 y con las siguientes características: alto vacío, voltaje de aceleración de 15kV. Adicionalmente, se realizó la evaluación de la composición química del recubrimiento de forma semicuantitativa, mediante la técnica espectrometría de dispersión de energía de rayos x (EDS por sus siglas en ingles). Se empleó el detector EDAX APOLO X, con resolución de 126.1 eV (en. Mn K $\alpha$ ), para realizar análisis con las siguientes características: alto vacío, voltaje de aceleración de 15kV.

Adicionalmente, se realizó la evaluación de la composición química del recubrimiento de forma semicuantitativa, mediante la técnica espectrometría de dispersión de energía de rayos x (EDS por sus siglas en ingles). Se empleó el detector EDAX APOLO X, con resolución de 126.1 eV (en. Mn K $\alpha$ ), para realizar análisis con las siguientes características: alto vacío, voltaje de aceleración de 15kV. En los resultados se tiene en cuenta la corrección pertinente a la matriz (Cu) y al espesor del recubrimiento obtenido (Depósito fino) con respecto a 3 factores específicos (ZAF): numero atómico (Z), absorción (A) y fluorescencia(F).

Para la normalización de los valores se empleó las siguiente formula:

$$\%Ni_{normalizado} = \frac{\%Ni_i}{\%Ni_i + \%Cd_i} * 100 = \%Ni_{normalizado} \quad (4)$$

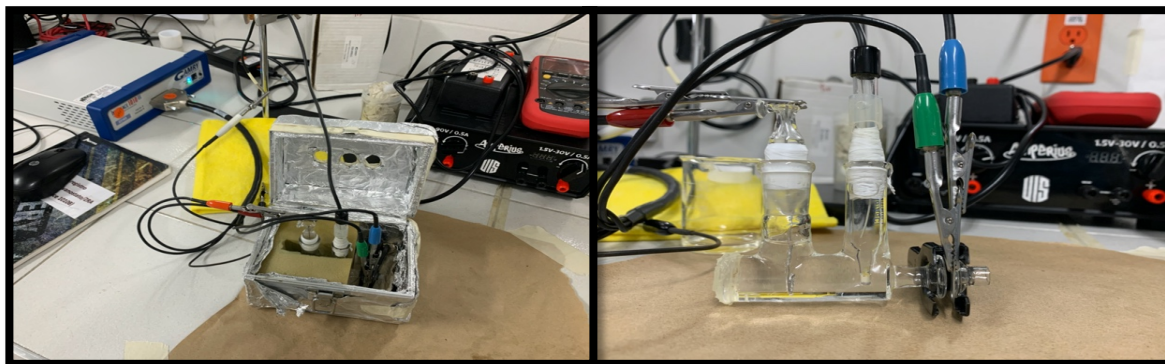
### 3.10. EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE LA EVOLUCIÓN DE HIDRÓGENO

Para la evaluación del comportamiento electroquímico de la aleación se emplearon 3 soluciones de KOH con diferentes concentraciones y pH: 1M con pH 14.30, 0.1M con pH 13.09 y 0.01M con pH 12.12. El montaje de la celda se realizó con los siguientes parámetros: Electrodo auxiliar de Platino, electrodo de referencia Ag/AgCl, electrodo de trabajo de cobre recubierto con la aleación CdNi y Ni, en presencia de 25ml de soluciones KOH a diferentes concentraciones.

Para llevar a cabo estas pruebas se empleó el potenciostato Gamry interface 1010B. La secuencia de pruebas consistió en la realización de un potencial a circuito abierto (OCP) por un tiempo de 30min seguido de una voltamperometría cíclica con una ventana de potencial que abarca desde  $-1750\text{mV}$   $+750\text{mV}$  Vs Ag/AgCl con una velocidad de barrido de  $3\text{mVs}^{-1}$ .

De igual forma la siguiente secuencia se inició con la realización de un ensayo de potencial a circuito abierto (OCP) por un tiempo de 30min seguido de un ensayo potenciodinámico que inició en el OCP y finalizó en  $-1750\text{mV}$  Vs Ag/AgCl con una velocidad de barrido de  $3\text{mVs}^{-1}$  para analizar de forma enfática el desempeño de los electrodos en la producción de hidrógeno a potenciales mas electronegativos.

Figura 2. Montaje de la celda para la evaluación electroquímica de los electrodos en la reacción de evolución de hidrógeno (HER).



## 4. RESULTADOS

### 4.1. PROCESO DE BENEFICIO DEL MATERIAL ACTIVO OBTENIDO

El porcentaje de disolución másico para la solución empleada que contiene ácido cítrico y peróxido de hidrógeno a 70°C con un pH de 1,65 es de 75,5%, ver cálculo tipo en Anexo B.

### 4.2. ANÁLISIS QUÍMICO DE LA SOLUCIÓN LIXIVIADA DE BATERIAS RECARGABLES GASTADAS

El análisis de la solución lixiviada proveniente de las baterías NiCd y NiMH se realizó mediante un ensayo de absorción atómica los resultados se muestran en la Tabla 1. Adicionalmente se encuentra el reporte en el Anexo C.

Tabla 1. Análisis químico por la técnica Absorción atómica de la solución lixiviada del polvo de baterías NiCd y NiMH.

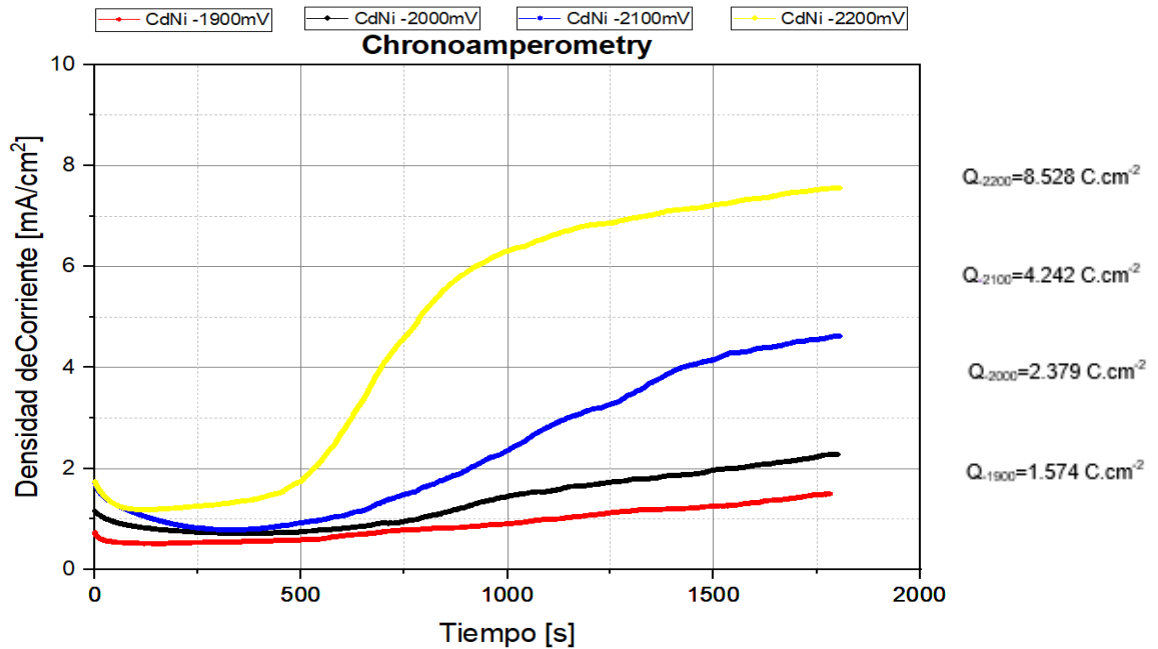
<b>Metal Analizado</b>	<b>Concentración Obtenida [mg/L]</b>
<b>Cd</b>	138,7

### 4.3. ELECTRODEPOSICIÓN SOBRE SUSTRATO DE COBRE

En el siguiente cronoamperograma se observó el comportamiento presentado por los electrodos de CdNi durante el proceso de electrodeposición.

En la figura 3 se presentan las cronoamperometrías obtenidas al realizar la deposición potencioestática aplicando diferentes voltajes: -1900 mV (curva roja), -2000 mV (curva negra), -2100 mV (curva azul) y -2200 mV (curva amarilla).

Figura 3. Cronoamperograma de deposición de la solución lixiviada del material activo de las baterías NiCd y NiMH, aplicando diferentes potenciales de reducción. T: 27°C, pH: 1,65



En todos los casos las curvas obtenidas se pueden dividir en cuatro zonas: inicialmente se observa un decaimiento de la corriente en función del tiempo (0-50s aproximadamente) el cual puede estar relacionado con el agotamiento de los iones metálicos en la cercanía del electrodo, pasando de un control relacionado con la cinética de la reacción a un control por transporte en el electrolito. Posteriormente se observa la estabilización de la corriente entre 50 y 500s aproximadamente, donde las curvas correspondientes a las deposiciones realizadas entre -1900 y -2100 mV presentan una corriente similar, esta estabilidad de la corriente e independencia con el potencial aplicado podría relacionarse con un control difusivo de los iones presentes en la solución que se acercan a la superficie. Seguidamente se observa un incremento de la corriente entre 500 y 1000s aproximadamente, lo cual podría estar relacionado con el crecimiento tridimensional del depósito generando así un aumento del área electroquímicamente activa. En la etapa final, entre 1000 y 1800s la corriente tiende a estabilizarse, indicando así una posible estabilización del transporte de los iones desde el seno de la solución. En esta zona

final si se observa una clara diferencia de la corriente obtenida en función del potencial aplicado lo cual podría estar relacionado con un control por migración en el transporte iónico.

#### 4.4. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL DEPÓSITO MEDIANTE LEY DE FARADAY

Los cálculos para el análisis de la eficiencia de deposición se realizaron a partir de las ganancias másicas de los electrodos enunciadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Ganancias másicas de los electrodos posterior a la deposición del lixiviado de baterías NiCd y NiMH.

Voltaje [mV]	Tiempo [min]	Tipo de Electrodo	Peso inicial [g]	Peso final [g]	Ganancia [g]
-1900	30	CdNi	1,592	1,595	$3 \times 10^{-3}$
-2000	30	CdNi	1,594	1,598	$4 \times 10^{-3}$
-2100	30	CdNi	1,611	1,618	$7 \times 10^{-3}$
-2200	30	CdNi	1,565	1,579	$14 \times 10^{-3}$
-2000	30	Ni	1,540	1,607	$67 \times 10^{-3}$

Con relación a los datos presentados en la Tabla 2. Se aplicó la ley de Faraday de la electrolisis obteniendo así una eficiencia de deposición superior al 74% en todos los electrodos evaluados.

Tabla 3. Eficiencia de deposición de los electrodos obtenidos del lixiviado de baterías y reactivos puros.

Voltaje [mV]	Tiempo [min]	Tipo de Electrodo	Eficiencia de Deposición [%]
-1900	30	CdNi	88,49
-2000	30	CdNi	76,33
-2100	30	CdNi	74,31
-2200	30	CdNi	75,53
-2000	30	Ni	79,82

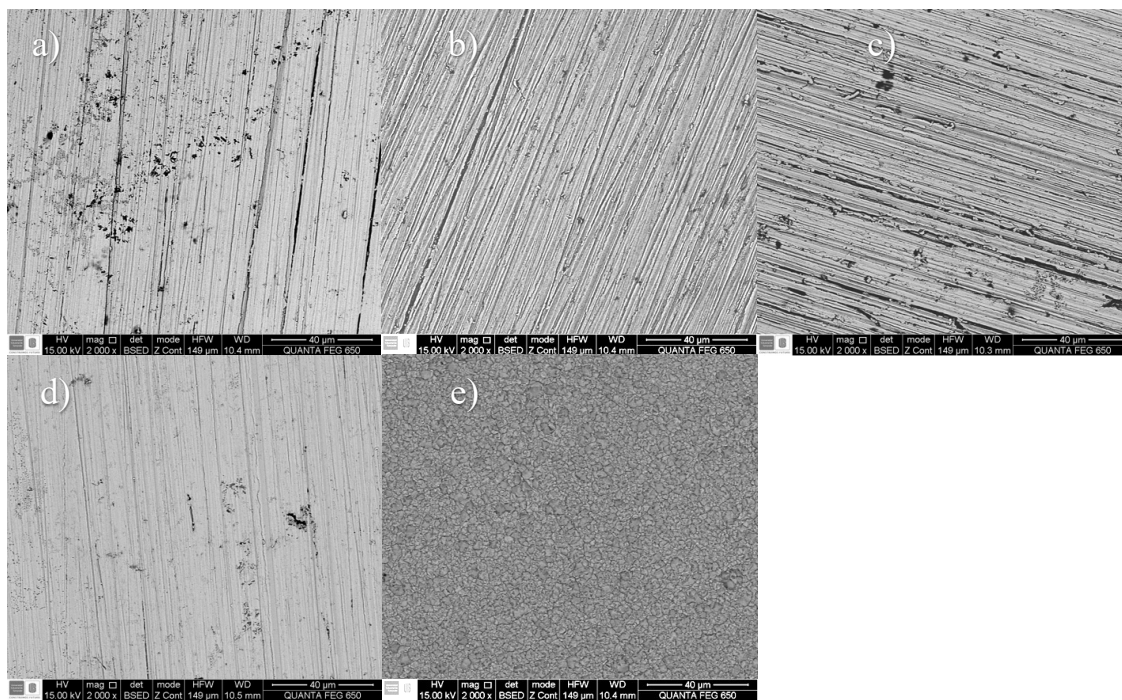
Los cálculos tipo para la realización de la Tabla 3. se enuncian en el Anexo D. El promedio de eficiencia de deposición es de 78.89% el cual resulta muy cercano al promedio de deposición de aleaciones NiCd 84% a diferentes composiciones obtenidos a partir de reactivos puros.

En esta Figura 3. Se aprecia el cronoamperograma de deposición de la solución lixiviada a potenciales fijos y su crecimiento exponencial a medida que el tiempo de la prueba transcurre, es evidente que la carga total que presentan estos cronoamperogramas es proporcional al voltaje aplicado a los sustratos de cobre; La proporción de carga aplicada y el tiempo de deposición repercuten en la cantidad de aleación depositada y por tanto en el espesor del recubrimiento obtenido.<sup>25</sup>

#### **4.5. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)**

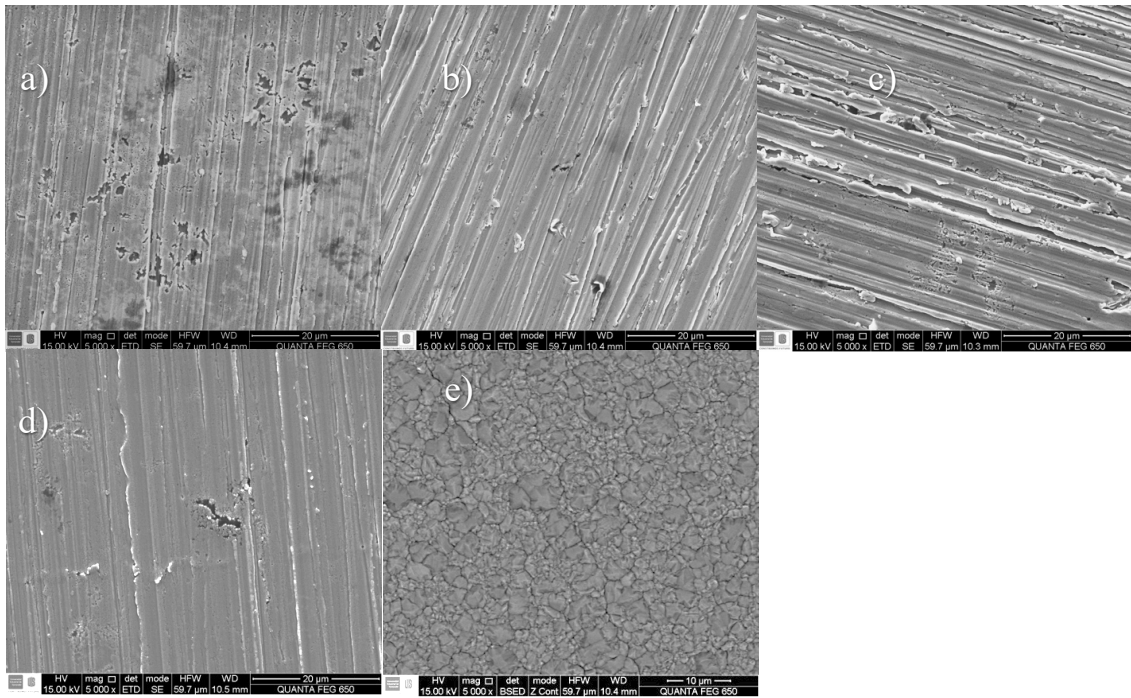
Luego de obtener los diferentes recubrimientos siguiendo las condiciones establecidas anteriormente se procedió a realizar el registro mediante SEM, en el cual mediante electrones retrodispersados se obtuvieron las imágenes representadas en la siguiente figura.

Figura 4. Imágenes obtenidas mediante SEM de los recubrimientos resultantes de la solución lixiviada proveniente de las baterías recargables recicladas y de la solución de rica en níquel. Imágenes tomadas a 2000X a partir de la recepción de electrones retrodispersados (BSE) y electrones secundarios (SE), con tdep de 30 minutos. a) -1900mV b) -2000mV c) -2100mV d) -2200mV e) Niquelado -2000mV



En estas se puede observar una matriz homogénea en las 4 diferentes variantes presentadas al momento de la deposición con la solución lixiviada proveniente de las baterías recargables recicladas: a), b), c), d), de igual forma se evidencia la presencia de algunos agregados de otros elementos en forma de óxidos distribuidos por la matriz; con respecto a la Figura 4 e) la cual corresponde al recubrimiento obtenido de la solución rica en níquel, se observa una matriz homogénea con una distribución característica de este tipo de recubrimientos.

Figura 5. Imágenes obtenidas mediante SEM de los recubrimientos resultantes de la solución lixiviada proveniente de las baterías recargables recicladas y de la solución de rica en níquel. Imágenes tomadas a 5000X a partir de la recepción de electrones retrodispersados (BSE) y electrones secundarios (SE), con tdep de 30 minutos. a) -1900mV b) -2000mV c) -2100mV d) -2200mV e) Niquelado -2000mV



Se observan imágenes a un aumento mayor (5000X), en estas se aprecia con una mayor precisión la presencia de agregados de elementos en forma de óxidos y la distribución uniforme que presenta la matriz de CdNi en comparación con otras distribuciones de recubrimiento de Cd.<sup>26,27</sup>

#### 4.6. ESPECTROMETRÍA DE DISPERSIÓN DE ENERGIA DE RAYOS X (EDS)

De igual manera, mediante el espectro de rayos X emitido por el recubrimiento se obtuvo un análisis químico semicuantitativo de la microestructura y mediante EDX, en el cual la concentración de cada especie corresponde a un valor definido de intensidad de la señal emitida por su longitud de onda.

A la izquierda se observan las imágenes SEM obtenida mediante electrones retrodispersados y a la derecha el espectro EDS con los principales elementos químicos presentes en los recubrimientos.

Figura 6. Análisis EDS mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), para el recubrimiento electrolítico producido a partir de la solución lixiviada proveniente de las baterías recargables gastadas bajo los parámetros:  $E^{\circ}dep$  - 1900 mV,  $t_{dep}$  30min

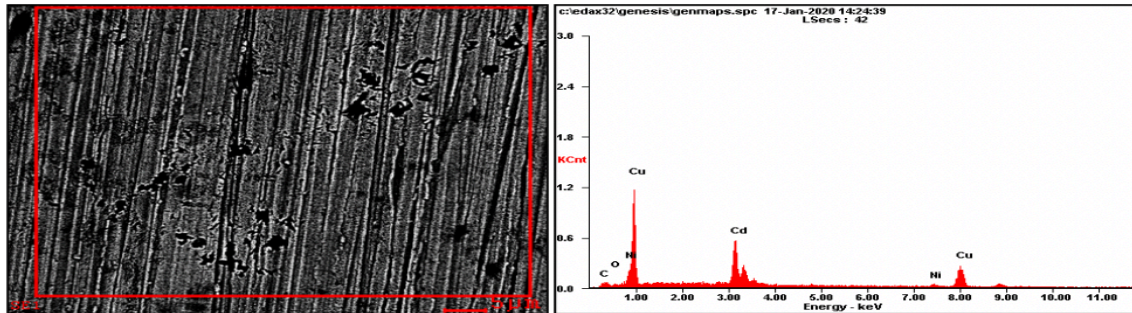


Figura 7. Análisis EDS mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), para el recubrimiento electrolítico producido a partir de la solución lixiviada proveniente de las baterías recargables gastadas bajo los parámetros:  $E^{\circ}dep$  - 2000 mV,  $t_{dep}$  30min

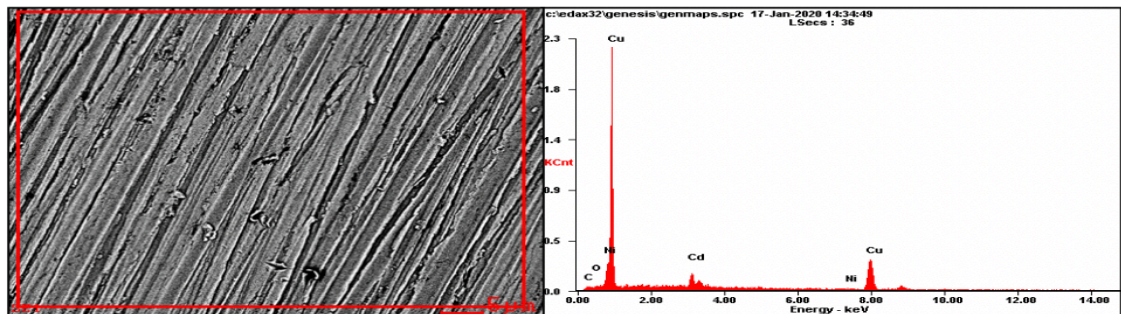


Figura 8. Análisis EDS mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), para el recubrimiento electrolítico producido a partir de la solución lixiviada proveniente de las baterías recargables gastadas bajo los parámetros:  $E^{\circ}dep$  - 2100 mV,  $t_{dep}$  30min

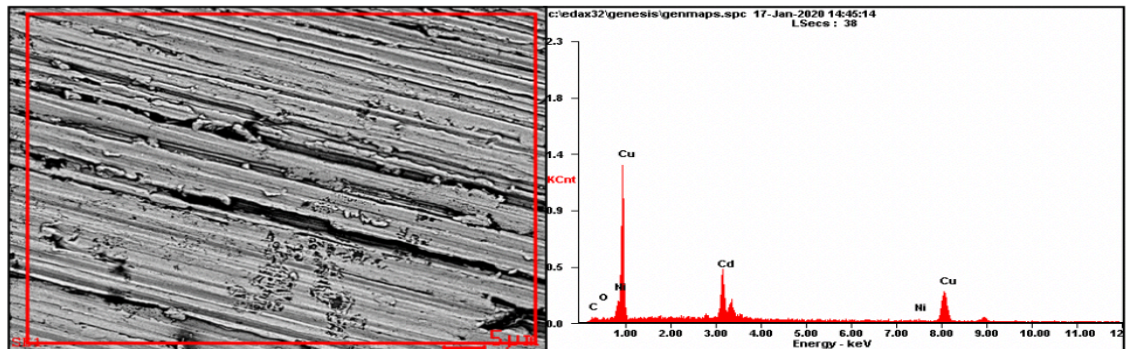


Figura 9. Análisis EDS mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), para el recubrimiento electrolítico producido a partir de la solución lixiviada proveniente de las baterías recargables gastadas bajo los parámetros:  $E^{\circ}dep$  - 2200 mV,  $tdep$  30min.

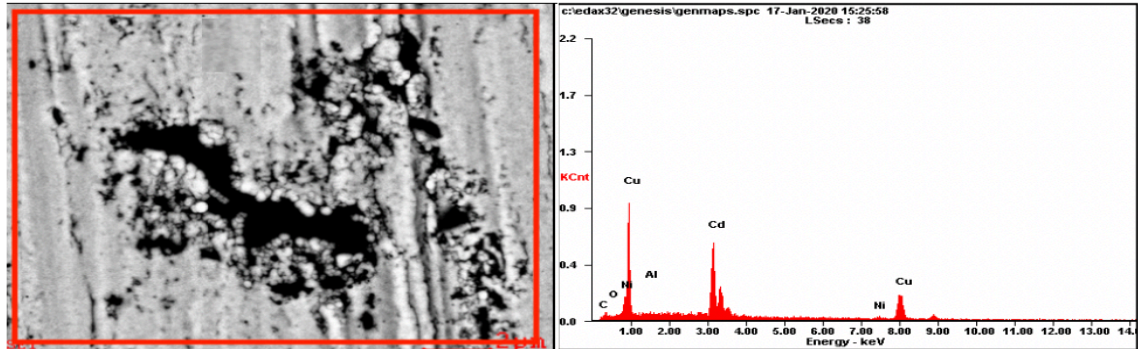


Figura 10. Análisis EDS mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), para el recubrimiento electrolítico producido a partir de la solución lixiviada rica en níquel bajo los parámetros:  $E^{\circ}dep$  -2000 mV,  $tdep$  30min.

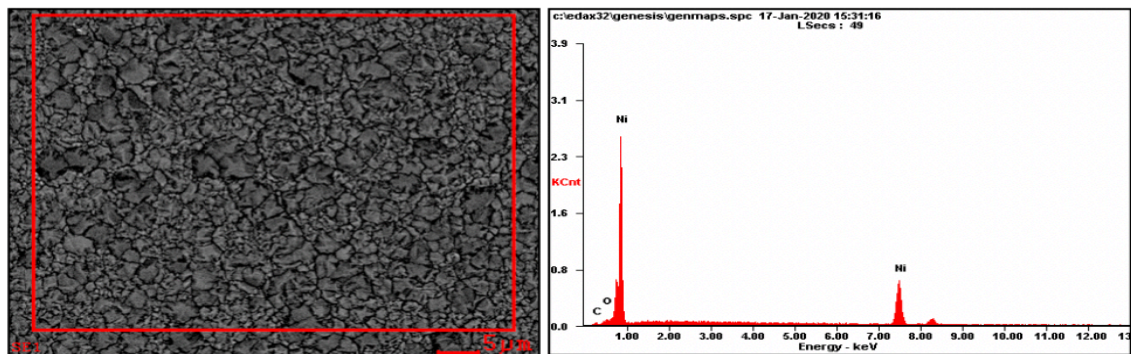


Tabla 4. Cuantificación de los espectros EDS evidenciados de la Figura 6. a la Figura 10. correspondientes a los electrodos CdNi y Ni.

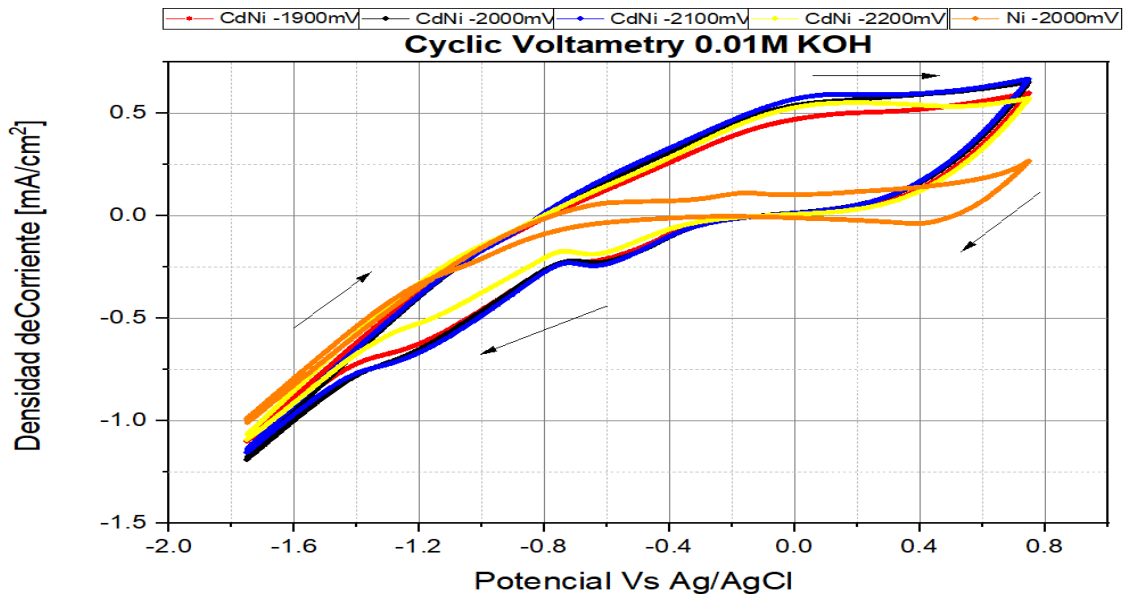
Electrodo / Elemento	CdNi -1900mV		CdNi -2000mV		CdNi -2100mV		CdNi -2200mV		Ni -2000mV	
	Figura 6.		Figura 7.		Figura 8.		Figura 9.		Figura 10.	
	%Peso	%Norm	%Peso	%Norm	%Peso	%Norm	%Peso	%Norm	%Peso	%Norm
Cd	32,33	88,52	12,56	92,56	26,59	93,80	39,22	92,11	0	-
Ni	4,19	11,48	1,01	7,44	1,75	6,20	3,36	7,89	97,87	100
Cu	61,59	-	85,17	-	70,28	-	55,93	-	0	-

En esta se observó la normalización aplicada a los valores de % en peso de los electrodos. Ver cálculo tipo en Anexo E.

#### 4.7. EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE LA EVOLUCIÓN DE HIDRÓGENO

Con el objetivo de evaluar la estabilidad de los electrodos en las soluciones de KOH e identificar la zona donde se presenta la reacción de evolución de hidrógeno se procedió a evaluar los electrodos mediante voltamperometrías cíclicas de barrido, utilizando una ventana de potencial amplia (-1750 mV +750mV vs Ag/AgCl).

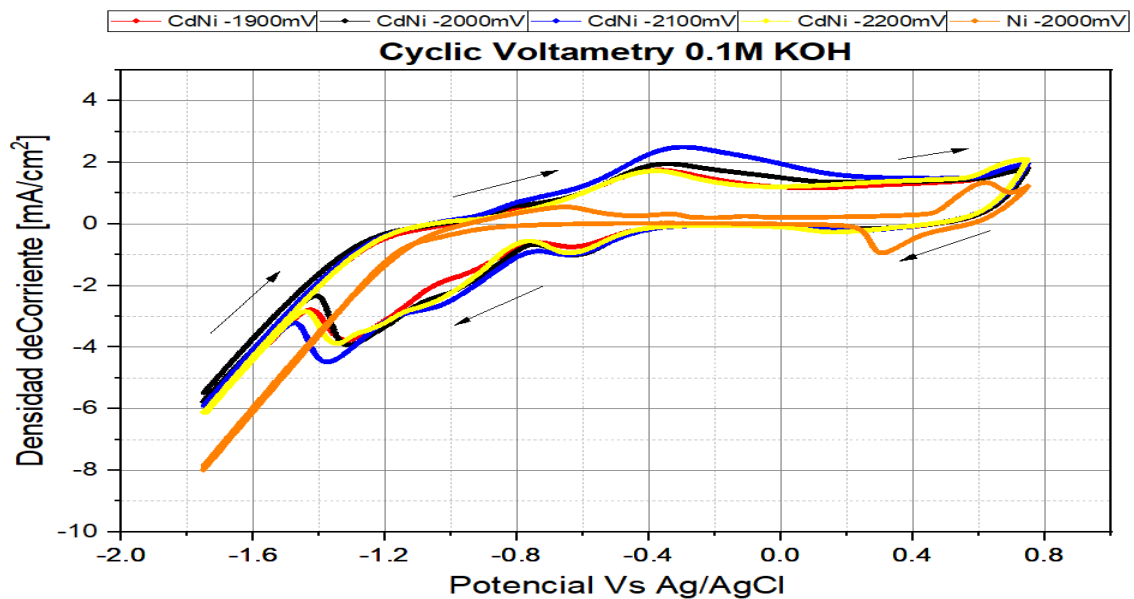
Figura 11. Voltamograma de los electrodos CdNi y Ni en 0.01M KOH pH: 12.12



Se observa que para el electrodo de níquel, utilizado como referencia, presenta estabilidad entre -800mV y +600mV aproximadamente, presentándose corrientes de oxidación para valores mayores que podrían estar relacionados con la reacción de evolución de oxígeno y en el extremo contrario, para potenciales más negativos a -800 mV se observa un incremento de la corriente en el sentido negativo,

relacionado con las reacciones de reducción, principalmente la reacción de evolución de hidrógeno. Para los electrodos de aleación Ni-Cd se observa un comportamiento similar pero con la presencia de picos de oxidación y reducción en la zona intermedia, que podrían estar relacionados con la oxidoreducción cuasireversible de compuestos presentes en la aleación. Para potenciales inferiores a -1400 mV se observa una clara tendencia a la reducción relacionada con la evolución de hidrógeno, presentando en todos los casos corrientes mayores que las observadas en el electrodo de níquel.

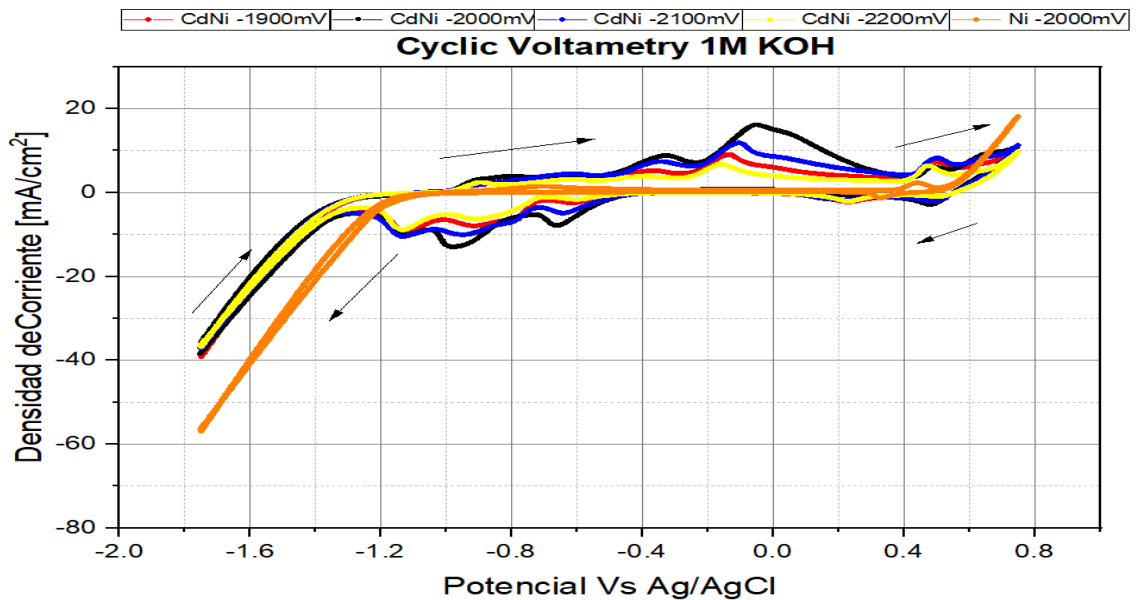
Figura 12. Voltamograma de los electrodos CdNi y Ni en 0.1M KOH pH: 13.09



Se observa que para el electrodo de níquel, utilizado como referencia, presenta estabilidad entre -600mV y +200mV aproximadamente, presentándose corrientes de oxidación para valores mayores y menores que podrían estar relacionados con la reacción de evolución de oxígeno y para potenciales más negativos a -1000 mV se observa un incremento de la corriente en el sentido negativo, relacionado con las reacciones de reducción, principalmente la reacción de evolución de hidrógeno. Para los electrodos de aleación Ni-Cd se observa un comportamiento similar pero

este presenta picos de oxidación y reducción en la zona intermedia, en mayor volumen que el ensayo anterior (0.01M KOH), que podrían estar relacionados con la oxidoreducción cuasireversible de compuestos presentes en la aleación. Para potenciales inferiores a -1400 mV se observa una clara tendencia a la reducción relacionada con la evolución de hidrógeno, presentando en todos los casos corrientes menores que las observadas en el electrodo de níquel, contrario a lo evidenciado en el voltamograma inicial con solución 0.01M KOH.

Figura 13. Voltamograma de los electrodos CdNi y Ni en 1M KOH pH: 14.30

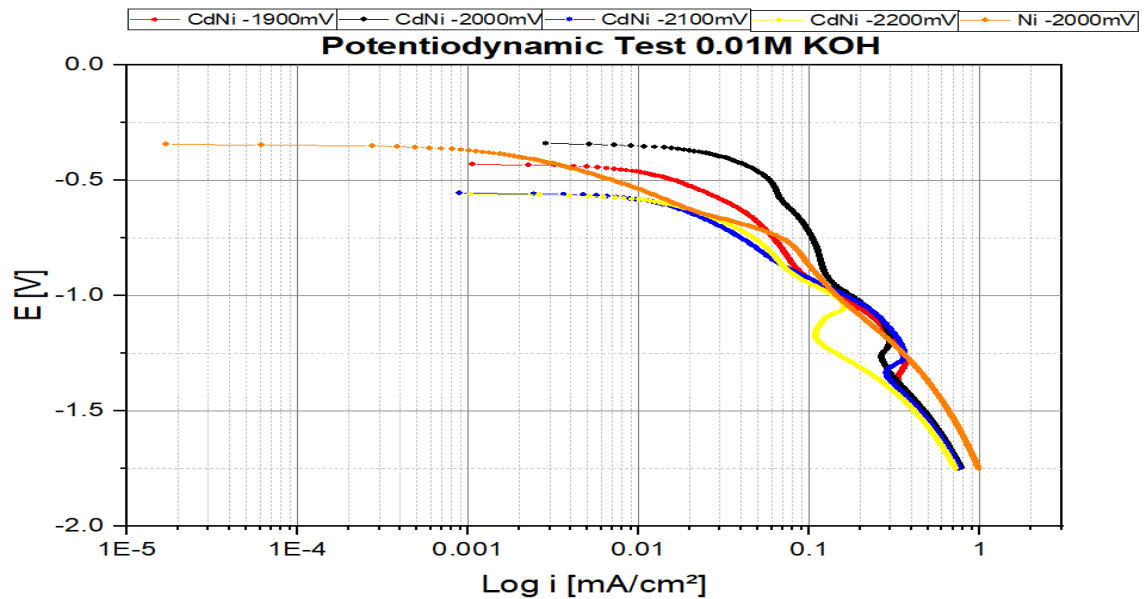


Se observa que para el electrodo de níquel, utilizado como referencia, presenta estabilidad entre -600mV y +200mV aproximadamente, presentándose corrientes de oxidación para valores mayores y menores que podrían estar relacionados con la reacción de evolución de oxígeno y en el extremo contrario, para potenciales más negativos a -1200 mV se observa un incremento de la corriente en el sentido negativo, relacionado con las reacciones de reducción, principalmente la reacción de evolución de hidrógeno. Para los electrodos de aleación Ni-Cd se observa un comportamiento disímil con respecto al electrodo de níquel, en el cual los de picos

de oxidación y reducción en la zona intermedia son mas evidentes, en mayor volumen que el ensayo anterior, que podrían estar relacionados con la oxidoreducción cuasireversible de compuestos presentes en la aleación. Para potenciales inferiores a -1400 mV se observa una clara tendencia a la reducción relacionada con la evolución de hidrógeno, presentando en todos los casos corrientes menores que las observadas en el electrodo de níquel, contrario a lo evidenciado en el voltamograma inicial con solución 0.01M KOH.

Finalmente, para analizar la reacción de evolución de hidrógeno sobre los electrodos se procedió a realizar un barrido lineal de potencial recorriendo la rama catódica a partir del potencial a circuito abierto.

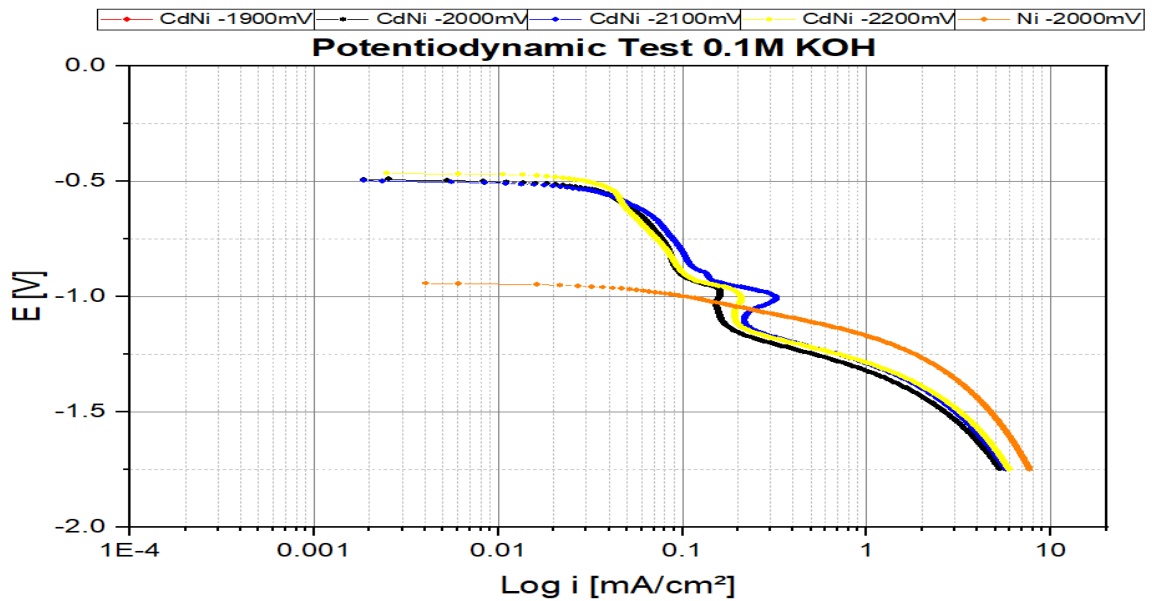
Figura 14. Ensayo potenciodinámico de los electrodos CdNi y Ni en 0.01M KOH pH: 12.12



Se observa que el potencial de equilibrio, que corresponde al potencial inicial en las curvas mostradas en la Figura 14, es similar en los electrodos CdNi -2100mV y CdNi -2200mV; en los otros casos estos difieren entre sí. Demostrando así que el potencial inicial relacionado con la estabilidad termodinámica del electrodo para las

aleaciones tienen al cadmio como elemento mayoritario, esta influenciado por el níquel presente en la aleación. Adicionalmente se evidencia que el electrodo de Ni presenta un mejor desempeño en cuanto a evolución de hidrógeno se refiere en potenciales mas electronegativos, partiendo de -1750mV hasta -1250mV, pasando este valor y aproximándose a -0.4V, su rendimiento disminuye con respecto a los electrodos CdNi -1900mV y CdNi -2000mV que mejoran su desempeño, evidenciando valores mayores de corriente.

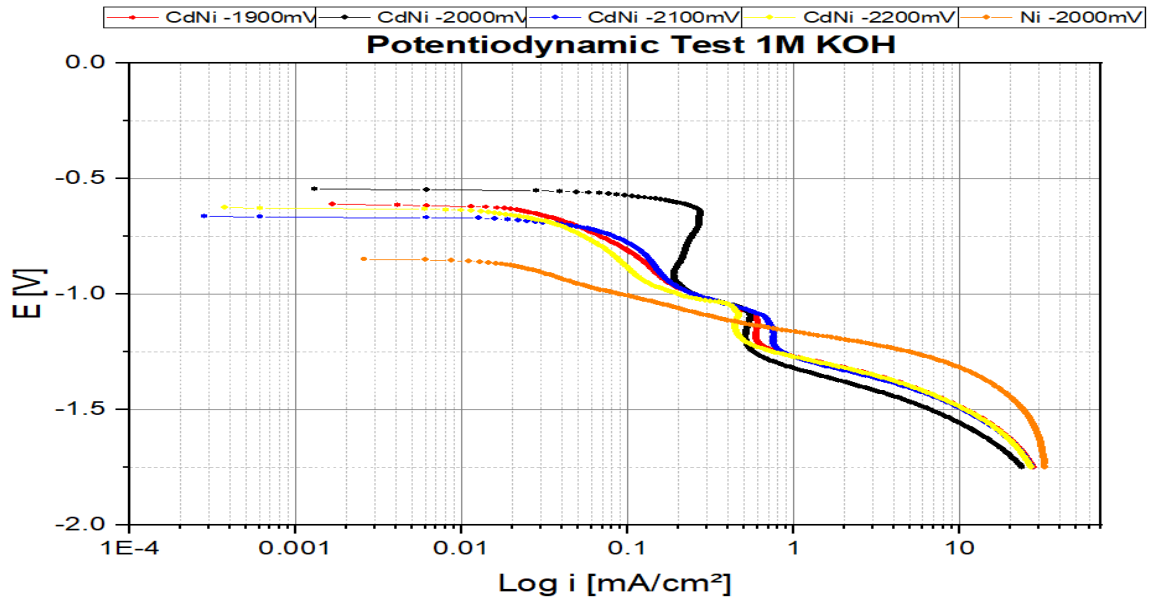
Figura 15. Ensayo potenciodinámico de los electrodos CdNi y Ni en 0.1M KOH pH: 13.09



Se observa que el potencial de equilibrio, que corresponde al potencial inicial en las curvas mostradas en la Figura 15, tiende al mismo valor en todos los electrodos CdNi; en cuanto al electrodo de níquel este difiere en gran proporción. Demostrando así que el potencial inicial relacionado con la estabilidad termodinámica del electrodo es determinado por la presencia mayoritaria de Cadmio en las aleaciones, convergiendo todas estas en un mismo potencial inicial. Adicionalmente se evidencia que el electrodo de Ni presenta un mejor desempeño en cuanto a evolución de hidrógeno se refiere en potenciales mas electronegativos, partiendo de -1750mV hasta -1050mV aproximadamente, pasando este valor y

acercándose a potenciales menos electronegativos su rendimiento disminuye con respecto a los electrodos CdNi que mejoran su desempeño, evidenciando valores mayores de corriente con un menor potencial aplicado.

Figura 16. Ensayo potenciodinámico de los electrodos CdNi y Ni en 1M KOH pH: 14.30



Se observa que el potencial de equilibrio, que corresponde al potencial inicial en las curvas mostradas en la Figura 15, es similar en los electrodos CdNi; en cuanto al electrodo de níquel este difiere en mayor proporción. Demostrando así que el potencial inicial relacionado con la estabilidad termodinámica del electrodo para las aleaciones tienen al cadmio como elemento mayoritario, esta influenciado por el níquel presente en la aleación. Adicionalmente se evidencia que el electrodo de Ni presenta un mejor desempeño en cuanto a evolución de hidrógeno se refiere en potenciales más negativos, partiendo de -1750mV hasta -1200mV aproximadamente, pasando este valor y acercándose a potenciales menos electronegativos los electrodos de CdNi evidencian un mejor rendimiento.

## 5. CONCLUSIONES

Se logró obtener una solución rica en Cd y otros metales, como Ni, a partir de la lixiviación del mineral de baterías NiCd y NiMH con la implementación de reactivos orgánicos (ácido cítrico) y altamente polares (peróxido de hidrógeno).

Se evaluaron las condiciones de deposición en las cuales se definen los valores de corriente variable, voltaje constante a -1900mV, -2000mV, -2100mV y -2200mV, con un tiempo de deposición de 30min por sustrato en la solución obtenida a partir del lixiviado de baterías; evidenciando en estos que la variación existente en la cantidad de aleación depositada es directamente proporcional al potencial aplicado.

Se obtuvieron, bajo las condiciones de deposición enunciadas anteriormente, recubrimientos con buena condición superficial (uniformidad y baja porosidad), con buena adherencia y con un acabado brillante característico de las aleaciones de Cd. Los recubrimientos obtenidos fueron analizados mediante la técnica Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS) consiguiendo así un análisis cualitativo-semicuantitativo de la composición química la cual presenta a Cd como base aleante y a Ni en una menor proporción.

Mediante las voltamperometrías cíclicas y ensayos potenciodinámicos realizados para evaluar el rendimiento que presentan los electrodos de CdNi en la producción de hidrógeno se evidencia un comportamiento que da lugar a la reacción de evolución de hidrógeno (HER) logrando su mayor rendimiento en la solución de 0.01M KOH (pH:12,12) superando incluso el rendimiento presentado por el electrodo de Ni (un buen sustituto utilizado comúnmente en esta aplicación); De esta manera se comprueba la eficiencia de los electrodos CdNi en este proceso y confirma la posibilidad de emplear estos en la producción de hidrógeno logrando así sustituir el uso de platino y níquel reduciendo costos de producción.

## 6. RECOMENDACIONES

Las características del recubrimiento a obtener dependen del potencial aplicado y el tiempo de deposición, a tiempos mas extensos el espesor de la capa formada es mayor. De esta manera se podría estudiar la relación que tiene el espesor del recubrimiento con la facilidad de producir hidrógeno variando los tiempos de deposición.

## BIBLIOGRAFÍA

ASTM E3-11, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

BARD, Allen. y HENNING, Lund, *Encyclopedia of electrochemistry of the elements* New York: Dekker, 1984, 9th ed., pp. 383-547. ISBN 082476093X

BARNAD, R. Cadmium in alkaline solution. *Journal Of Applied Electrochemistry*. 1981, 11(2), pp. 217-237. DOI BF00610984

BARTON, John. Y GAMMON, Rupert. The production of hydrogen fuel from renewable sources and its role in grid operations [En línea]. *J Power Sources*. Diciembre 2010, Vol. 195, pp.8222-8235. [Fecha de Consulta: 15 Diciembre 2019] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.100>

BESENHARD, Jurgen. *Handbook of Battery Materials*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. 1999, ISBN 3-527-29469-4

CASTELLAN, Gilbert. *Fisicoquímica*, Addison Wesley Longman de Mexico S.A. Mexico 1998. Ed. 2 pp 393-395. ISBN 968-444-316-1

DANIEL, Claus. y BESENHARD, Jurgen. *Handbook of Battery Materials*. Weinheim: Wiley-VCH.. 2013, ed. 2, Vol 1, pp. 219-221. ISBN 978-3-527-32695-2

DELVASTO, Pedro. et al. Caracterización fisicoquímica de los materiales activos presentes en pilas gastadas del tipo Ni-Cd segregadas de un lote de pilas desechadas en la ciudad de Caracas. [En línea]. Caracas, Venezuela. *Avances en Química*, Enero 2015, Vol. 10(1), pp. 11-19. [Fecha de consulta: 10 Diciembre

2019]. Disponible en:  
<https://www.researchgate.net/publication/317029906> Caracterización fisicoquímica de los materiales activos presentes en pilas gastadas del tipo Ni-Cd segregadas de un lote de pilas desechadas en la ciudad de Caracas

ĐUKIĆ, Ankica. Autonomous hydrogen production system [En línea]. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 29 junio 2015, Vol 40(24), pp. 7465-7474. [Fecha de consulta: 19 noviembre 2019]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319915002682>

FETCENKO, Michael. et al. Recent advances in NiMH battery technology [En línea]. *Journal of Power Sources*, Marzo 2007, Vol. 165(2), pp. 544-551. [Fecha de Consulta: 15 Diciembre 2019] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.036>

GARCHE, Jurgen. et al. *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Amsterdam: Elsevier. 2009, Vol 1. ISBN 978-0-444-42093-7

GROSS, S. y GLOCKING, R.J. The Cadmium electrode. A review of the status of research [Reporte técnico] Seattle, WA, United States. Boeing Co. Septiembre 1976. Final Report of Boing Aerospace Company, Document D180-19046-2.

GUPTA, Ram B. *Hydrogen Fuel: Production, transport, and storage*, New York: CRC press Taylor and Francis Group, 2009, pp. 4-6 ISBN 978-1-4200-4575-8

HOLLADAY, J. D. et al. An overview of hydrogen production technologies. [En línea]. *Catalysis Today*, 30 Enero 2009, Vol 139(4), pp. 244-260. [Fecha de consulta: 19 noviembre 2019]. Disponible en:  
<https://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2008.08.039>

KELLY, N. A. Hydrogen production by water electrolysis, En: Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution, Book 63, Macomb Community College, USA. Elsevier Ltd, 2014, pp. 159-185. 2014.

LINDEN, Daniel. y REDDY, Thomas. Handbook of Batteries. The McGraw-Hill Companies. New York, United States of America, 2002, ed. 3 ISBN 978-0071359788

MIRZAIL, M. et al. Cadmium electrodeposition on copper substrate for cyclotron production of <sup>111</sup>In radionuclide. [En línea]. Journal Of Radioanalytical And Nuclear Chemistry, 01 Mayo 2010, Vol. 284(2), pp. 333-339. [Fecha de consulta: 05 noviembre 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0448-1>

MOMIRLAN, Magdalena. et al. The Use Of Solar Energy In Hydrogen Production. [En línea]. Denver, USA. Renewable Energy, Septiembre – Diciembre 1996, Vol. 9(1-4), pp. 1258-1261. [Fecha de consulta: 19 noviembre 2019]. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88505-3](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88505-3)

PIETRELLI, Loris. et al. Characterization and leaching of NiCd and NiMH spent batteries for the recovery of metals. [En línea]. Waste Management, Vol. 25(2), 2005, pp. 221–226. [Fecha de consulta: 10 Diciembre 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.013>

PRASAD, P.V.V. THOMAS, J.M.G. NARAYANAN, S. Global Warming Effects, En: Encyclopedia of Applied Plant Sciences, Second Edition, Volume 3, Pages 289-299. 2017.

RANDHAWA, Navneet. GHARAMI, Kalpataru. y KUMAR, Manoj. Leaching kinetics of spent nickel–cadmium battery in sulphuric acid. [En línea]. *Hydrometallurgy*, Octubre 2016, Vol. 165(1), pp. 191-198. [Fecha de

consulta: 18 Diciembre 2019]. Disponible en:  
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.09.011>

REDA, Yasser. et al. Instrument of chloride ions on the pitting corrosion of electroplated steel alloy 4130. [En línea]. Ain Shams Engineering Journal, Marzo 2020, Vol. 11(1), pp. 191-199. [Fecha de consulta: 28 Marzo 2020]. Disponible en:  
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.09.002>

SHIBLI, Sheik. y SEBEELAMOL, J.N. Development of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> mixed oxide incorporated Ni-P coating for electrocatalytic hydrogen evolution reaction. [En línea]. International Journal of Hydrogen Energy, Febrero 2013, Vol. 38(5), pp. 2271-2282. [Fecha de consulta: 27 Diciembre 2019]. Disponible en:  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.009>

SKOOG, Douglas. et al. Fundamentos de Química Analítica, Ed. 9. México, D.F.: Cengage Learning, 2014, pp. 660-665. ISBN 978-0-495-55828-6.

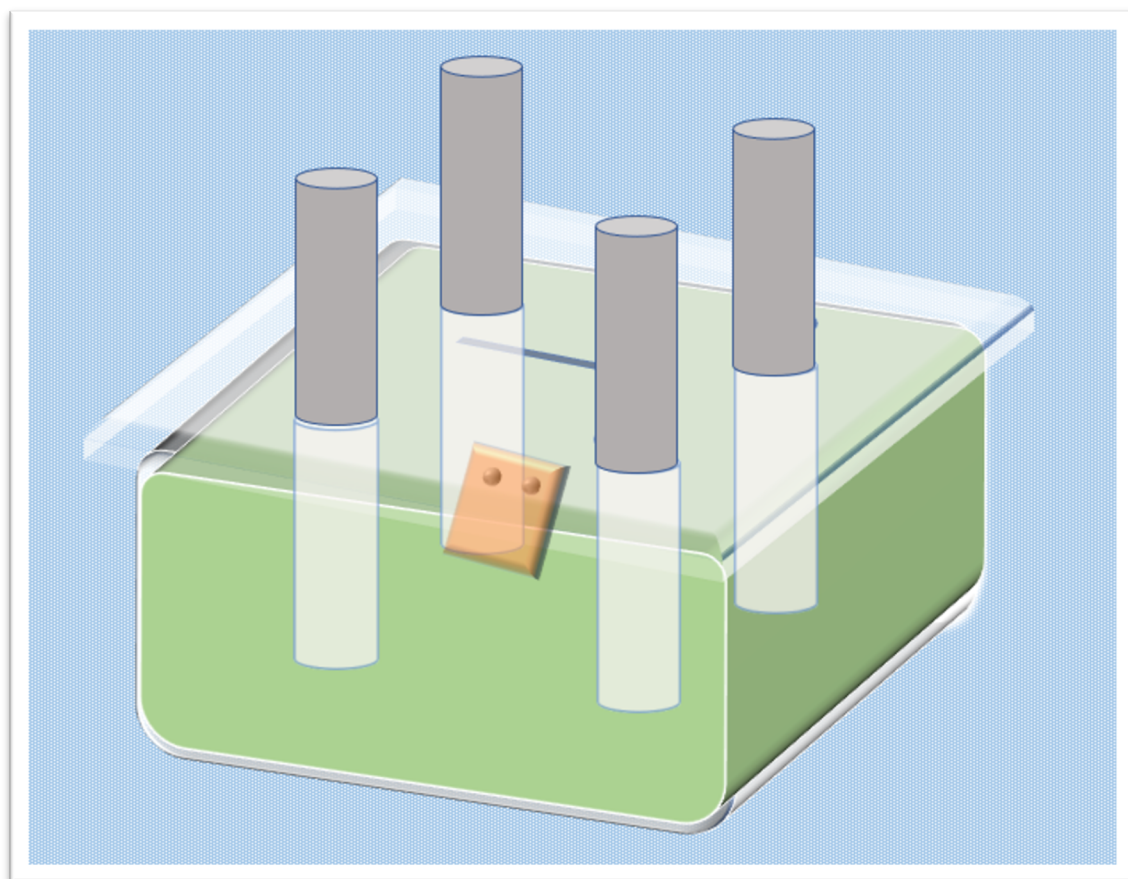
SPITLER, Mark. Chemical solution deposition of semiconductor films. [En línea]. New York: Marcel Dekker, *Journal of the American Chemical Society*. Marzo 2003, pp. 44-46. [Fecha de Consulta: 05 Diciembre 2019] Disponible en:  
<https://doi.org/10.1021/ja0253336>

TAKENO, Naoto. Atlas of Eh-pH diagrams - Intercomparison of thermodynamic databases. Open File Report of GSJ, no. 419, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan pp. 59-61, 2005.

URSUA, Alfredo. GANDIA, Luis y SANCHIS, Pabloi, "Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 410-426, Feb. 2012, doi: 10.1109/JPROC.2011.2156750.

## ANEXOS

### ANEXO A. ILUSTRACIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA EMPLEADA



### ANEXO B. CÁLCULO TIPO: PORCENTAJE DISOLUCIÓN MÁSSICO

$$\%Disolución_{(m\acute{a}sico)} = \frac{W_0 - W_f}{W_0} * 100$$

Dónde: -  $W_0$  = Masa inicial [g]  
-  $W_f$  = Masa final [g]

$$Disolución_{(m\acute{a}sico)} = \frac{6,0[g] - 1,47[g]}{6,0[g]} * 100\% = 75,5\%$$

## ANEXO C. INFORME DE RESULTADOS ABSORCIÓN ATÓMICA

Escuela  
de Química

Facultad  
de Ciencias



Universidad  
Industrial de  
Santander

### LABORATORIO INSTRUMENTAL DE ANÁLISIS QUÍMICO

Escuela de Química, Universidad Industrial de Santander,

A.A. 678, Tel/Fax: 57 7 6 349069,

Web: <http://ciencias.uis.edu.co/quimica>,

[emejia@uis.edu.co](mailto:emejia@uis.edu.co)

-6150-

### INFORME DE RESULTADOS

#### I. INFORMACIÓN GENERAL

DATOS DE LA SOLICITUD	
NÚMERO	010_AA-2020
SOLICITANTE	Andrés Felipe Monsalve
DIRECCIÓN/ CORREO ELECTRÓNICO	andmonsalve96@gmail.com
CONTACTO	Andrés Felipe Monsalve
INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS	
CANTIDAD	1
FECHA DE MUESTREO	No reporta, enviadas al laboratorio.
ANÁLISIS Y METODOLOGÍA	
ANÁLISIS	Cuantificación de cadmio por Absorción Atómica con llama
MÉTODO	Standard Methods 3111B
FORMATO PARA ENTREGA DE RESULTADOS	Formato digital en archivo PDF

FACULTAD DE CIENCIAS - ESCUELA DE QUÍMICA  
Ciudad Universitaria, Carrera 27 – Calle 9, Edificio Camilo Torres, Of. 229  
PBX: (7) 6344000 Ext. 2339 FAX: 6349069 Bucaramanga, Colombia  
Correo-e: [esqui@uis.edu.co](mailto:esqui@uis.edu.co)



**LABORATORIO INSTRUMENTAL DE ANÁLISIS QUÍMICO**

Escuela de Química, Universidad Industrial de Santander,

A.A. 678, Tel/Fax: 57 7 6 349069,

Web: <http://ciencias.uis.edu.co/quimica>,

emejia@uis.edu.co

-6150-

**2. RESULTADOS**

Tabla 1. Tabla de resultados

Muestra	Metal analizado	R	Absorbancia de la muestra	Concentración obtenida (mg/L)
010_AA-2020-1	Cd	0.9987	0.18	138.7

**Nota:** La muestra se diluyó a un factor de dilución 1 en 100. El valor reportado en la tabla de resultados ya tiene el factor aplicado, por tanto, la concentración obtenida es la de la muestra original.

Fin del informe.

**Dr. Enrique Mejía Ospino**

Coordinador Laboratorio Instrumental de Análisis Químico

emejia@uis.edu.co

UIS

## ANEXO D. CÁLCULO TIPO: EFICIENCIA DE DEPOSICIÓN

- CdNi -1900mV cuya composición es 88.52% de Cadmio y 11.48% de Níquel.

$$m_{Cd} = \frac{112,40 \frac{g}{mol} \times 1,574 \frac{C}{cm^2} \times 3,93 \text{ cm}^2}{2 \times 96485,336 \frac{C}{mol}} = 3,60 \times 10^{-3} \text{ g} \times \frac{88,52}{100} = 3,18 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$m_{Ni} = \frac{58,71 \frac{g}{mol} \times 1,574 \frac{C}{cm^2} \times 3,93 \text{ cm}^2}{2 \times 96485,336 \frac{C}{mol}} = 1,88 \times 10^{-3} \text{ g} \times \frac{11,48}{100} = 2,16 \times 10^{-4} \text{ g}$$

$$m_{CdNi} = m_{Ni} + m_{Cd} \Rightarrow 3,39 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$\%Eficiencia_{Dep} = \frac{m_{Ganancia}}{m_{Faraday}} * 100 \Rightarrow \frac{3 \times 10^{-3}}{3,39 \times 10^{-3}} * 100 = 88,49\%$$

- CdNi -2000mV cuya composición es 92.55% de Cadmio y 7.45% de Níquel.

$$m_{Cd} = \frac{112,40 \frac{g}{mol} \times 2,379 \frac{C}{cm^2} \times 3,93 \text{ cm}^2}{2 \times 96485,336 \frac{C}{mol}} = 5,44 \times 10^{-3} \text{ g} \times \frac{92,55}{100} = 5,03 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$m_{Ni} = \frac{58,71 \frac{g}{mol} \times 2,379 \frac{C}{cm^2} \times 3,93 \text{ cm}^2}{2 \times 96485,336 \frac{C}{mol}} = 2,84 \times 10^{-3} \text{ g} \times \frac{7,45}{100} = 2,11 \times 10^{-4} \text{ g}$$

$$m_{CdNi} = m_{Ni} + m_{Cd} \Rightarrow 5,24 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$\%Eficiencia_{Dep} = \frac{m_{Ganancia}}{m_{Faraday}} * 100 \Rightarrow \frac{4 \times 10^{-3}}{5,24 \times 10^{-3}} * 100 = 76,33\%$$

- CdNi -2100mV cuya composición es 93.80% de Cadmio y 6.20% de Níquel.

$$m_{Cd} = \frac{112,40 \frac{g}{mol} \times 4,242 \frac{C}{cm^2} \times 3,93 \text{ cm}^2}{2 \times 96485,336 \frac{C}{mol}} = 9,71 \times 10^{-3} \text{ g} \times \frac{93,80}{100} = 9,11 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$m_{Ni} = \frac{58,71 \frac{g}{mol} \times 4.242 \frac{C}{cm^2} \times 3,93 \text{ cm}^2}{2 \times 96485,336 \frac{C}{mol}} = 5,07 \times 10^{-3} \text{ g} \times \frac{6,20}{100} = 3,14 \times 10^{-4} \text{ g}$$

$$m_{CdNi} = m_{Ni} + m_{Cd} \Rightarrow 9,42 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$\%Eficiencia_{Dep} = \frac{m_{Ganancia}}{m_{Faraday}} * 100 \Rightarrow \frac{7 \times 10^{-3}}{9,42 \times 10^{-3}} * 100 = 74,31\%$$

- CdNi -2200mV cuya composición es 92.11% de Cadmio y 7.89% de Níquel.

$$m_{Cd} = \frac{112,40 \frac{g}{mol} \times 8,528 \frac{C}{cm^2} \times 3,93 \text{ cm}^2}{2 \times 96485,336 \frac{C}{mol}} = 19,52 \times 10^{-3} \text{ g} \times \frac{92,11}{100} = 17,73 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$m_{Ni} = \frac{58,71 \frac{g}{mol} \times 8,528 \frac{C}{cm^2} \times 3,93 \text{ cm}^2}{2 \times 96485,336 \frac{C}{mol}} = 10,19 \times 10^{-3} \text{ g} \times \frac{7,89}{100} = 8,04 \times 10^{-4} \text{ g}$$

$$m_{CdNi} = m_{Ni} + m_{Cd} \Rightarrow 18,53 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$\%Eficiencia_{Dep} = \frac{m_{Ganancia}}{m_{Faraday}} * 100 \Rightarrow \frac{14 \times 10^{-3}}{18,53 \times 10^{-3}} * 100 = 75,53\%$$

- Ni -2000mV cuya composición es 100% Níquel.

$$m_{Ni} = \frac{58,71 \frac{g}{mol} \times 70,200 \frac{C}{cm^2} \times 3,93 \text{ cm}^2}{2 \times 96485,336 \frac{C}{mol}} = 83,93 \times 10^{-3} \text{ g} \times \frac{100}{100} = 83,93 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$\%Eficiencia_{Dep} = \frac{m_{Ganancia}}{m_{Faraday}} * 100 \Rightarrow \frac{67 \times 10^{-3}}{83,93 \times 10^{-3}} * 100 = 79,82\%$$

## ANEXO E. CALCULO TIPO: NORMALIZADO COMPOSICIÓN DE ELECTRODOS

- CdNi -1900mV

$$\%Ni_{normalizado} = \frac{4,19}{4,19+32,33} * 100 = 11,47\%$$

$$\%Cd_{normalizado} = \frac{32,33}{4,19+32,33} * 100 = 88,53\%$$

- CdNi -2000mV

$$\%Ni_{normalizado} = \frac{1,01}{1,01+12,56} * 100 = 7,44\%$$

$$\%Cd_{normalizado} = \frac{12,56}{1,01+12,56} * 100 = 92,56\%$$

- CdNi -2100mV

$$\%Ni_{normalizado} = \frac{1,75}{1,75+26,49} * 100 = 6,20\%$$

$$\%Cd_{normalizado} = \frac{26,49}{1,75+26,49} * 100 = 93,80\%$$

- CdNi -2200mV

$$\%Ni_{normalizado} = \frac{3,36}{3,36+39,22} * 100 = 7,89\%$$

$$\%Cd_{normalizado} = \frac{39,22}{3,36+39,22} * 100 = 92,11\%$$

- Ni -2000mV

$$\%Ni_{normalizado} = \frac{97,87}{97,87+0} * 100 = 100\%$$