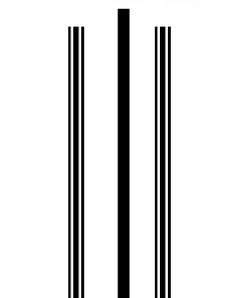




**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**



INGENIERÍA

QUÍMICA



**“RECUPERACIÓN DE COBALTO - NÍQUEL DE UN
LIXIVIADO SINTÉTICO (Co-Ni) EN UN REACTOR
ELECTROQUÍMICO DE ELECTRODO DE CILINDRO
ROTATORIO ESCALA LABORATORIO.”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

IRVIN RIVERA HERNÁNDEZ

**DIRECTOR DE TESIS
M. EN IQ. FRANCISCO JAVIER ALMAZÁN
RUIZ**



CIUDAD DE MÉXICO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos.

*A mi asesor de tesis el **M en I.Q. Francisco Javier Almazán Ruiz**, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también haberme tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante el desarrollo de este proyecto y por brindarme un ambiente de trabajo amistoso.*

A mis amados padres, que me han instado y brindado lo necesario para llegar hasta donde estoy, siendo el soporte necesario para mi desarrollo. Amor, abrazos, retos, castigos y miradas, dieron sus frutos y me ayudaron a llegar a donde estoy. Han sido un verdadero apoyo en cada aventura que he decidido emprender. Los amo.

*En especial a mi madre **Reina I. Hernández Soriano**, por cada día hacerme ver la vida de una forma diferente y, a pesar de ser como soy, confiar en mis decisiones.*

*En especial a mi padre **René Rivera Hernández**, por haberme enseñado el valor del trabajo, que con esfuerzo y constancia todo se consigue, y que en esta vida nadie regala nada.*

*A mis amados hermanos: **Andrea, Humberto y Carlos**, por todos los momentos gratos que hemos pasado juntos y por toda la ayuda que me han proporcionado.*

*A mis tíos: **Manuel Zúñiga y Ma. Elena Hernández** por todo el apoyo brindado y por todos los felices momentos que hemos pasado juntos.*

*Al **Programa Universitario de Estudios de la Diversidad Cultural y la Interculturalidad** por todo el apoyo brindado a lo largo de mi desarrollo profesional, en especial a mi tutora **Andrea Gómez** por brindarme confianza, amistad y cariño.*

*A mis amigos: **Dulce I. Vázquez, Jessica J. Barragán, Liliana Hernández, Jesús A. Santiago y Raúl Vidal**, que en todo momento estuvieron a mi lado.*

Resumen.

El problema mundial actual de la contaminación del medio ambiente por metales pesados que provienen de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) ha generado el desarrollo de procesos para el reciclaje de éstos, tanto para evitar su introducción al medio ambiente como por razones económicas, dado que los metales contenidos en éstos son valiosos. En México se han iniciado diversos programas enfocados a la recolección de los RAEE, sin embargo, se contempla enviar los desechos para su confinamiento, de ahí la importancia de plantear procesos para la recuperación de los materiales útiles contenidos en dichos residuos.

En la literatura se reportan diversas metodologías enfocadas a la recuperación de metales a partir de pilas de desecho, principalmente por vías pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas, como las utilizadas en el tratamiento de menas minerales.

En el presente trabajo se analiza la electrodeposición de la aleación Co-Ni contenida en un licor obtenido de la lixiviación de pilas gastadas con el objetivo de determinar las condiciones de operación de un RCE-LC. El estudio se realizó en tres partes: (a) caracterización fisicoquímica y termodinámica de la solución problema, (b) caracterización electroquímica vía micro electrólisis (RDE, acero inoxidable S316) de la solución modelo y (c) la recuperación de Co-Ni del efluente.

De la caracterización fisicoquímica y termodinámica de la solución problema se obtuvieron las ventanas de trabajo en cuanto a pH para la electrólisis de la solución problema ($4.5 < \text{pH} < 5.5$) y también se supo que la reducción del Níquel se llevará a cabo antes que la del Cobalto, mientras que con la caracterización

electroquímica vía micro electrólisis de la solución modelo se seleccionó un valor de corriente de -1.7 A para llevar a cabo los estudios de macro electrólisis en el reactor. Con estos datos se procedió a la recuperación de Co-Ni del lixiviado en el RCE-LC y se obtuvieron los perfiles de concentración que se presentan a tres diferentes velocidades de rotación (300, 500 y 700 RPM) de los cuales se observó que para 500 RPM se tiene el mayor porcentaje de recuperación así como la mayor eficiencia.

Índice

| | |
|---|----|
| Agradecimientos..... | 2 |
| Resumen..... | 3 |
| Índice..... | 4 |
| Lista de figuras..... | 7 |
| Lista de tablas..... | 8 |
| Capítulo I: Marco teórico..... | 9 |
| 1.1 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos..... | 9 |
| 1.1.1 Panorámica mundial..... | 13 |
| 1.1.2 Panorámica nacional..... | 14 |
| 1.2 Acumuladores de níquel-hidruro metálico (Ni-HM)..... | 16 |
| 1.3 Alternativas tecnológicas para la recuperación de metales contenidos en los RAEE..... | 17 |
| 1.3.1 Tratamiento pirometalúrgico..... | 17 |
| 1.3.2 Tratamiento hidrometalúrgico..... | |
| 1.3.3 Remoción electrolítica de metales pesados mediante el uso de un reactor electroquímico..... | 20 |
| 1.4 Principios fundamentales de los reactores electroquímicos..... | 22 |
| 1.5 Fenómenos de transporte en los procesos electroquímicos..... | 27 |
| 1.5.1 Mecanismo general de depósito de metales..... | 27 |
| 1.5.2 Transporte de carga..... | 29 |
| 1.5.3 Transporte de masa..... | 31 |
| 1.6 Tipos de reactores..... | 32 |

| | |
|---|----|
| 1.6.1 Reactor Batch..... | 32 |
| 1.6.2 Reactor de flujo continuo en estado estacionario..... | 33 |
| 1.6.3 Reactores electroquímicos tipo cilindro rotatorio..... | 33 |
| 1.6.4 Reactores electroquímicos de placas paralelas o reactores tipo filtro prensa (FM01)..... | 35 |
| Capítulo II: Objetivos..... | 37 |
| Objetivo General..... | 37 |
| Objetivos particulares..... | 37 |
| Capítulo III: Experimental..... | 38 |
| 3.1 Caracterización fisicoquímica y termodinámica del lixiviado de baterías..... | 38 |
| 3.1.1 Métodos fisicoquímicos..... | 38 |
| 3.1.2 Método termodinámico..... | 39 |
| 3.2 Caracterización electroquímica por microelectrólisis..... | 39 |
| 3.2.1 Experimentos de microelectrólisis..... | 39 |
| 3.3 Recuperación de Co-Ni en el RCE-LC..... | 41 |
| Capitulo IV: Análisis y discusión de resultados..... | 44 |
| 4.1 Diagrama tipo Pourbaix..... | 44 |
| 4.2 Caracterización electroquímica..... | 48 |
| 4.3 Corriente muestreada..... | 53 |
| 4.4 Recuperación de Co-Ni en el RCE-LC..... | 56 |
| Conclusiones..... | 62 |
| Referencia bibliográfica..... | 63 |
| Anexos..... | 67 |

Lista de figuras.

| | |
|--|----|
| Figura 1.- Materiales valorizables de los equipos electrónicos más comúnmente utilizados..... | 12 |
| Figura 2.- Esquema del mecanismo de una reacción de electrodeposición metálica en la superficie de un electrodo..... | 28 |
| Figura 3.- Reactor de electrodo de cilindro rotatorio..... | 34 |
| Figura 4.- FM01-LC..... | 36 |
| Figura 5.- Esquema del reactor electroquímico para la recuperación del Co-Ni... | 42 |
| Figura 6.- Diagrama tipo Pourbaix (PTDZ) para Cobalto..... | 45 |
| Figura 7.- Diagrama tipo Pourbaix (PTDZ) para Níquel..... | 46 |
| Figura 8.- Diagrama tipo Pourbaix (PTDZ) para el sistema Co-Ni..... | 47 |
| Figura 9.- Voltamperograma..... | 48 |
| Figura 10.- Voltamperograma..... | 49 |
| Figura 11.- Voltamperograma..... | 50 |
| Figura 12.- Voltamperograma..... | 51 |
| Figura 13.- Voltamperograma..... | 52 |
| Figura 14.- Voltamperograma..... | 53 |
| Figura 15.- Curvas $I_{muestreada}$ vs t a diferentes potenciales y 400 RPM..... | 54 |
| Figura 16.- Curvas $I_{muestreada}$ vs E / V vs NHE a velocidades de agitación de 400, 600, 800 y 1000 RPM..... | 55 |
| Figura 17.- Decaimiento de concentración normalizada para Cobalto..... | 56 |
| Figura 18.- Decaimiento de concentración normalizada para Níquel..... | 57 |

Figura 19.- Potencial Anódico, Catódico y de Celda y corriente utilizada en el proceso.....59

Figura 20.- Eficiencia de corriente con respecto al tiempo de electrólisis.....61

Lista de tablas

Tabla 1.- Generación de RAEE en 2010 en la Zona Metropolitana del Valle de México.....15

CAPITULO I

Marco Teórico.

1.1 Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE).

RAEE es un nuevo tipo de desechos urbanos: los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. También, se les suele denominar de manera informal como e-desechos o basura electrónica o en inglés como e-waste o por la sigla WEEE (Waste Electrical Electronic Equipment). La denominación RAEE incluye a todos los aparatos eléctricos y electrónicos que se acercan al final de su "vida útil" y pasan a ser residuos, considerando todos aquellos componentes y subconjuntos que forman parte del producto en el momento que se desecha. Muchos de estos productos se pueden reutilizar, restaurar o reciclar.

Partiendo de la base de que cualquier equipo que necesita electricidad para trabajar es un equipo eléctrico o electrónico, es válido decir que cada producto eléctrico o electrónico consiste básicamente en una combinación de módulos, los cuales son similares para todos los equipos de estas características. Los módulos son los conjuntos de circuitos impresos, cables, alambres, plásticos, conductores flexibles, algún dispositivo que permita la visualización como los tubos de rayos catódicos o las pantallas de cristal líquido, además de los acumuladores, baterías, medios de almacenamiento de datos, algún elemento que genere luz, los resistores, sensores, conductores y capacitancias. Dentro de todos estos componentes los más problemáticos, desde el punto de vista medioambiental, son aquellos que contienen metales pesados tales como

Mercurio, Plomo, Cadmio, Cromo, sustancias halogenadas como CFCs, PCBs, PVCs, algún retardador de llama o también Amianto y Arsénico.

Se estima que cerca del 75 por ciento de los aparatos electrónicos viejos se encuentra almacenado en casas y oficinas ocupando espacio (en armarios, cajones, cuartos enteros), incomodando y generando un despilfarro de recursos. Esto sucede, en parte, debido a la incertidumbre de no saber cómo manejar estos materiales.

Los RAEE se ordenan, desde el punto de vista de la producción, comercialización y consumo, en distintas "líneas" de aparatos: línea blanca, línea marrón y línea gris.

La línea blanca hace referencia a los electrodomésticos relacionados con el frío, el lavado, la cocción y el confort. La línea marrón comprende a los aparatos de consumo: televisión, radio, videos, etc. Mientras que la línea gris abarca a todos los equipos de informática y comunicación: computadoras, teléfonos, celulares, monitores, etc.

Los elementos que encontramos en mayor cantidad en este tipo de aparatos son: Plomo, Estaño, Cobre, Silicio, Carbono, Hierro y Aluminio. En menor cantidad hallamos Cadmio y Mercurio y en pequeñas trazas Germanio, Galio, Bario, Níquel, Tantalio, Indio, Vanadio, Terbium, Berilio, Oro, Europio, Titanio, Rutenio, Cobalto, Paladio, Manganeso, Plata, Antimonio, Bismuto, Selenio, Itrio, Rodio, Platino,

Arsénico, Litio, Boro y Americio. Todos estos elementos mal tratados pueden convertirse en potencialmente contaminantes y tóxicos.

En sí, estos equipos correctamente tratados no representan una amenaza para el medio ambiente. En general, la mayoría de los materiales que contienen estos equipos son reutilizables y/o reciclables como se muestra en la figura 1. Los problemas aparecen cuando no se toman las precauciones debidas. Dentro de los aparatos están confinados los posibles componentes tóxicos y sólo mediante una liberación química o física llegan a contaminar el ambiente.

La situación se soluciona con una correcta gestión: no deben ser arrojados con los residuos domiciliarios comunes y corresponde acercarlos a los lugares donde reciben el tratamiento adecuado. Sin embargo, estas acciones no se realizan con frecuencia. Se carece de una gestión adecuada de la basura electrónica y por este motivo se ven afectados el medio ambiente y la salud.

La mayoría de los aparatos termina en rellenos sanitarios, siendo incinerados o arrojados a basureros a cielo abierto. Para gran cantidad de empresas es más simple y económico arrojarlos a la basura ordinaria o “donarlos”, en lugar de enviarlos para que sean tratados correctamente. Allí es donde comienzan los problemas, debido a que las sustancias tóxicas pueden llegar a afectar recursos como el suelo, el aire y el agua. Dependiendo de las condiciones, estas pueden ser lixiviadas a la tierra o liberadas a la atmósfera en procesos de mala incineración y sumado a esto, pueden producir y liberar furanos y dioxinas.

El impacto, en cualquier caso, recae en el medio ambiente y en las comunidades vecinas. Por lo general, las sustancias penetran en los mantos acuíferos de las zonas aledañas, contaminan los suelos y polucionan el aire de las ciudades. Incluso, si los productos permanecen almacenados en los hogares generan un efecto indirecto en el medio ambiente, por contener metales importantes que pueden ser reciclados. En consecuencia, se genera mayor contaminación por la necesidad de extraer grandes cantidades de estos metales.

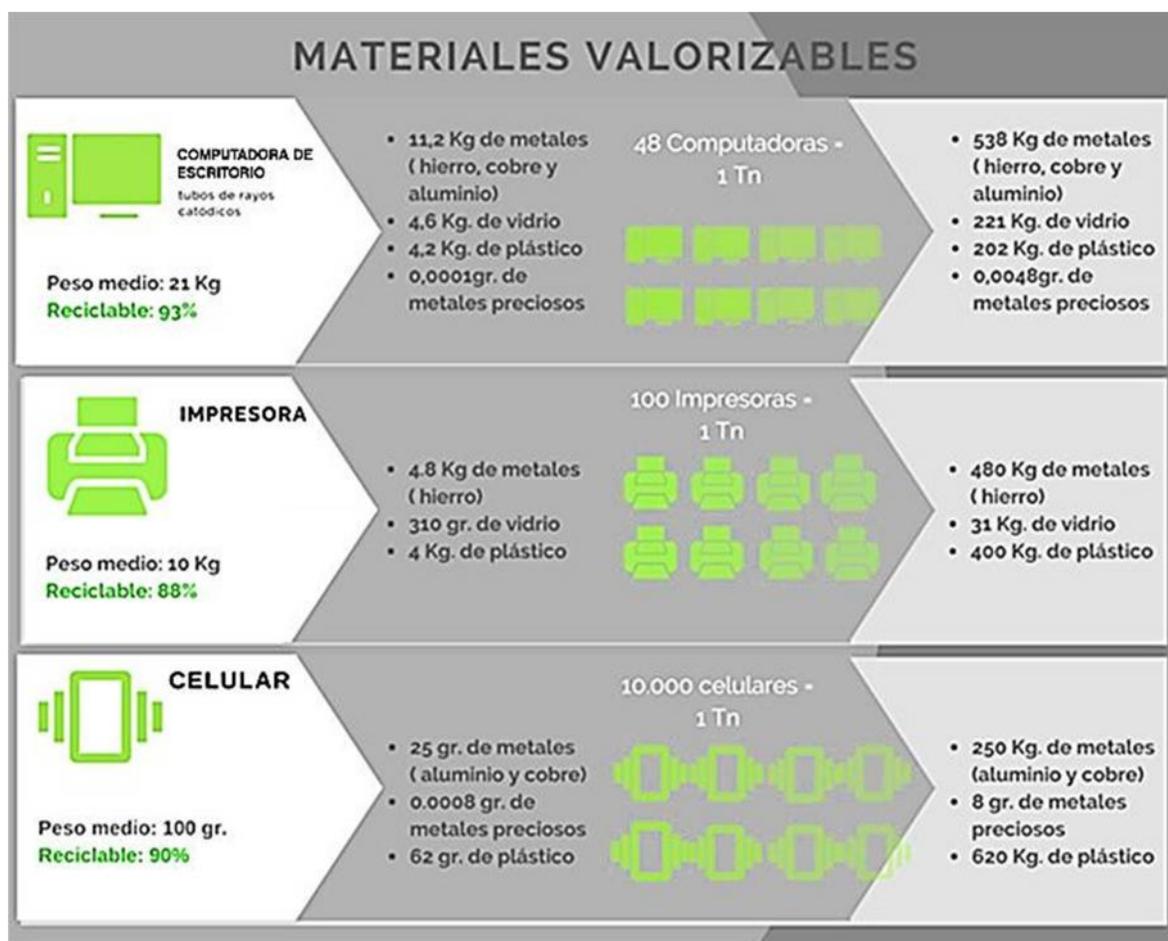


Figura 1.- Materiales valorizables de los equipos electrónicos más comúnmente utilizados [12].

1.1.1 Panorámica mundial.

Al año se generan 40 millones de toneladas de basura electrónica en todo el mundo, lo que supone, según Greenpeace, el 5% de los residuos sólidos urbanos, y crece con rapidez. En Europa a un ritmo de entre el 3 y el 5% al año. Televisores, cámaras, ordenadores, frigoríficos, teléfonos, entre otros forman esos residuos que se dan por inservibles, y que son reemplazados por unidades que incorporan los últimos avances tecnológicos.

El destino de estos deshechos es, en muchos casos, incierto. La mayoría se abandona o se despieza. Es la conclusión a la que llegó la OCU (Organización de Consumidores y Usuarios) tras seguir la pista a varios electrodomésticos usados y, desafortunadamente, es la misma que ha obtenido después de realizar de nuevo esta investigación. Incluso con peores resultados. En el precio final de los aparatos eléctricos se incluye un canon destinado a financiar su reciclaje, y que reciben fabricantes y distribuidores.

Desde el año 2005 España incorporó a su legislación una directiva europea de 2002 por la que se establecían las medidas para regular la gestión de residuos electrónicos.

El problema es que todos esos aparatos electrónicos contienen sustancias tóxicas perjudiciales para la salud y el medio ambiente, y su inadecuado tratamiento aumenta su peligro potencial, que repercute, sobre todo, en los países más pobres. Los envíos al extranjero de este tipo de residuos están prohibidos desde

1989 por un acuerdo internacional recogido en la Convención de Basilea. Sin embargo, se incumple de manera reiterada.

Gran parte de la basura electrónica de los países ricos se envía a África y Asia en contenedores de carga, junto con equipos nuevos, cuya importación y exportación sí está permitida. Los autores de este acuerdo, Atiemo Samson –investigador de la Comisión de Energía Atómica de Ghana– y Ruediger Kuehr –de la Universidad de las Naciones Unidas en Alemania–, advierten que la mayoría de estos residuos se destruyeron sin seguir las medidas de seguridad adecuadas, con los riesgos que esto supone para la salud.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente ya ha advertido de forma reiterada de la necesidad de tomar medidas urgentes, sobre todo en países como China, India y Brasil, donde su crecimiento es exponencial.

Sus expertos estiman que para 2020 el volumen de los residuos procedentes de ordenadores desechados crecerá un 500% en India con respecto a 2007; y en China y Sudáfrica, el 400%. En ese mismo año, la cantidad de teléfonos móviles jubilados en India y China será 18 y 7 veces mayor que la actual, respectivamente; mientras que los televisores y frigoríficos retirados en ambos países se habrán multiplicado por dos o tres.

1.1.2 Panorámica nacional.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), en 2014 se

generaron en nuestro país alrededor de 358 mil toneladas de este tipo de residuos electrónicos. El INECC estima que del total de residuos electrónicos generados en México, se recicla sólo el 10% de manera formal, mientras que un 40% permanece almacenado en casas habitación y bodegas. El otro 50% llega a estaciones de transferencia o a manos de recicladores informales (*chatarros*), rellenos sanitarios o tiraderos no controlados.

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), los consumidores de aparatos electrónicos y eléctricos desechan los equipos que ya no utilizan de la siguiente manera: 42% los entrega al camión de la basura, 30% los regala, 11% los almacena, y el 17% los vende. El INECC estima que en la ZMVM se generan 13, 216,422 aparatos, lo que equivale a 112,490 toneladas anuales de estos residuos como se muestra en la tabla 1. Esto representa el 37% del total de los electrónicos generados en el país.

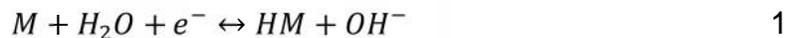
| Aparato electrónico | Generación (unidades) | Generación (toneladas) |
|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Televisores | 2, 944, 865 | 65, 376 |
| Aparatos de sonido | 1, 466, 800 | 7, 334 |
| Teléfonos fijos | 1, 752, 857 | 1,227 |
| Teléfonos celulares | 5, 150, 000 | 515 |
| Computadoras | 1, 901, 900 | 38, 038 |
| Totales | 13, 216, 422 | 112, 490 |

Tabla 1.- Generación de RAEE en 2010 en la Zona Metropolitana del Valle de México [15].

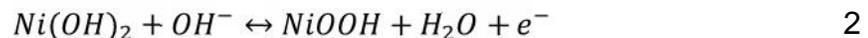
1.2 Acumuladores de níquel-hidruro metálico (Ni-HM).

Las baterías Ni-HM fueron desarrolladas en 1989 y comercializadas en 1990 en Japón. Son pilas secundarias que tienen una estructura similar a las de Ni-Cd, donde el Cd ha sido reemplazado por una aleación metálica capaz de almacenar hidrógeno. De acuerdo a Zhan et, al. [35], el electrodo positivo se construye de una placa porosa de Ni con hidróxido de níquel como agente activante y el negativo consiste de una malla metálica (Mm) que contiene una aleación en polvo capaz de almacenar hidrógeno (Mm-Ni-Co). El electrolito es hidróxido de potasio. Los dos electrodos están separados por una capa de material inerte. Por otro lado, las reacciones químicas de los electrodos se pueden expresar por las ecuaciones siguientes:

Reacción catódica:



Reacción anódica:



Reacción global:



Donde la dirección hacia la derecha es la reacción de carga y la inversa es la reacción de descarga. M representa la aleación para ser hidratada. La densidad de energía producida por las pilas Ni-HM es el doble de la producida por las pilas de Ni-Cd, a voltajes operativos similares, por lo que representan la nueva generación de pilas recargables. Las mejoras son evidentes, no solo por la densidad de energía generada, sino también porque son menos tóxicas para el

medio ambiente y no contienen el efecto de memoria que tienen las Ni-Cd, esto es, si se recargan antes de haber sido totalmente agotadas se estropean [34].

1.3 Alternativas tecnológicas para la recuperación de metales contenidos en los RAEE.

1.3.1 Tratamiento pirometalúrgico.

Este proceso consiste en fundir los residuos electrónicos pre-tratados dentro de un horno a temperaturas muy elevadas, y que actualmente sigue siendo el proceso más utilizado para la recuperación de los metales contenidos en los RAEE. Principalmente se recupera el cobre contenido en los residuos además de ciertas porciones de metales preciosos, como plata, oro, platino y paladio; que a través de la fundición se disuelven en el cobre. El hierro y el aluminio no se recuperan en este proceso y terminan como escorias del mismo [1].

La ventaja de los residuos electrónicos es que pueden ser procesados en hornos pequeños, sin embargo, en los procesos industriales más comunes se realiza un coprocesamiento de éstos con concentrados de sulfuro de cobre en grandes hornos de fundición, como por ejemplo en el proceso Noranda [2].

En la actualidad destacan cuatro grandes compañías en la recuperación de metales a través de esta tecnología: Boliden, Xstrata Copper (antes Noranda), Aurubis y Umicore. Muchos de los residuos electrónicos son enviados a las plantas de estas compañías para ser tratados y recuperar los metales que contienen, tres de éstas se encuentran en Europa (Boliden-Suecia, Aurubis-Alemania, Umicore-Bélgica) y una se encuentra en América (Xstrata Copper-Canada). Algunas plantas que utilizan esta misma tecnología pero de menor

capacidad de tratamiento se encuentran en Japón y Corea del Sur. Cabe destacar que en Estados Unidos no se cuenta con ninguna planta de este tipo, siendo todavía el mayor generador de RAEE en el mundo [3].

El proceso que se lleva a cabo en estos complejos de tratamiento se describe de manera general a continuación:

1. Etapa de fundición: Una vez que se lleva a cabo todo el pretratamiento requerido para los residuos electrónicos tratados, éstos se colocan en un fundidor, que trabaja a temperaturas muy elevadas y produce una solución de cobre con sulfuro de hierro (llamada mate) mientras el hierro y otros óxidos forman una solución conocida como escoria. Los metales preciosos están contenidos en la solución mate, la cual es llevada a la etapa de conversión. La solución llamada escoria es tratada a través de un horno de plomo, refinería de plomo o una planta para metales especiales. Cabe destacar que los componentes más valiosos que se separan desde el pretratamiento, como se mencionó anteriormente, son enviados directamente al convertidor sin la necesidad de fundirse.

2. Etapa de conversión: La solución mate se lleva entonces a un convertidor para obtener como producto principal una solución de cobre impuro, conocida como “cobre blister”.

3. Horno anódico: El cobre blister líquido es refinado dentro de los hornos anódicos; primero es moldeado dentro de los ánodos que son posteriormente electrorefinados para obtener cobre puro.

4. Electrorrefinación: Durante el proceso, los ánodos de cobre producidos en el horno anódico son refinados para producir cátodos de cobre puro y obtener

metales preciosos como plata, oro, selenio y telurio en forma de precipitados al fondo de la celda de Electrorrefinación.

5. Refinación de los metales preciosos: Los precipitados de metales preciosos son fundidos y refinados, con procesos más específicos para cada metal según sea requerido, para producir lingotes de éstos metales preciosos [1].

Los componentes plásticos obtenidos de los RAEE no pueden reciclarse fácilmente debido a que se mezclan con retardantes de flama, pigmentos y otras mezclas de polímeros. Sin embargo, los procesos de fundición son capaces de utilizar la energía calorífica contenida en los plásticos, debido a la combustión de éstos en la corriente de alimentación lo que reduce parcialmente la necesidad de los combustibles fósiles [4].

Aunque el tratamiento pirometalúrgico es el método más utilizado, tiene algunas desventajas:

- No se pueden recuperar ciertos componentes como los chips o las tarjetas de fibra de vidrio.
- Tampoco pueden recuperarse el aluminio y el hierro contenidos en los residuos electrónicos debido a que se oxidan y terminan en la escoria del proceso.
- Al fundir los retardantes de flama y el PVC que contienen los RAEE se propicia la formación de dioxinas, por lo que se requiere de un control de emisiones.
- Se debe utilizar el proceso hidrometalúrgico de manera subsecuente para poder separar todos los metales que se requiera [3].

1.3.2 Tratamiento hidrometalúrgico.

Este proceso se ha convertido en el más utilizado para el tratamiento de los residuos electrónicos, esto se debe a que los métodos que se utilizan son más exactos, predecibles y más fácilmente controlables, que el proceso Pirometalúrgico. La hidrometalurgia puede separarse en tres áreas principales: la lixiviación, la concentración de soluciones y la purificación (recuperación de metales) [5].

El proceso general hidrometalúrgico se describe a continuación:

1. Tratamiento mecánico: Antes del tratamiento químico, es necesario un tratamiento mecánico con la finalidad de convertir los residuos electrónicos en materiales granulares (reducción del tamaño de partícula).
2. Lixiviación: Los residuos son sometidos a una serie de soluciones ácidas o causticas, donde los componentes solubles son extraídos de los sólidos que se forman a través de un solvente. Las soluciones más eficientes para la lixiviación son las ácidas, debido a la eficiencia con la que separan los metales preciosos y menores. Soluciones de cianuro, de haluro, de tiourea y de tiosulfato son las más utilizadas en este proceso; para cada metal que se requiera separar existe una solución óptima para su lixiviación.
3. Separación y purificación: Las soluciones lixiviadas son enviadas a los procesos de separación y purificación para concentrar los metales valiosos y eliminar impurezas.
4. Recuperación de metales preciosos: Este proceso se realiza a través de la Electrorrefinación, reducción química o cristalización. Las soluciones de cianuro,

agua regia, tiourea y tiosulfato son corrosivas, e incluso tóxicas, por lo que requieren de un tratamiento especial al momento de su disposición. Aunque utilizar la solución de cianuro como agente lixivante representa el método más económico, es también el más peligroso debido a la alta toxicidad del cianuro [1].

Al tratarse de una tecnología relativamente nueva, se han realizado estudios recientes para mejorar el proceso al aumentar el porcentaje de recuperación de los metales y disminuir la cantidad de residuos peligrosos. Se ha encontrado que, para componentes de residuos electrónicos que contienen una cantidad de oro superior a las 500 ppm, puede utilizarse una solución de ácido sulfúrico y tiourea como agente lixivante, obteniendo altos rendimientos en la recuperación del metal precioso [5].

Sin embargo, existen algunas características que limitan la aplicación de esta tecnología a escala industrial [6]:

- Todas las reacciones hidrometalúrgicas son lentas y consumen tiempo que repercute en la economía de la recuperación de los metales.
- El tratamiento mecánico que se necesita para disminuir su tamaño de partícula también consume demasiado tiempo, si se quiere tener una eficiencia mayor.
- El cianuro es una sustancia peligrosa que al convertirse en residuo debe tratarse con las medidas de seguridad más elevadas, puesto que puede producir contaminación irreparable en ríos y agua de mar.
- Los halogenuros como agentes lixiviantes son muy complicados de manejar debido a sus propiedades, altamente corrosivo y oxidante.

- El uso de tiourea como lixivante para la extracción de oro es limitado por su elevado costo y consumo.
- Existe el riesgo de que se pierdan cantidades de los metales durante la disolución.

1.3.3 Remoción electrolítica de metales pesados mediante el uso de un reactor electroquímico.

La aplicación de la electroquímica para la remoción y recuperación de metales de los efluentes de proceso han mostrado tener gran auge en los últimos años. Se ha reportado que el reactor con electrodo de cilindro rotatorio (RCE) es idóneo para el tratamiento de estos efluentes [7], debido a que en estos reactores el movimiento del electrodo de trabajo (cátodo) favorece la transferencia de masa en régimen turbulento y el perfil de velocidades que se genera en la superficie axial del cilindro favorece el transporte de los iones, desde el seno de la solución a la superficie del electrodo [8].

La remoción de cobre y níquel de los efluentes de la industria galvanoplástica vía electroquímica, desde los enjuagues de proceso, antes del tratamiento fisicoquímico tradicional, permiten la obtención de valores agregados y la operación eficiente de la precipitación fisicoquímica. Esto disminuye las emisiones y la producción de lodos, retornando el agua de enjuague, al proceso.

En la recuperación electroquímica de metales; tales como el cobre, se ha utilizado el reactor con electrodo de cilindro rotatorio escala laboratorio. Por ejemplo, Rivera et al. (2007), evaluaron la recuperación de Cu(II) de enjuagues de la industria de cromado de plásticos, observando eficiencias de corriente mayores del 90%, así

como consumos energéticos inferiores de 5 kWhm^{-3} . Para la recuperación de níquel algunos de los trabajos reportados son:

Fornari y Abbruzzese (1999) realizaron estudios de recuperación selectiva de níquel y cobre en una celda de 180 cm^3 que utiliza como cátodo tres electrodos cilíndricos de malla de platino colocado en el fondo de la celda, como ánodo utilizaron una espiral de alambre de platino al centro de la celda. Ellos reportaron recuperaciones de níquel del orden de 99.6%, con una eficiencia de corriente de 93.44 % durante 3h con 40 minutos de electrólisis, a un potencial catódico de -1.3, -1.35 y -1.4V vs. SCE [14].

G.H. Kelsall y A. Kovaleva (2010), reportaron el electro-recuperación de níquel de soluciones de sulfamatos (amidossulfonatos), a control galvanostático utilizando un reactor de placas paralelas en modo batch con recirculación, separado por una membrana catiónica para evitar la oxidación del sulfamato. Como cátodo emplearon una malla de níquel y un ánodo de titanio platinizado [16]. En este tipo de reactores electroquímicos, se deben de tener en cuenta algunos aspectos importantes del proceso como son: (a) el tipo de aditivos en el enjuague, que suelen afectar la estructura cristalina en la deposición de los metales, (b) el pH y la conductividad, así como, (c) la presencia de otras especies metálicas [17].

La eliminación de metales pesados en el agua de lavado de tecnologías basadas en precipitación química, resinas de intercambio iónico, ósmosis de evaporación, electroósmosis y electrofloculación ha sido ampliamente utilizada para el tratamiento de éstos. La gestión de los residuos sólidos generados por cualquiera

de estas tecnologías, o la operación de alto costo de algunas de ellas, han empujado a buscar otras alternativas tecnológicas. La recuperación electroquímica del metal ha atraído recientemente la atención porque el metal se recupera en su forma más valiosa, es decir, su estado de oxidación cero, sin requerir la adición de sustancias químicas, y no generando subproductos que más tarde requerirían tratamiento o confinamiento. Además, los metales electro-recuperados y las aguas tratadas con estos métodos electroquímicos pueden ser reutilizados en el mismo proceso, lo cual es más rentable y disminuye el consumo de agua y el impacto ambiental. Recientemente, el reactor electroquímico de electrodo de cilindro rotativo (RCE) se ha convertido en una buena alternativa debido a la alta tasa de transferencia de masa y distribución uniforme de corriente y potencial. Una de las principales correlaciones sobre la transferencia de masa en el RCE se informó en 1954. Low et. al. publicaron una revisión de la aplicación de RCE para la recuperación de metales. Hoy en día este dispositivo se ha utilizado para recuperar plata, cadmio, estaño, níquel, cobre, y también en la eliminación de metales tóxicos, como el arsénico [36].

1.4 Principios fundamentales de los reactores electroquímicos.

Los reactores electroquímicos han jugado un papel importante en el avance de la tecnología durante los últimos años. La variedad de aplicaciones ha dado como resultado muy diversas configuraciones, tamaños y materiales de construcción. Los parámetros de los cuales depende el buen funcionamiento de un reactor electroquímico son: (a) La conversión que hace referencia a la fracción de los iones transformados, (b) La productividad o cantidad de materia transformada o

producida por unidad de tiempo o volumen, (c) El transporte de los iones del seno de la solución a la interfase del electrodo, así como la transferencia de masa in la interfase líquido-sólido y la reacción electroquímica en la superficie del electrodo, (d) El potencial eléctrico de los electrodos, la caída óhmica, la distribución de densidad de corriente en los electrodos, entre otras variables.

Como puede observarse un gran número de factores se deben considerar durante la selección y diseño de un reactor electroquímico, pero existen dos principios fundamentales de la electroquímica que deben siempre tomarse en cuenta:

- ✓ Un proceso electródico, es una reacción catalítica heterogénea acompañada por una transferencia de carga en la superficie del electrodo en contacto con el electrolito.
- ✓ La transferencia de masa, es proporcional a la cantidad de corriente que pasa a través de la interfase electrodo/electrolito y, en general, es gobernada por la ley de Faraday [18].

Con base en estos principios, los factores tomados en cuenta para el diseño y desarrollo de reactores electroquímicos son:

Termodinámicos: Este estudio se lleva a cabo por medio de diagramas termodinámicos (i.e. Diagramas de Zonas de Predominio), estos se construyen a partir de los equilibrios entre las diferentes especies ya sean solubles o insolubles, además en ellos se representa la existencia de especies dentro de una determinada zona de pH, la cual está influenciada por la concentración de su ligando, por la relación entre la especie oxidada y su correspondiente especie reducida, o bien su constante de equilibrio.

Cinéticos: Para comprender y predecir el comportamiento de un sistema químico, deben considerarse conjuntamente la termodinámica y la cinética. El estudio de la cinética tiene gran importancia ya que nos indica la velocidad, el mecanismo o forma con la que transcurre la reacción.

Hidrodinámicos: En reactores electroquímicos, el estudio de los efectos de entrada / salida del fluido y la hidrodinámica dentro del canal interelectrónico, constituye un factor importante esto debido a cómo influye la hidrodinámica en el transporte de masa, en la distribución del potencial en la celda y a su vez en la cinética de la reacción electroquímica.

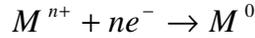
Transporte de Masa: Este se realiza por el estudio del transporte de la especie electroactiva en el seno de la solución hacia la interfase con la superficie del electrodo, en sistemas electroquímicos el balance general de la especie electroactiva es representado por tres contribuciones: (a) transporte por difusión, (b) el transporte por migración y (c) transporte por convección.

Potencial: El potencial de electrodo determina la selectividad y rendimiento del sistema de reacción, así como su velocidad o rapidez de reacción (densidades de corriente). El potencial o la densidad de corriente, en la mayoría de los casos, son los que determinan las condiciones óptimas de operación del reactor.

1.5 Fenómenos de transporte en los procesos electroquímicos.

1.5.1 Mecanismo general de depósito de metales.

Las reacciones electroquímicas que involucran un electrodepósito a nivel de la interfase electrodo/electrolito, de la forma:



Presentan un mecanismo que puede incluir 5 pasos para cualquier tipo de geometría de electrodo. El mecanismo de electrodeposición, se muestra de manera general en la Figura 1, e incluye los siguientes pasos [17]: 1.- Transferencia de masa del ión metálico del seno de la solución hacia la interfase del electrodo; 2.- Transferencia de carga en la interfase electrodo/solución; 3.- Adsorción del metal en la superficie del electrodo, 4.- Formación de pequeños grupos de átomos, que inician la formación de los primeros cristales, 5.- Los primeros cristales formados, se vuelven los centros de formación de la nueva fase. Posteriormente, los cristales se pueden desprender, con el fin de que otras especies ocupen la superficie del electrodo y reaccionen [17, 19, 20].

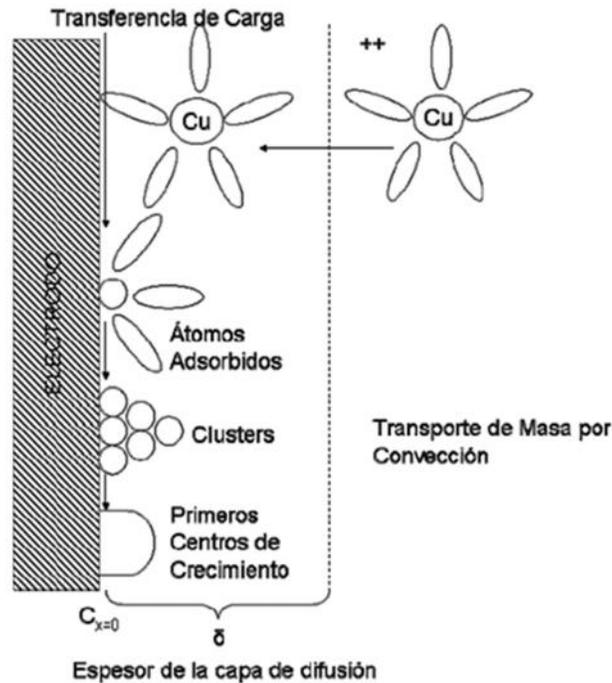


Figura 2.- Esquema del mecanismo de una reacción de electrodeposición metálica en la superficie de un electrodo.

Como se puede observar en la Figura 1, las reacciones de deposición de metales, presentan fenómenos de transporte, asociados con la transferencia de masa del seno de la solución al electrodo y la transferencia de carga en la superficie del electrodo con las subsecuentes etapas de formación de la nueva fase. Se deben considerar dos posibles situaciones: control por transporte de carga (reacción electroquímica) y control por transferencia de masa [21].

En el caso, donde el proceso global se encuentre limitado por transferencia de masa, que es caso de interés en este trabajo, si debe seleccionar las densidades de corriente, así como los números de *Reynolds* adecuados para la formación de dendritas metálicas, con el objetivo de remover de forma continua los depósitos, los cuales se desprenden y se depositan en el fondo del reactor.

1.5.2 Transporte de carga

Un proceso controlado por transporte de carga involucra un conjunto de cambios que tienen lugar en la interface entre un conductor iónico y un conductor electrónico. Sin ahondar en los fenómenos que ocurren a nivel de la interface, llamada doble capa, se sabe que cuando la corriente total en un proceso electroquímico es cero, existe un equilibrio dinámico entre las reacciones de reducción y de oxidación (ocurriendo simultáneamente y con la misma rapidez). Es decir la corriente I_{red} es de la misma magnitud pero de signo contrario a la corriente de oxidación I_{oxi} . De esta manera, se establece que el potencial de equilibrio (1) para el sistema O/R es:

$$E_e = E_e^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_o}{C_r} \quad (1)$$

Donde; C_r y C_o son las concentraciones en la solución y E_e^0 es el potencial formal (cuando $C_r=C_o$) para el par O/R considerado, es decir, el potencial de equilibrio cuando reactivos y productos están en estado estándar, F es la constante de Faraday, R la constante de los gases ideales y T la temperatura.

Siguiendo un tratamiento clásico de cinética de reacciones químicas, puede escribirse una expresión empírica de la forma (2):

$$v = \frac{dC}{dt} = kC^n \quad (2)$$

En un proceso electródico existen una serie de reacciones heterogéneas de oxidación y reducción, teniendo lugar en la interface conductor electrónico/conductor iónico (únicamente cuando las especies electroactivas se encuentran a distancias moleculares de la superficie del electrodo), cuando $d = 0$, es necesario considerar la concentración en la superficie.

La rapidez a la que la reacción ocurre (I), puede obtenerse considerando que ésta es proporcional a la concentración del reactivo en la superficie del electrodo [22]. Así pues, si la velocidad de reacción está bajo control por transferencia de carga, se puede escribir dos expresiones, una para la reducción (3) y otra para el proceso de oxidación (4).

$$v_{red} = \frac{dC}{dt} = k_{red} (C_o)_{x=0} \quad (3)$$

$$v_{oxi} = \frac{dC}{dt} = k_{oxi} (C_r)_{x=0} \quad (4)$$

Donde las constantes de velocidad de reacción específica en las reacciones de oxidación y reducción tendrán unidades de s^{-1} . Además, estas constantes de velocidad dependerán fuertemente del potencial del electrodo en la forma:

$$k_{red} = k_{0,red} e^{\left(\frac{-\Gamma_c n F Y_{red}}{RT}\right)} \quad (5)$$

$$k_{oxi} = k_{0,oxi} e^{\left(\frac{-\Gamma_A n F Y_{oxi}}{RT}\right)} \quad (6)$$

Donde; $k_{0,red}$ y $k_{0,oxi}$, son las constantes de velocidad estándar. Las Γ_A y Γ_c son los coeficientes de transferencia electrónica anódica y catódica; respectivamente, sus valores cumplen generalmente la siguiente condición $\Gamma_A + \Gamma_c = 1$. Para el caso de una reacción de reducción o de una oxidación, Γ_{red} y Γ_{oxi} , es la diferencia de potenciales entre el potencial aplicado $E_{aplicado}$ y el potencial estándar (E^0).

1.5.3 Transporte de masa

Como se ha mencionado, el movimiento de las especies electroactivas, hacia y fuera de la superficie del electrodo, constituye una parte esencial de los procesos electroquímicos.

Generalmente, en sistemas electroquímicos, el balance de masa de las especies cargadas "i" está dada por:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla C_i + z_i F \nabla \cdot (u_{mi} C_i \nabla \Phi) + D_i \nabla^2 C_i \quad (7)$$

El primer término de la reacción (7) representa el transporte iónico por convección y describe el movimiento de especie debido al movimiento del fluido en el seno de la solución, el segundo término corresponde a la migración de especies cargadas debido al campo eléctrico y el último término describe el movimiento de la especie por difusión molecular. En la ecuación (7) C_i es la concentración de la especie, z_i el

número de electrones que se transfieren en la reacción electroquímica, F es la constante de Faraday, u_{mi} la movilidad iónica, Φ el potencial eléctrico y D_i el coeficiente de difusión.

El segundo término de la ecuación (7) se puede despreciar suponiendo que la especie electroactiva está presente en concentraciones muy altas, además, se añade un electrolito soporte (1M H₂SO₄) a la solución disminuyendo el efecto del campo eléctrico, es por ello que el término que representa a la migración iónica puede ser despreciado [23], por lo tanto la expresión (7) se simplifica.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \mathbf{u} \cdot \nabla C_i + D_i \nabla^2 C_i \quad (8)$$

El término por convección representa el movimiento de una especie bajo un gradiente de velocidad debido a fuerzas mecánicas [17]. Se pueden distinguir dos tipos de convección: (a) forzada; cuando se realiza mediante agitación, bombeo o aspiración y, en general, por todo medio mecánico que aporte una energía al sistema; (b) libre o natural, cuando el movimiento del flujo se genera por diferencias de densidad entre dos puntos o por diferencias de temperatura. El fenómeno de difusión viene dado por un gradiente de potencial químico y, en forma más general, del gradiente de concentración de la especie entre dos puntos del reactor.

1.6 Tipos de reactores electroquímicos.

Es importante mencionar que la selección de un reactor depende principalmente de la concentración de la especie electroactiva a tratar y/o de la tasa de conversión deseada. El tipo de reactor electroquímico utilizado para reducir los iones metálicos a su estado elemental, depende del intervalo de concentración de

la especie electroactiva. Si la concentración de la especie electroactiva se encuentra en el orden de 0.01-1000 ppm, se puede emplear una celda con electrodos tridimensionales; se puede emplear una celda con electrodos de cilindro rotatorio cuando la concentración oscila en el intervalo de 10 a 10 000 ppm y para concentraciones entre 100- 100 000 se puede utilizar una celda con electrodos planos [22,24]. Algunos de los reactores más típicos a este respecto se describen a continuación.

1.6.1 Reactor Batch

Este tipo de reactor es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y la posibilidad de estudiar las velocidades de reacción en una amplia gama de concentraciones de reactantes.

Se supone que el electrolito está bien mezclado en todo momento de manera que no se produzcan gradientes de concentración dentro del electrolito en masa que tenga un valor constante en el tiempo. Por simplicidad, se puede suponer que la velocidad de reacción global sigue la cinética de primer orden con respecto al reactivo.

La velocidad de cambio de la concentración de reactivo con respecto al tiempo está descrita por:

$$\frac{dc(t)}{dt} = -kc(t)$$

Donde k es la constante de velocidad de primer orden [21].

1.6.2 Reactor de flujo continuo en estado estacionario

En un reactor de flujo continuo en estado estacionario, un caudal volumétrico constante de electrólito (Q_v) pasa a través del reactor y la concentración de entrada $c(IN)$ se reduce al valor de salida $c(OUT)$. Tanto $c(IN)$ como $c(OUT)$ son independientes del tiempo. Un balance de masa sobre el reactor en términos de la velocidad de eliminación del reactivo da:

$$\Delta c = c(IN) - c(OUT) = \frac{I}{nFQ_v}$$

Este tipo de reactor puede ser considerado como un reactor de flujo de tapón o como un reactor de tanque de agitación continuo [21].

1.6.3 Reactores electroquímicos tipo cilindro rotatorio

Los reactores con electrodos bidimensionales de cilindro rotatorio (ver figura 3), trabajan con un electrodo de cilindro rotatorio interno que gira a velocidades angulares entre 200 - 1200 RPM (régimen turbulento), este reactor de electrodo de cilindro rotatorio (RCE, por sus siglas en inglés Rotating Cylinder Electrode), es de las tecnologías más empleadas para la remoción de metales, debido a que permite remociones de metales desde 10,000 hasta 10 ppm, [17].

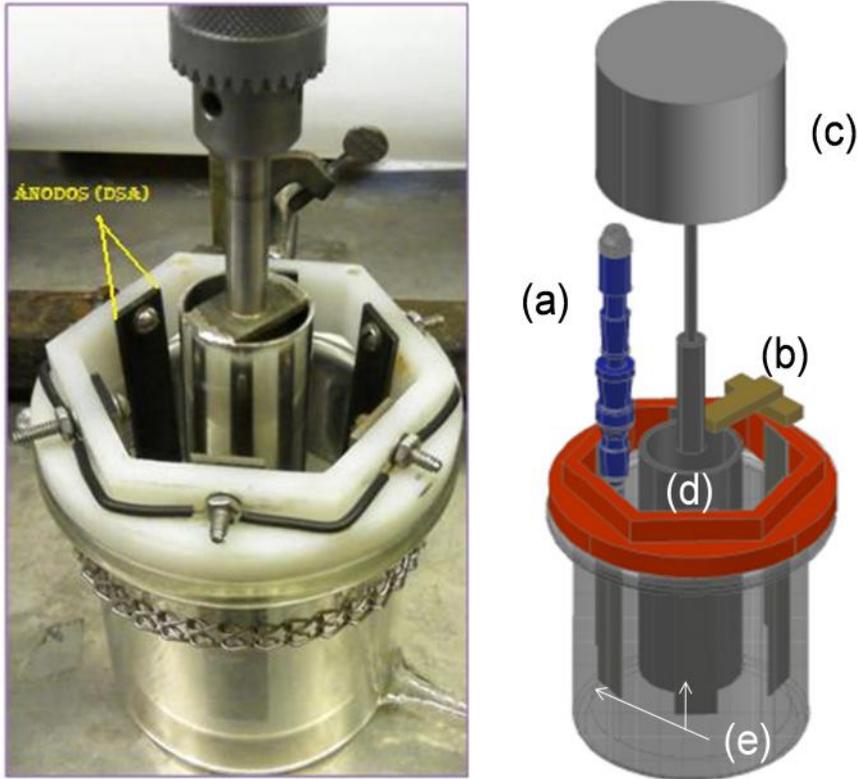


Figura 3.- Reactor de electrodo de cilindro rotatorio. (a) Electrodo Saturado de Sulfatos, $\text{Hg}/\text{HgSO}_4/\text{K}_2\text{SO}_4$, (b) Alimentador de corriente, (c) CaframoTM, (d) Cátodo de Acero Inoxidable S316, (e) Ánodos Dimensionalmente Estables (DSA, por sus siglas en ingles) de $\text{RuO}_2/\text{TiO}_2$.

El RCE se opera generalmente en condiciones tales que el proceso catódico se encuentre limitado por transferencia de masa. El control por transporte de masa se logra mediante la velocidad angular aplicada al electrodo a través del motor de velocidad variable y por la densidad de corriente aplicada al proceso. A densidades de corriente muy bajas, los sobrepotenciales son pequeños y por ello, las probabilidades de nucleación son escasas; por consiguiente, los metales se depositan en forma de grano grueso. A medida que se aumenta la densidad de corriente y el sobre-potencial, aumenta la frecuencia de nucleación y los depósitos se hacen más finos.

1.6.4 Reactores electroquímicos de placas paralelas o reactores tipo filtro prensa (FM01).

Los reactores tipo filtro prensa (FM01) o electrodos de placas paralelas, se utilizan ampliamente en los procesos de electrólisis y en celdas de combustión. La geometría de platos paralelos es popular y conveniente para muchos procesos electroquímicos, debido a las siguientes características [17]:

- i. Simplicidad en la construcción de las estructuras de la celda, conexiones de electrodo y sellado de membranas, así como gran variedad de materiales de electrodo y separadores.
- ii. Las distribuciones de potencial y corriente son razonablemente uniformes.
- iii. Las alimentaciones de los electrolitos puede ser conectadas en serie o paralelo.

Hoy en día, los reactores del tipo filtro prensa han sido estudiados por su gran variedad de usos en la recuperación de valores de minerales, o bien en la reducción de contaminantes orgánicos en aguas residuales, en la Figura 4 se muestra una vista detallada de un reactor de placas paralelas o FM01 escala laboratorio, mostrando configuración en canal inter-electródico.

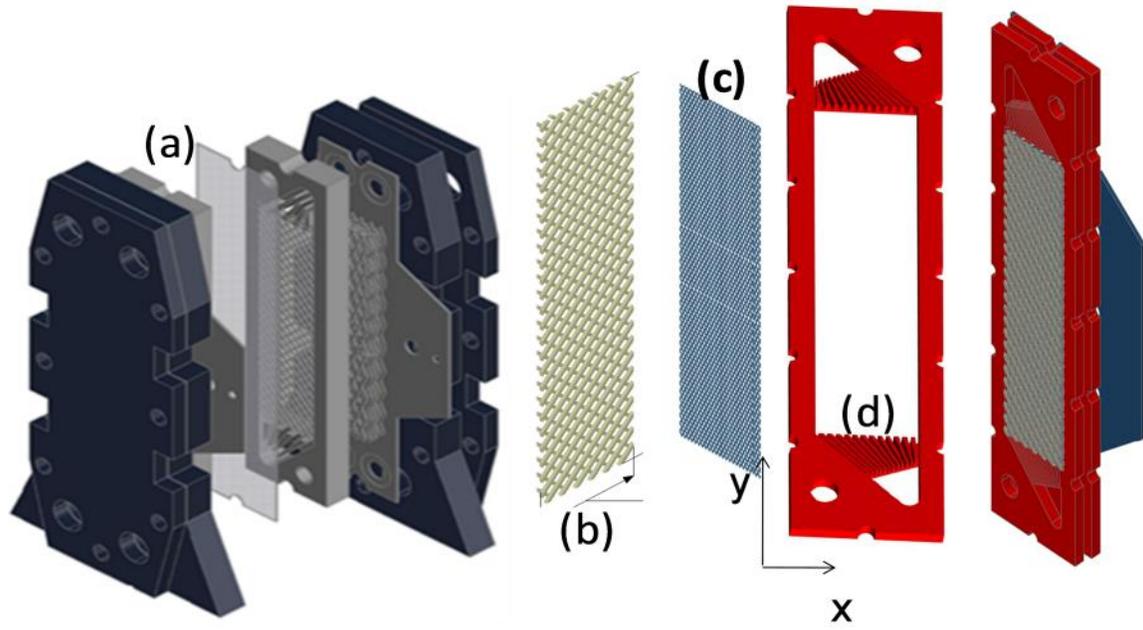


Figura 4 (a) FM01-LC escala laboratorio, (b) promotor de turbulencia tipo D y (c) electrodos de malla estructurados, así como (d) canal de distribución.

CAPITULO II

Objetivos.

La contaminación por baterías y pilas de deshecho, así como los daños a la salud que pueden generar los metales contenidos en ellas, generan la necesidad de que estos residuos sean tratados de manera eficaz para, por una parte, eliminar la contaminación y riesgo que producen los desechos y por otra, recuperar los metales a fin de que puedan ser reutilizados. Por lo anterior descrito el objetivo general de este trabajo es:

“Establecer las condiciones de operación de un RCE-LC para la recuperación de cobalto-níquel proveniente de un efluente sintético de lixiviado de baterías.”

Objetivos particulares

1. Caracterización fisicoquímica y termodinámica de la solución problema,
2. Caracterización electroquímica vía micro electrólisis (RDE, acero inoxidable S316) de la solución modelo y
3. La recuperación de Co-Ni del lixiviado en el RCE-LC.

CAPITULO III

Experimental.

Para alcanzar el objetivo planteado en el presente estudio, la estrategia experimental consistió de tres partes; (a) caracterización fisicoquímica y termodinámica de la solución problema, (b) caracterización electroquímica vía microelectrólisis (RDE, acero inoxidable S316) de la solución modelo y (c) la recuperación de Co-Ni del efluente.

3.1 Caracterización fisicoquímica y termodinámica del lixiviado de baterías.

3.1.1 Métodos fisicoquímicos.

A partir de la caracterización de los licores obtenidos de la lixiviación de baterías Co-Ni, se estructuró el licor sintético, del cual los componentes básicos utilizados en la formulación son: Sulfato de Níquel, Cloruro de Cobalto, Sulfato de Sodio y Ácido Bórico. El Sulfato de Níquel y el Sulfato de Cobalto son la fuente de iones más importante en una formulación de este tipo, y su concentración limita la densidad de corriente del baño y la conductividad del electrolito, el Ácido Bórico ayuda a producir depósitos más blancos, lisos y dúctiles mientras que el Sulfato de Sodio es utilizado como electrolito soporte.

3.1.2 Método termodinámico.

Una vez que se realizó la solución sintética del lixiviado de Co-Ni, la segunda parte de la caracterización fisicoquímica, consistió en el estudio termodinámico del sistema Co-Ni utilizando la solución modelo con los componentes principales del efluente (Ni, SO₄, Co, H₃BO₃). Este estudio se realizó a través de la construcción del diagrama de distribución de especies y de zonas de predominio tipo Pourbaix (PTDZ) mediante el uso del software Medusa™ *versión 32 bits*.

3.2 Caracterización electroquímica por microelectrólisis.

La caracterización electroquímica se realizó en la solución modelo para evitar interferencias en los estudios de microelectrólisis, debido a la presencia de otros agentes externos. Los reactivos que se utilizaron para la preparación de esta solución modelo fueron de grado analítico marca JT Baker™ en agua desionizada grado Millipore. Para estos experimentos se realizaron diferentes técnicas electroquímicas como son: determinación de potencial de circuito abierto (OCP), voltamperometría cíclica y cronoamperometría en estado estacionario.

3.2.1 Experimentos de microelectrólisis

Para determinar el tiempo de inmersión donde la superficie del electrodo es reproducible, es decir, donde el electrodo de acero inoxidable no sufre

modificaciones debido a la formación de una capa protectora en la superficie del electrodo, se utilizó la técnica de *Potencial de Circuito Abierto* (OCP, por sus siglas en inglés), la cual describe el cambio de potencial con respecto del tiempo de inmersión del electrodo. A partir de este tiempo de inmersión se realizó un barrido en la ventana de potencial (de 0.025 en 0.025 V vs NHE (Electrodo Normal de Hidrogeno) y a 300 rpm) utilizando la técnica de *Voltamperometría Cíclica* (VC), para obtener el intervalo de potenciales donde se llevan a cabo las reacciones redox del sistema Ni (II)/Ni (0) y Co (II)/Co (0). Estos experimentos se realizaron utilizando un Potenciostato-Galvanostato marca *Biologic Science Instrument™* modelo VMP3, equipado con adquisidor de datos EC-Lab versión 10.4.

El uso de la técnica de cronoamperometría es preferible sobre la voltamperometría cíclica, debido a que esta última describe de manera cuantitativa la reducción del Co-Ni por medio de las curvas de $I_{\text{muestreada}}$ vs E (V vs NHE). Además, en la construcción de curvas $I_{\text{muestreada}}$ vs E (V vs NHE) se puede determinar el intervalo de potencial donde se realiza la reducción de Níquel y Cobalto en régimen limitado por transporte de masa. Por otro lado, esta técnica evita la competencia entre la modificación energética de la superficie y la formación de los depósitos en la interfase (voltamperometría).

La cronoamperometría del licor sintético de cobalto y níquel en régimen estacionario, se realizó aplicando una serie de pulsos de potencial y a diferentes velocidades de rotación del electrodo de disco de acero inoxidable (RDE), empezando del potencial de circuito abierto (~ 0.53 V vs. NHE) hasta un potencial comprendido en el intervalo $-0.805 \text{ V} < E < -0.53 \text{ V}$ vs. NHE durante 10 segundos

con incrementos de 20 mV; mientras que las velocidades de rotación del disco fueron 400, 600, 800 y 1000 rpm. A partir de los cronoamperogramas obtenidos, se construyeron curvas de corriente muestreada (a un tiempo de 1 s) contra potencial, a diferentes velocidades de rotación. Los experimentos de microelectrólisis se realizaron en una celda de tres electrodos con agitación controlada utilizando un sistema de disco rotatorio PINE™ modelo AFCPRB ROTATOR y un Potenciostato-Galvanostato *Biologic Science Instrument™* modelo VMP3, equipado con adquirente de datos EC-Lab versión 10.4.

3.3 Recuperación de Co-Ni en el RCE-LC.

Por último, se realizó el estudio de la recuperación de Co-Ni del licor sintético utilizando un reactor de electrodo cilíndrico rotatorio escala laboratorio (RCE-LC), el sistema de macroelectrólisis está conformado por: (a) un reactor RCE-LC de 600 mL de capacidad construido en vidrio, el cual estaba equipado con baño de temperatura, un cilindro de acero inoxidable S316 como cátodo, con un diámetro de 3.8 cm y 11 cm de largo, como ánodos se insertaron seis placas de DSA (ánodos dimensionalmente estable) de $\text{RuO}_2/\text{TiO}_2$, con dimensiones de 2 cm de ancho y espesor de 0.3 cm cada uno (Figura 5), como electrodo de referencia se utilizó un Electrodo Saturado de Sulfatos ($\text{Hg}/\text{HgSO}_4/\text{K}_2\text{SO}_4$, SSE). (c) Como sistema de rotación se adaptó un motor de revolución variable marca Caframo™.

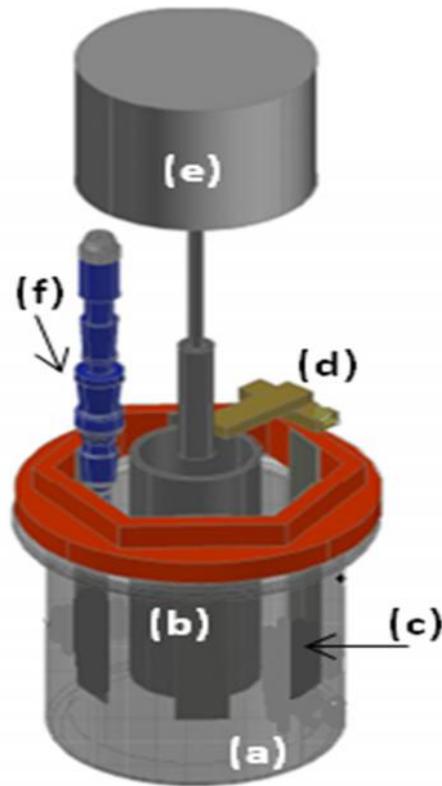


Figura 5. Esquema del reactor electroquímico para la recuperación del Co-Ni. (a) Reactor con electrodo de cilindro rotatorio (RCE-LC), (b) Electrodo cilíndrico de acero inoxidable S316 (cátodo), (c) Ánodos dimensionalmente estables (DSA) $\text{RuO}_2/\text{TiO}_2$, (d) Conector de corriente al cátodo, (e) Sistema de rotación y (f) Electrodo de Sulfatos Saturado como referencia.

En los experimentos de electrólisis se utilizó un Potenciostato - Galvanostato marca *Biologic Science Instrument™* modelo *VMP3*, equipado con adquisidor de datos *EC-Lab versión 10.4*. A este potenciostato se acopló una fuente de poder *Biologic Science Instrument™* modelo *VMP3B* de 20 A y 20 V de capacidad.

Para determinar el decaimiento de la concentración de Ni y Co en la solución conforme avanza el tiempo de electrólisis, se empleó un espectrofotómetro de absorción atómica marca *Varian™* Modelo 220 FS. El volumen de muestra fue de

0.5 mL y se analizaron por triplicado. En los primeros 30 minutos de electrólisis se muestreó cada 5 minutos, después de los 30 minutos de electrólisis se muestreó cada 30 minutos.

CAPITULO IV

Análisis y discusión de resultados.

4.1.- Diagrama tipo Pourbaix

Los diagramas de tipo Pourbaix (PTDZ) son particularmente útiles en el estudio de la electrodeposición de metales con la finalidad de encontrar el potencial formal o termodinámico y el pH a los cuales las especies se reducen a su forma metálica.

El estudio termodinámico del sistema Co (II) - Ni (II) a Co (0) - Ni (0) se realizó en tres partes:

- a) El estudio del sistema Co(II) a Co(0), en el cual se observa que el Co(II) se encuentra como especie soluble en el intervalo $0 < \text{pH} < 7$, mientras que cuando el $\text{pH} > 7$ aparece el compuesto $\text{Co}(\text{OH})_2$ en estado sólido; como lo que queremos es reducir el Co(II) a Co(0) lo más conveniente es trabajar a valores de $\text{pH} < 7$ en este caso para evitar la formación de compuestos no deseados (Figura 6). También se puede observar que la reducción del agua (representada por la línea discontinua inferior de color verde) se lleva a cabo a potenciales menores de 0 V vs SHE, por lo tanto la reducción de agua y la reducción de la especie en cuestión se llevan a cabo simultáneamente en medios ácidos ya que el proceso de reducción del Cobalto se favorece a potenciales negativos, lo cual es inconveniente porque este hecho reduce la eficiencia de corriente. La formación de hidróxidos de la especie y la competencia de las reacciones simultáneas de reducción de Cobalto y agua acota nuestro intervalo de trabajo en cuanto al

pH. Por lo tanto, con base en lo anteriormente descrito lo más viable es trabajar en un intervalo de 5 <math>pH < 7</math>.

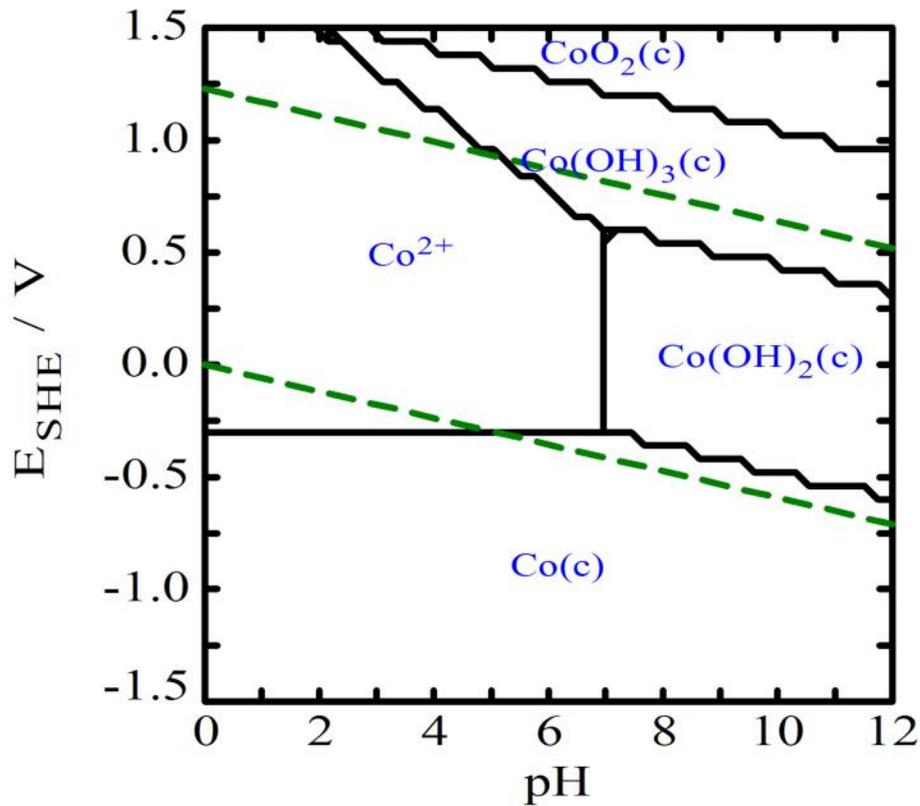


Figura 6.- Diagrama tipo Pourbaix (PTDZ) para Cobalto.

- b) En el estudio del sistema Ni (II) a Ni (0) se observan las especies solubles de Ni (II) en el intervalo $0 < pH < 6$, mientras que cuando el $pH > 6$ se forma el compuesto $Ni(OH)_2$ en estado sólido lo cual no es conveniente por el hecho de que queremos recuperar Ni en forma metálica. También se puede observar que la reducción del agua (representada por la línea discontinua inferior de color verde) se lleva a cabo a potenciales menores de -0.25 V vs SHE, por lo tanto la reducción de agua y la reducción de la especie en cuestión se llevan a cabo simultáneamente en medios ácidos ya que el

proceso de reducción del Níquel se favorece a potenciales negativos, lo cual es inconveniente porque este hecho reduce la eficiencia de corriente. La formación de hidróxidos de la especie y la competencia de las reacciones simultáneas de reducción de Níquel y agua acota nuestro intervalo de trabajo en cuanto al pH. Por lo tanto, con base en lo anteriormente descrito lo más viable es trabajar en un intervalo de 4 a 5 pH.

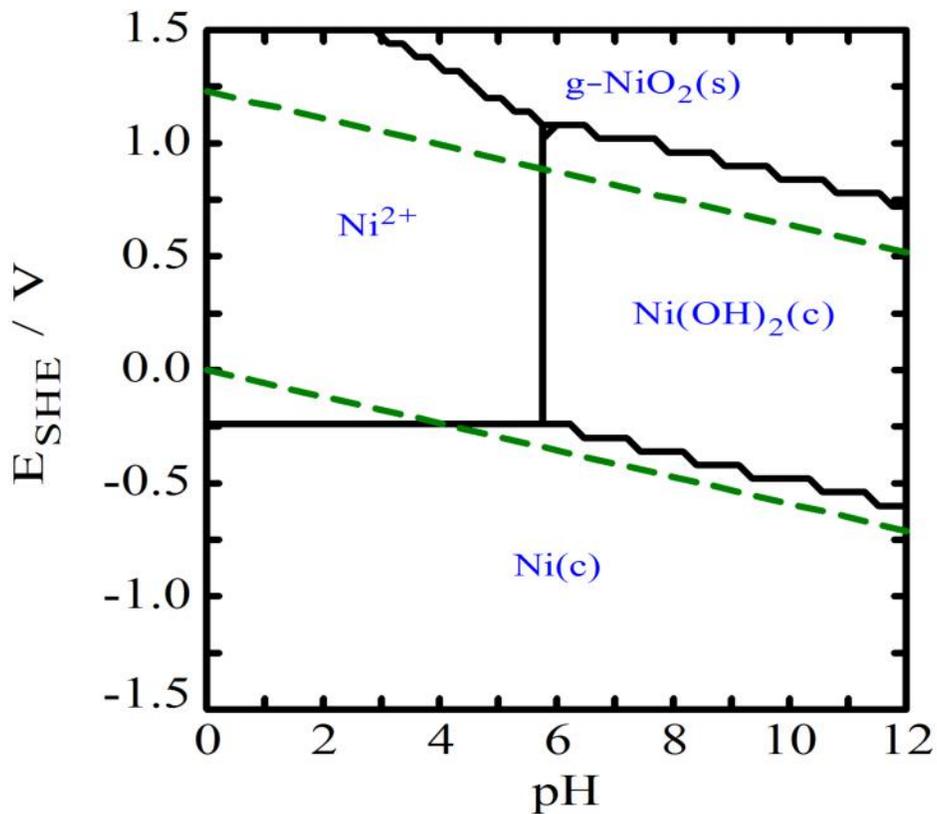


Figura 7.- Diagrama tipo Pourbaix (PTDZ) para Níquel.

c) Estudio del sistema Co (II) - Ni (II) a Co (0) – Ni (0).

Anteriormente se estudiaron los sistemas de las dos especies en cuestión por separado y se encontraron los intervalos de trabajo más favorables para

la electrodeposición de cada especie; en esta parte del estudio se presentan las dos especies en cuestión en un solo sistema para tener una idea más acertada del comportamiento que tendrá nuestra solución real. Si para cada compuesto el intervalo de pH era acotado, para el sistema combinado se cierra aún más la ventana de trabajo dejando un intervalo de $4.5 < \text{pH} < 5.5$. También se puede observar que el primer proceso de reducción será el del Níquel ya que el potencial al cual se favorece es menos negativo que el del Cobalto.

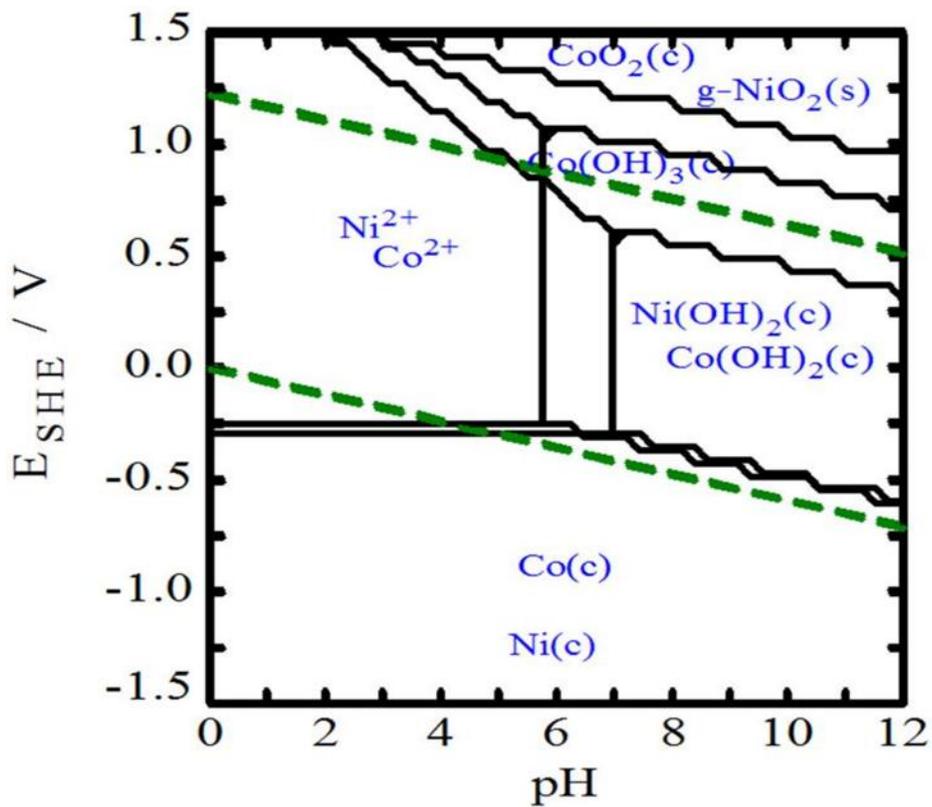


Figura 8.- Diagrama tipo Pourbaix (PTDZ) para el sistema Co-Ni.

4.2.- Caracterización electroquímica.

La voltamperometría cíclica nos muestra la ventana de potencial en la cual se lleva a cabo el proceso de reducción de una especie a su forma metálica. En este estudio se pretende observar a qué valores de potencial se llevan a cabo los dos procesos de reducción que se tienen presentes en nuestro sistema por lo que se inició una serie de barridos en la ventana que comprende desde un potencial de -0.53 hasta -1.155 V vs NHE. En la figura 9 se muestran los barridos a potenciales de -0.53, -0.555 y -0.58 V vs NHE y apenas se puede apreciar el primer proceso de reducción, por lo que para observar el segundo proceso se necesitan potenciales mayores a -0.58 V vs NHE.

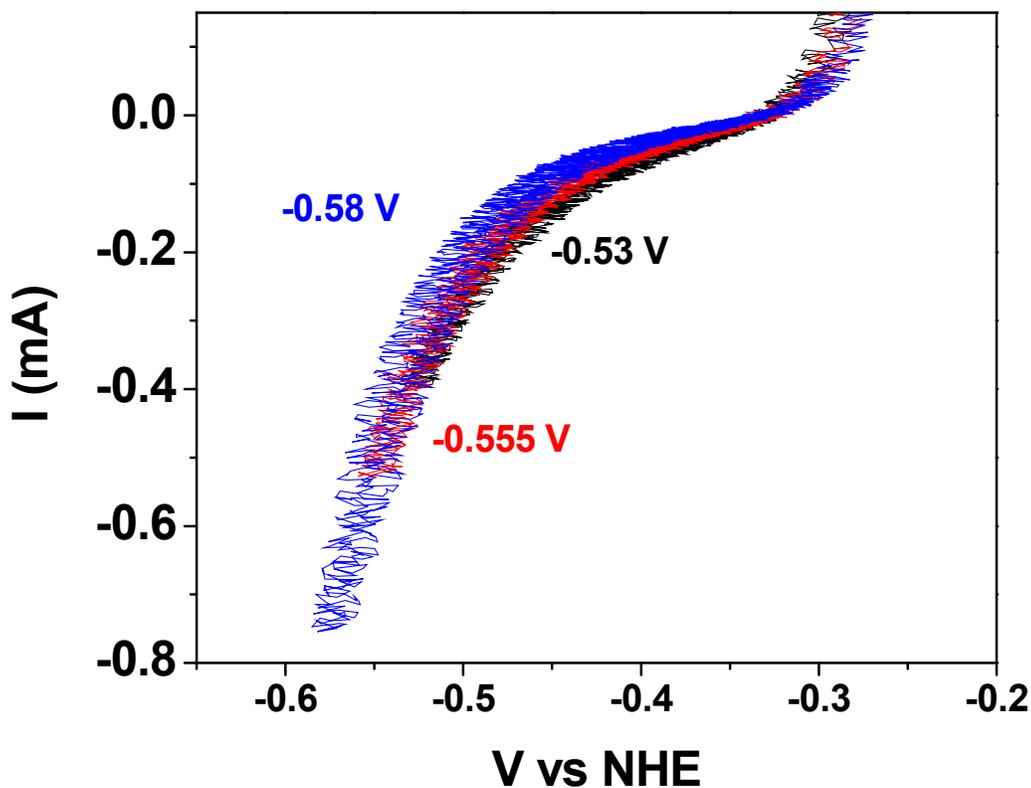


Figura 9.- Voltamperograma

Como en los valores de barrido antes presentados no se llevó a cabo el segundo proceso de reducción deseado se hicieron nuevos barridos aumentando los valores en sentido catódico, como se muestra en la Figura 10. A valores de potenciales de -0.605, -0.63 y -0.655 V vs NHE ya se puede apreciar un primer pico, el cual representa el primer proceso de reducción, en este caso sabemos por el estudio termodinámico que es el de Níquel.

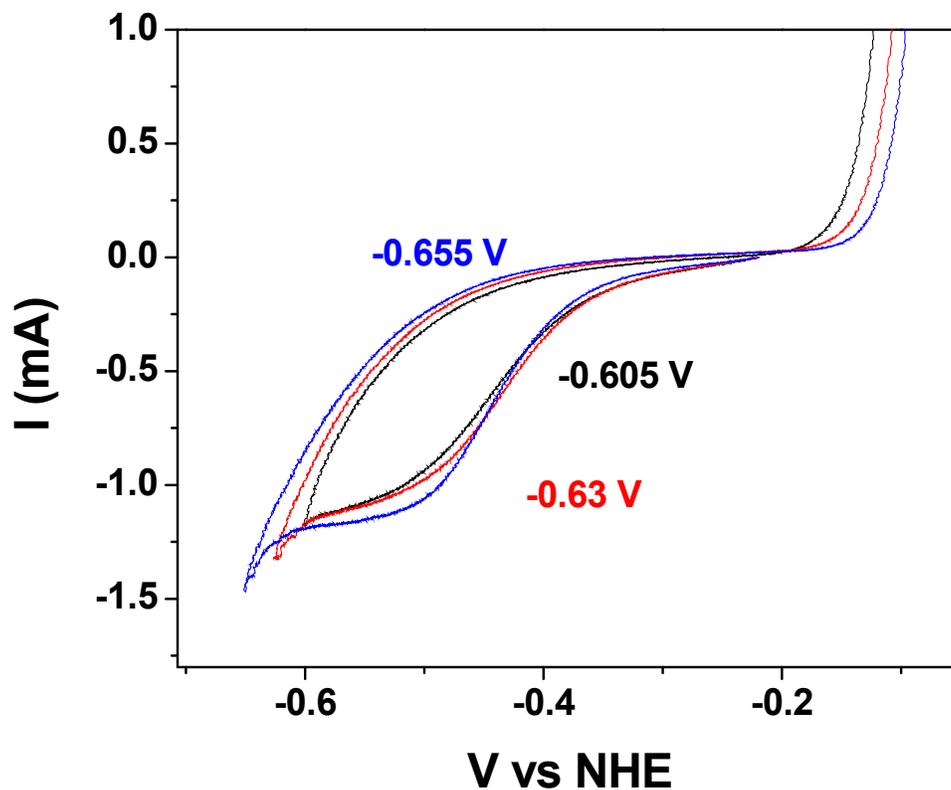


Figura 10.- Voltamperograma

Como lo que nos interesa es la electrodeposición de la aleación Co-Ni y no la obtención separada de los metales, se abre aún más la ventana de barrido para buscar el potencial al cual se favorece la electrodeposición de la aleación. En la

figura 11 se muestran barridos a valores aún más grandes que los anteriores, sin embargo aún no se logra apreciar un segundo proceso, lo que nos lleva a abrir aún más la ventana de barrido.

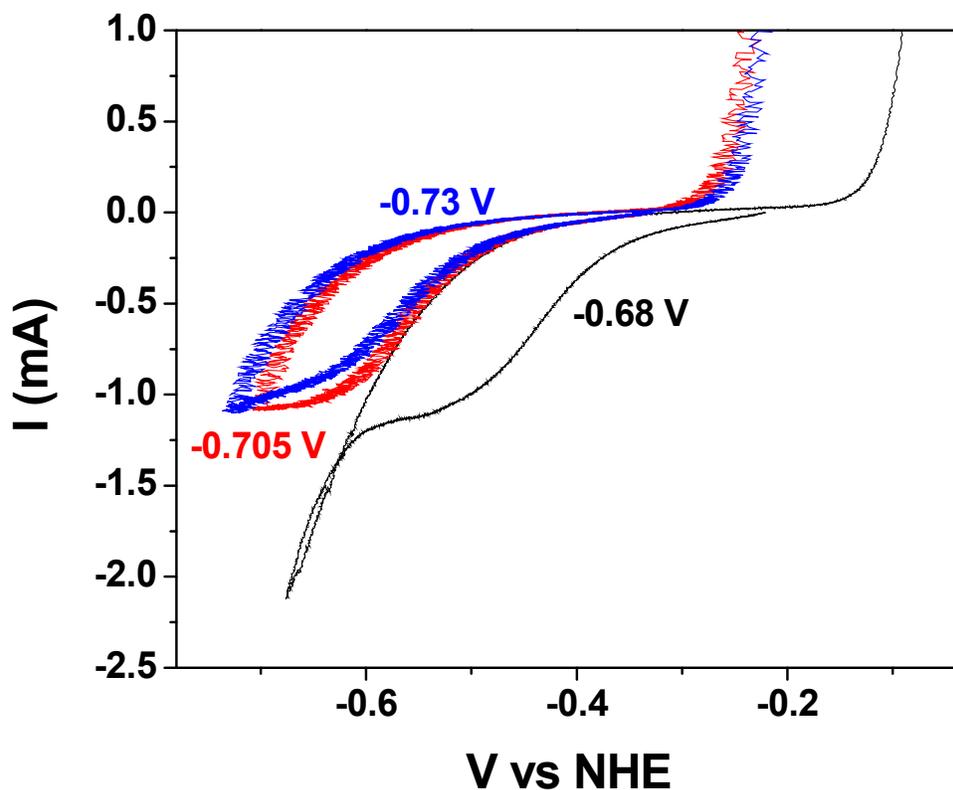


Figura 11.- Voltamperograma

A valores de potencial de -0.755, -0.78 y -0.805 v vs NHE aún no se aprecia el proceso de reducción del Cobalto pero se nota que nos acercamos al potencial requerido para que se lleven a cabo nuestros dos procesos como se muestra en la Figura 12.

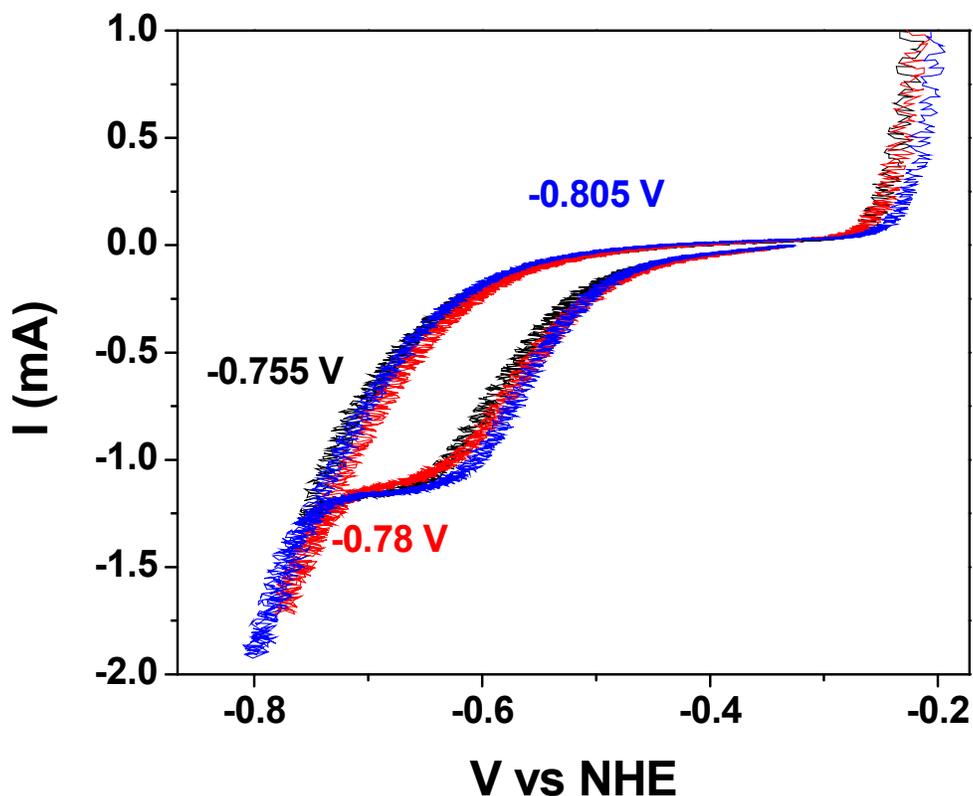


Figura 12.- Voltamperograma

Para cuando alcanzamos un potencial de -0.855 V vs NHE (Figura 13) se lleva a cabo un primer proceso de reducción (Níquel) y a continuación se inicia un segundo proceso, aunque a este potencial aun no alcanzamos a ver completamente el segundo pico ya se empieza a formar y corresponde a nuestro segundo proceso de reducción que por el estudio termodinámico sabemos que es la reducción del Cobalto. En la misma figura (Figura 13) se representa el barrido a -0.955 V vs NHE en el cual ya se logra apreciar los dos procesos de reducción, el primero entre los potenciales -0.55 y -0.65 V vs NHE correspondiente al Níquel y continuando el barrido hacia el sentido catódico se llega al segundo proceso de

reducción correspondiente al Cobalto y este se lleva a cabo en el intervalo de potenciales de -0.75 a -0.9 V vs NHE.

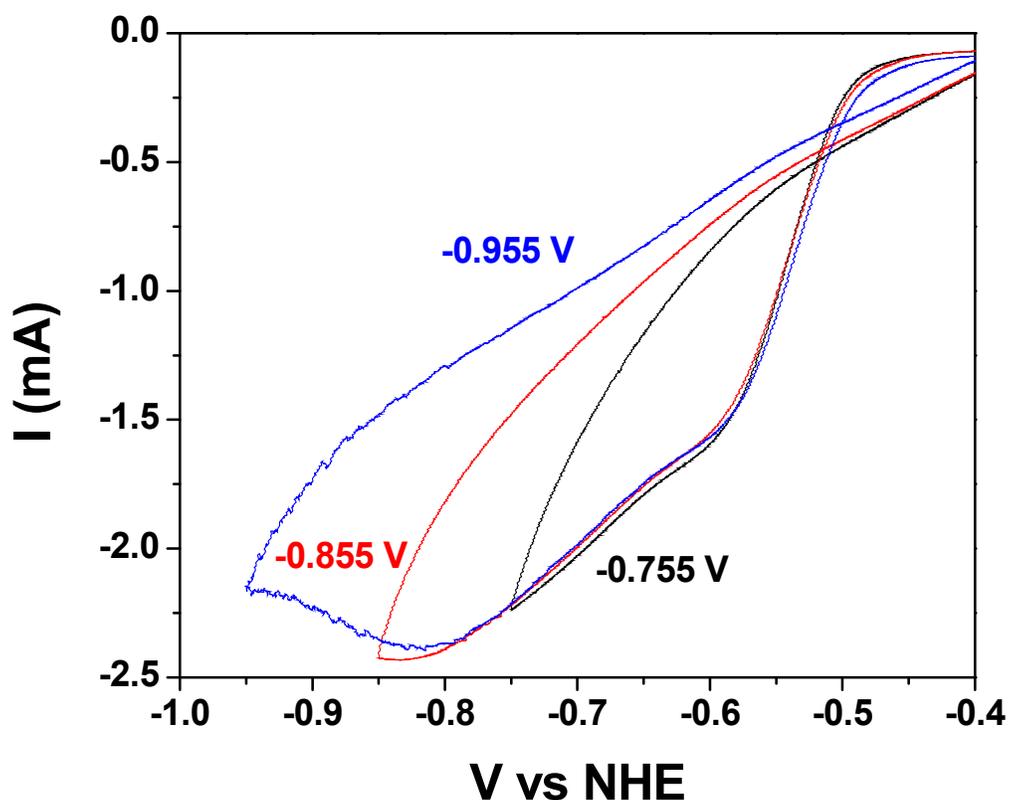


Figura 13.- Voltamperograma

Aunque en los barridos anteriores ya se encontraron los valores de potencial a los cuales se favorece la electrodeposición de nuestra aleación Co-Ni, lo cual es nuestro objetivo, se hicieron nuevos barridos con potenciales aún más negativos para saber si se tienen otros procesos a parte de los de Co-Ni (Figura 14).

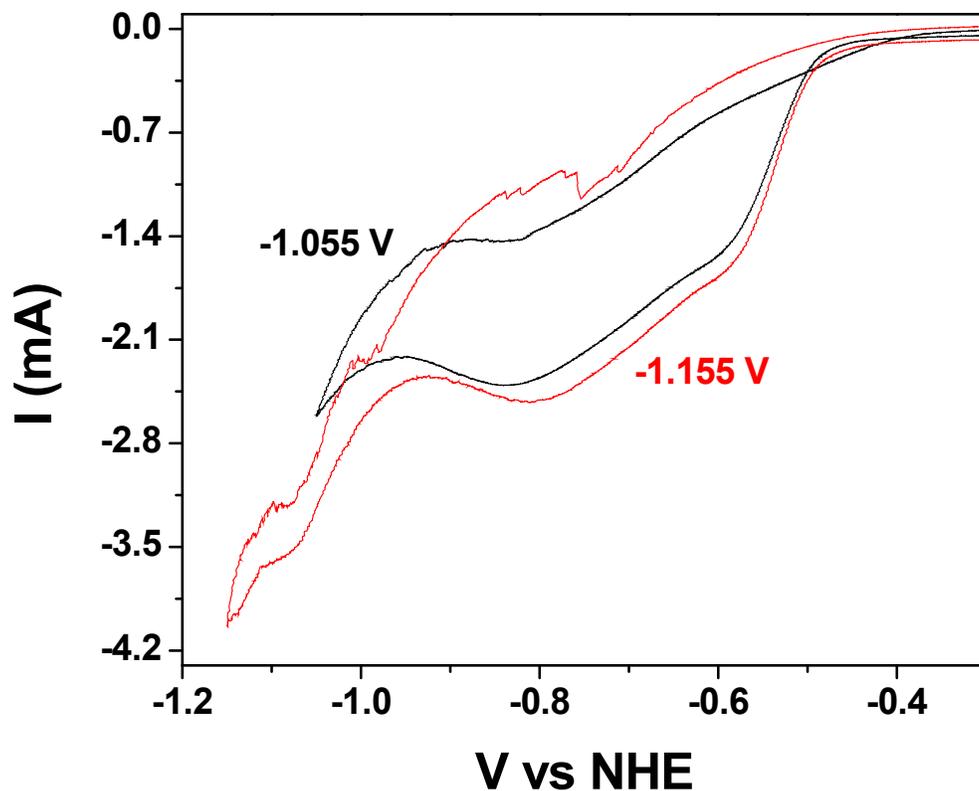


Figura14.- Voltamperograma

4.3.- Corriente muestreada.

Del Potencial de circuito abierto y voltamperometría cíclica realizadas anteriormente se selecciona el intervalo de potencial en que se lleva a cabo el estudio cronoamperométrico en régimen de difusión no estacionario.

Este estudio consiste en aplicar una serie de pulsos de potencial al electrodo de disco de acero inoxidable (RDE), empezando del potencial de circuito abierto (-0.53 V vs. NHE) hasta un potencial comprendido en el intervalo -0.805 V $< E < -0.53$ V vs. NHE durante 10 segundos con incrementos de 20 mV; mientras que las velocidades de rotación del disco fueron 400, 600, 800 y 1000 rpm.

En la figura 15 se muestran las curvas $I_{\text{muestreada}}$ vs t a 400 RPM a diferentes potenciales, cabe mencionar que esto se hizo para velocidades de agitación de: 400, 600, 800 y 1000RPM. A partir de estas curvas se seleccionaron los puntos en los cuales la corriente no varía, estos puntos se usaron para construir las curvas de $I_{\text{muestreada}}$ vs E (V vs NHE).

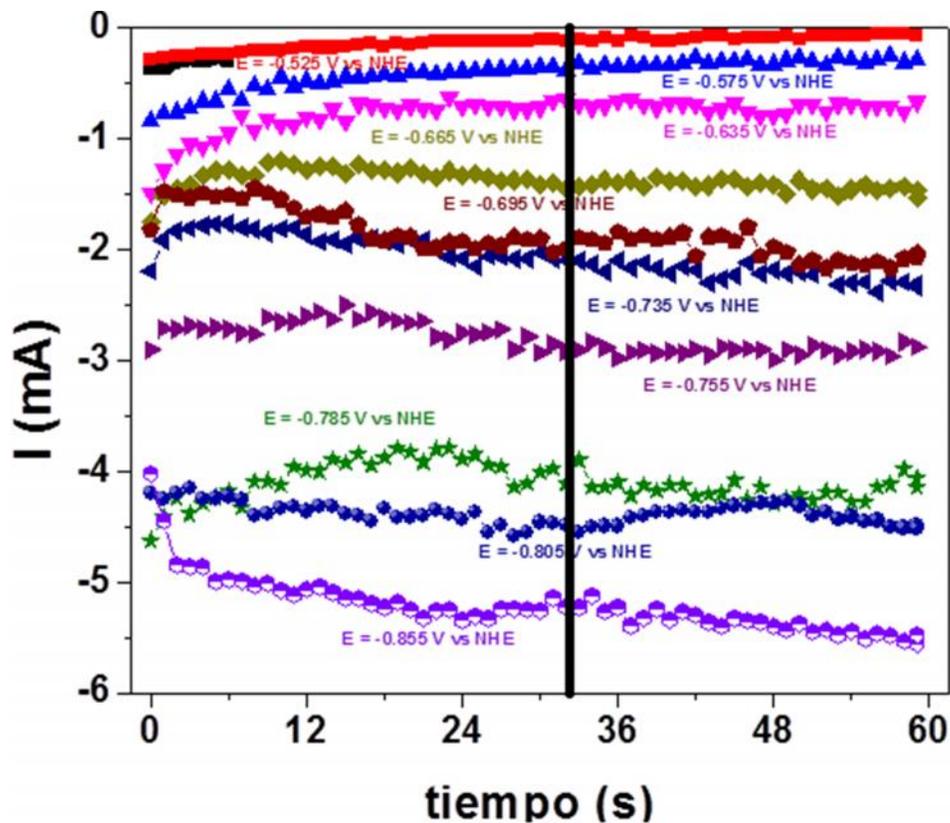


Figura 15.- Curvas $I_{\text{muestreada}}$ vs t a diferentes potenciales y 400 RPM.

En la figura 16 se muestran las curvas de $I_{\text{muestreada}}$ vs E (V vs NHE) para las diferentes velocidades de agitación a las que se hizo este estudio. Dado que a potenciales menores de -0.45 V vs NHE la corriente es independiente de la velocidad de agitación; comportamiento característico de un proceso controlado por transferencia de carga, no se tiene un proceso limitado solo por transferencia

de masa si no un proceso mixto, ya que las curvas nos muestran que el proceso no se lleva a cabo más rápidamente ni variando la corriente, ni variando el potencial y tampoco variando la velocidad de agitación. Por otro lado, en el intervalo de -0.45 V E -0.57 V vs NHE, la corriente es independiente del potencial señalando un proceso limitado por difusión. A potenciales mayores de -0.57 V vs NHE, se muestra un incremento en la corriente esto se debe a dos factores principales: a) la reducción del medio y b) el cambio de área debido a los depósitos de Cobalto y Níquel metálicos. Finalmente, del análisis de la Figura 16, se seleccionó un valor de corriente de -1.7 A para llevar a cabo los estudios de macro electrólisis en el reactor.

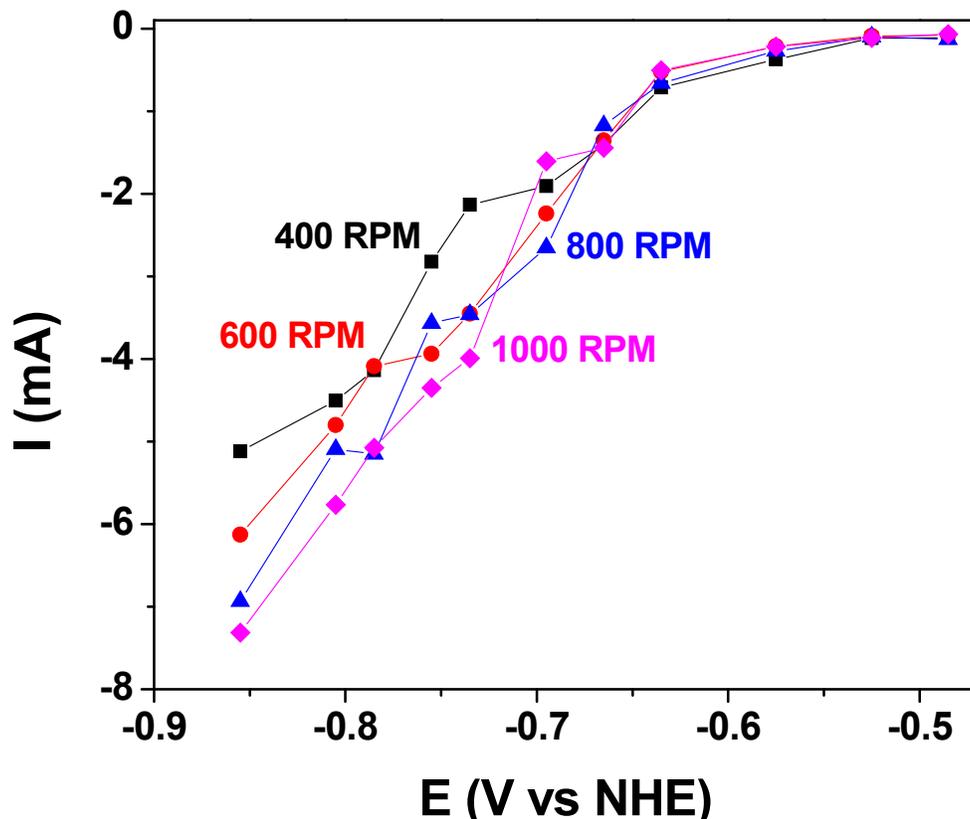


Figura 16.- Curvas $I_{muestreada}$ vs $E / \text{V vs NHE}$ a velocidades de agitación de 400, 600, 800 y 1000 RPM.

4.4.- Recuperación de Co-Ni en el RCE-LC.

En la figura 17 se muestra el decaimiento normalizado de la concentración de cobalto en la solución problema en función del tiempo y a velocidades de agitación de 300, 500 y 700 RPM.

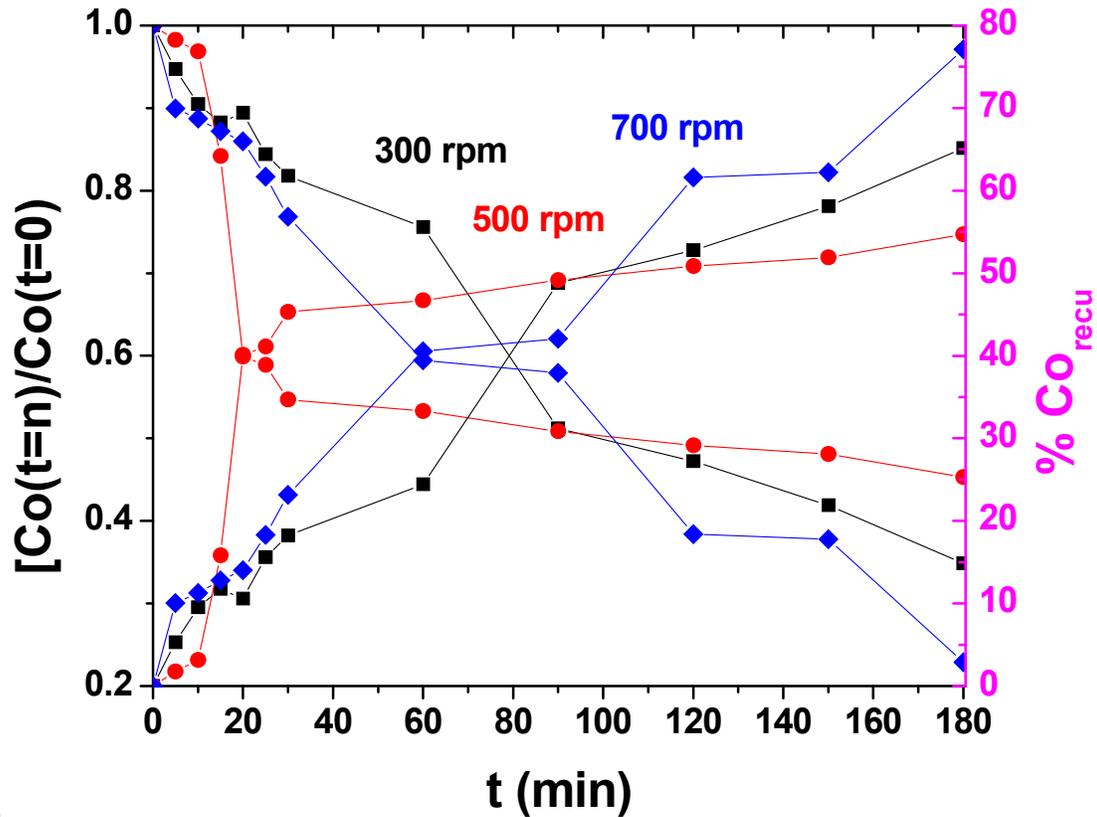


Figura 17.- Decaimiento de concentración normalizada para Cobalto a velocidades de agitación de 300, 500 y 700 RPM. Porcentaje de recuperación de Cobalto a velocidades de agitación de 300, 500 y 700 RPM.

En la Figura 17 se observa un decaimiento de concentración constante de manera semi-lineal a una velocidad de rotación de 300 RPM y un porcentaje de recuperación de hasta 65%. Cuando la velocidad de agitación se incrementa a 500 RPM el decaimiento de concentración es muy rápido en los primeros 40 minutos y disminuye al aumentar el tiempo de electrólisis hasta llegar a un porcentaje de recuperación del 54%. Para la electrólisis a velocidad de rotación de 700 RPM el

mayor porcentaje de recuperación de cobalto es de 77%, sin embargo también se pueden apreciar fluctuaciones en el perfil de concentración, esto se debe a que a medida que el tiempo de electrólisis avanza la solución sufre un cambio de pH lo suficientemente considerable y en este nuevo pH se favorece la reducción del agua creándose una competencia entre la reducción de la especie y la reducción del medio; la reducción del agua es un proceso parásito y su existencia disminuye nuestras eficiencias y aumenta nuestro consumo energético.

De manera simultánea en la figura 18, se muestra el decaimiento normalizado de la concentración de Níquel en la solución problema en función del tiempo en función del tiempo de electrólisis a 300 500 y 700 RPM.

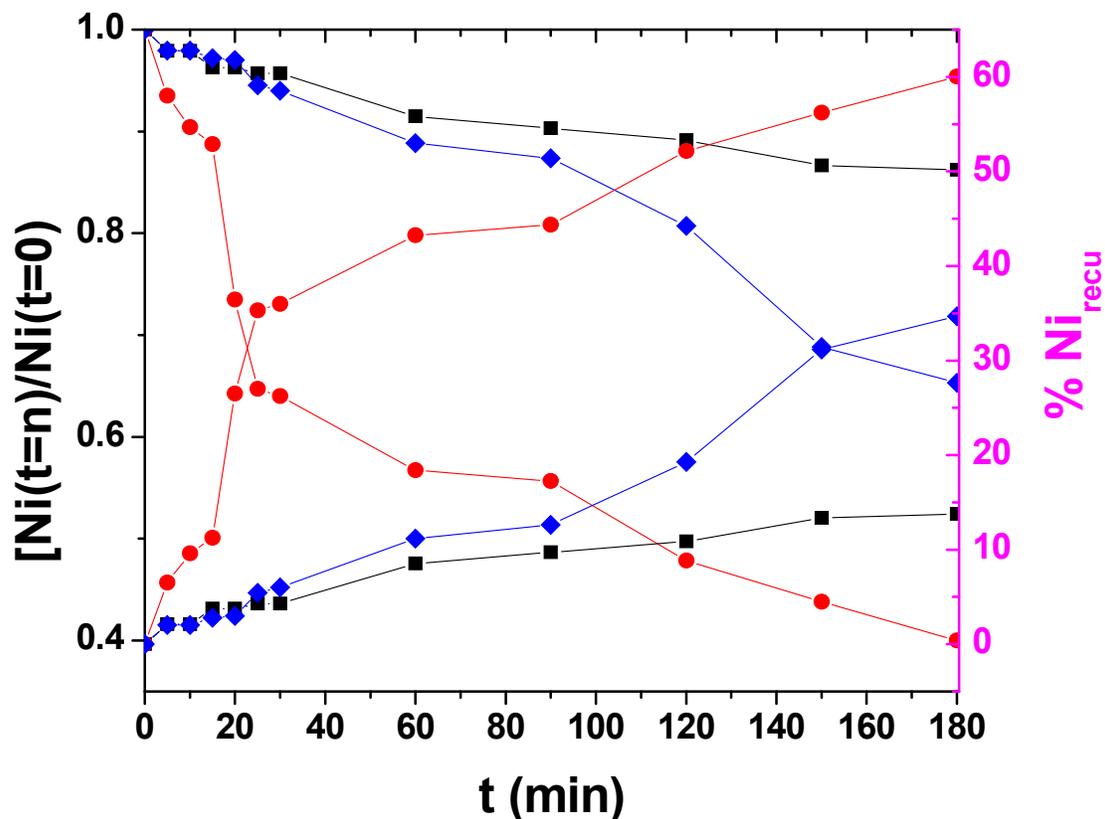


Figura 18.- Decaimiento de concentración normalizada para Níquel a velocidades de agitación de 300, 500 y 700 RPM. Porcentaje de recuperación de Níquel a velocidades de agitación de 300, 500 y 700 RPM.

De manera similar al perfil de cobalto en la Figura 18 se muestra bajos rendimientos a velocidades de 300 y 700 RPM con tasas de recuperación del 14 y el 35% respectivamente; Por otro lado, a 500 RPM el decaimiento de concentración de níquel es máximo con una tasa de recuperación del 60%. Esto se debe a que el decaimiento de concentración se favorece a 500 RPM en los primeros 40 minutos de electrólisis, posiblemente se debe a que a esta velocidad se favorece la atracción de la especie del bulk hacia la superficie donde se lleva a cabo la reacción, pero a manera de que la electrólisis avanza la solución tiene una caída de pH hasta llegar a los valores de pH donde se favorece la reducción del agua y se crea una competencia en el proceso, entre la reducción de la aleación y la del agua.

El desempeño del RCE-LC puede observarse en la Figura 19, en donde se muestra el potencial anódico, potencial catódico y potencial de celda en función del tiempo de electrólisis y a las tres velocidades diferentes de rotación (300, 500 y 700 RPM), cabe mencionar que estos experimentos se realizaron a corriente constante ($-1.7 \text{ A en } 80 \text{ cm}^2$).

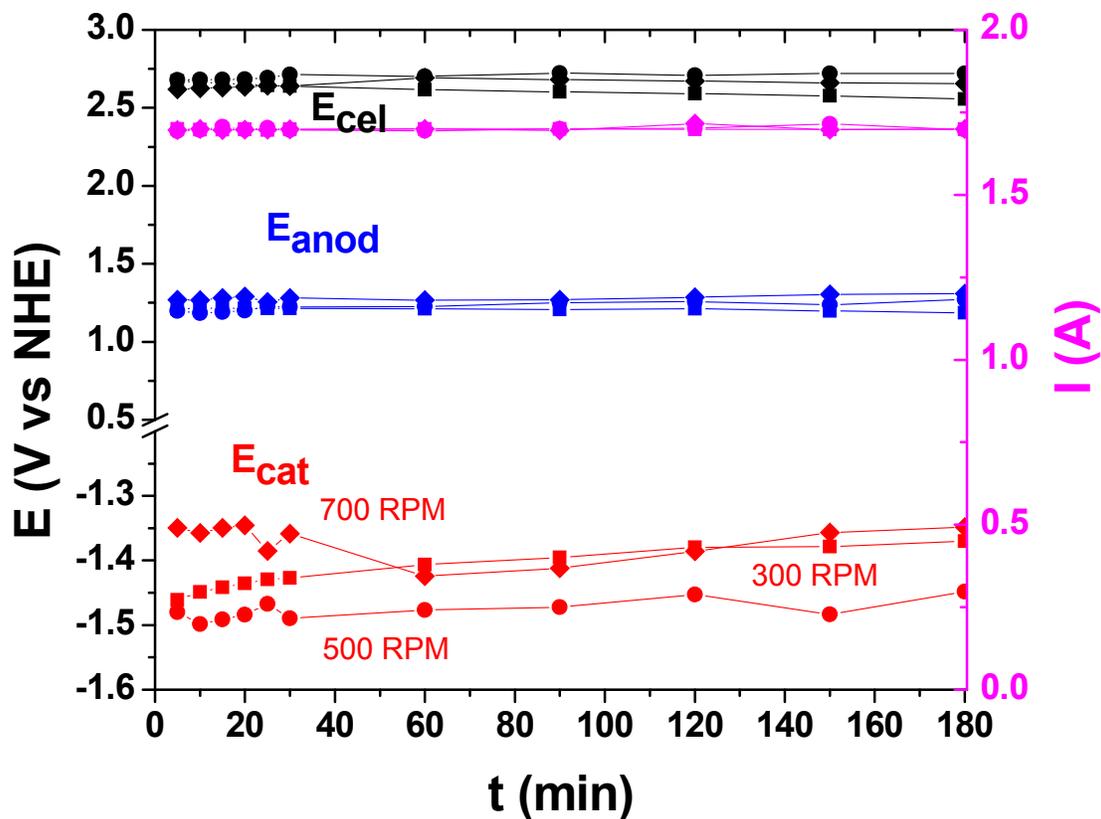


Figura 19.- Potencial Anódico, Catódico y de Celda y corriente utilizada en el proceso a diferentes velocidades de rotación 300, 500 y 700 RPM.

A 500 RPM se observa solo en los primeros 40 minutos de electrólisis que el potencial catódico es muy negativo, debido a que se requiere mayor energía para depositar la aleación Co-Ni sobre acero, dando el tiempo necesario para que se forme una lámina uniforme de la especie, en los siguientes 80 minutos el potencial catódico disminuye ya que la naturaleza del sustrato cambio (aleación de Co – Ni). En cuanto a los últimos 60 minutos de electrólisis el potencial catódico se incrementa debido a que la especie ha sido agotada y como se trabaja a corriente constante ésta se ocupa en reacciones parásitas (reducción del agua).

Es probable que las tasas de recuperación bajas que presentan los experimentos a 300 y 700 RPM se deban a que el potencial catódico no es suficiente para electrodepositar de manera más eficiente la especie.

El desempeño del reactor se determinó evaluando la eficiencia de corriente obtenida a partir de las electrólisis mostradas en la Figura 19, estas fueron obtenidas mediante la siguiente ecuación (1):

$$\{ = \frac{zF\Delta CV_r}{Q_t} \quad (1)$$

donde z es el número de electrones que se transfieren en la reacción electroquímica, en este caso igual a 2, F es la constante de Faraday igual a 96480 C mol^{-1} , $C = (C_0 - C_t)$ es el gradiente de concentración en mol cm^{-3} , V_r , es el volumen de la solución en cm^3 , y Q_t es la carga total en la electrólisis, definida por la siguiente integral numérica:

$$Q_t = \int_0^t I(t) d(t) \quad (2)$$

donde $I(t)$ es el valor de la intensidad de corriente que se registra a cada intervalo de tiempo, t , el tamaño de paso o incremento, (Δt) .

El consumo de energía se evaluó utilizando la siguiente ecuación (3):

$$E_{con} = \frac{zF\Delta CE_{cel}}{\{ \left(\frac{1}{3.6} \right)} \quad (3)$$

Donde; E_{con} es el consumo energético en kW h m^{-3} de efluente, E_{cel} es el potencial de celda en V , y ϕ es la eficiencia de corriente. En la figura 20 se muestran las eficiencias y los consumos energéticos con respecto al tiempo de electrólisis que

se obtuvieron para las tres diferentes velocidades de rotación a las cuales se hicieron las electrólisis.

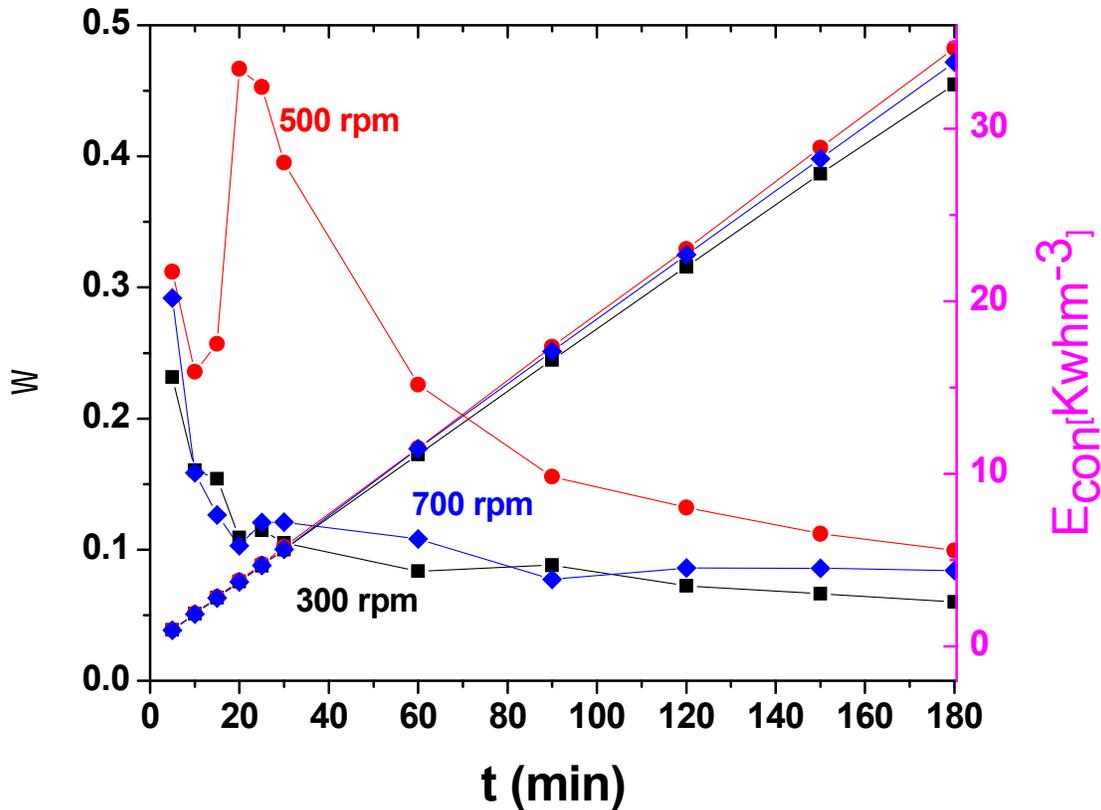


Figura 20.- Eficiencia de corriente con respecto al tiempo de electrólisis a velocidades de agitación de: 300, 500 y 700 RPM. Consumo energético con respecto al tiempo de electrólisis a velocidades de agitación de 300, 500 y 700 RPM.

Se puede observar que las eficiencias que se obtuvieron a las diferentes velocidades de rotación no varían mucho entre sí pero son eficiencias bajas, esto se debe a que al avanzar el tiempo de electrólisis el pH de la solución cambió y se llegó hasta valores de pH donde se favorece la reducción del agua, entonces se presentó una competencia en el proceso, entre la reducción de la aleación y la reducción del agua.

Conclusiones.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las electrólisis a las diferentes velocidades de rotación para la solución problema de Co-Ni se concluye lo siguiente:

De la caracterización fisicoquímica y termodinámica de la solución problema se obtuvieron las ventanas de trabajo en cuanto a pH para la electrólisis de la solución problema ($4.5 < \text{pH} < 5.5$) y también se supo que la reducción del Níquel se llevará a cabo antes que la del Cobalto, mientras que con la caracterización electroquímica vía micro electrólisis de la solución modelo se seleccionó un valor de corriente de -1.7 A para llevar a cabo los estudios de macro electrólisis en el reactor. Con estos datos se procedió a la recuperación de Co-Ni del lixiviado en el RCE-LC y se obtuvieron los perfiles de concentración que se presentan a tres diferentes velocidades de rotación (300, 500 y 700 RPM) de los cuales se observó que para 500 RPM se tiene el mayor porcentaje de recuperación así como la mayor eficiencia.

Referencia bibliográfica.

1. Cui, J. & Zhang, L., 2008. Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A Review. *Journal of Hazardous Materials*, 158, pp.228-56.
2. Xstrata, 2014. Xstrata Copper's Horne Smelter. [En línea] Disponible en: www.xstrata.com.
3. Namias, J., 2013. The Future of Electronic Waste Recycling in the US. Columbia: Earth Engineering Center. Columbia University.
4. Jiang, P. & Harney, M., 2012. Improving the End-of-Life for Electronic Materials via Sustainable Recycling Methods. Advanced Technology Materials Inc.
5. Kamberovic, Z., Zeljko, K., Korac, M. & Ranitovic, M., 2011. Hydrometallurgical Process for Extraction of Metals from Electronic Waste. Association of Metallurgical Engineers of Serbia.
6. Khaliq, A., Akbar, M., Brooks, G. & Masood, S., 2014. Metal Extraction Processes for Electronic Waste and Existing Industrial Routes. *Resources*, 2014(3), pp.152-79.
7. Giannopoulou, I., Panias, D., 2008. Differential precipitation of copper and nickel from acidic polymetallic aqueous solutions. *Hydrometallurgy* **90**, 137–146.
8. G. Prentice. *Electrochemical Engineering Principles*. Prentice Hall, New Jersey, 1991
9. Pletcher, D., Walsh, F. 1995. *Industrial Electrochemistry* Blackie Academic & Professional. U. K.

10. S. Alonso, M. Tesillo, F.F. Rivera, E.P. Rivero, I. González, *Proceedings of the XXIV congress of SMEQ*, Puerto Vallarta Jalisco, Méx. (2009).
11. <http://www.raeeandalucia.es/> consulta: 04 de Agosto del 2017
12. <http://www.rezagos.com/pages/raee> consulta: 04 de Agosto del 2017
13. <http://www.gerelux.com/spip.php?article21> consulta: 04 de Agosto del 2017
14. <https://mineriaurbana.org/2013/12/01/el-mundo-desecha-40-millones-de-toneladas-de-raee/> consulta: 04 de Agosto del 2017
15. <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/reciclatron/#.WcweYltSziU> consulta: 11 de Agosto del 2017
16. F. Walsh, *A First Course in Electrochemical Engineering*, The Electrochemical Consultancy, Hanst, Inglaterra. 1993.
17. M. T. Oropeza, C. Ponce de León e I. González, *Ingeniería Electroquímica: Principios y Aplicaciones*, UAM-Iztapalapa, México D. F. México. 1995.
18. C. Blochera, *Water Res.*, **37**, 4018 (2003)
19. J.S. Newman y W. Tedeman, *Electrochemical Engineering*, 11, 353, 1978.
20. M.I. Ismail. *Electrochemical Reactors*, Their Science and Technology, Part A: Fundamentals, Electrolysers, Batteries and Fuel Cells; Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Holanda. 1989.
21. F. Walsh, *A First Course in Electrochemical Engineering*, The Electrochemical Consultancy, Hanst, Inglaterra. 1993.
22. F. Coeuret, *Introducción a la Ingeniería Electroquímica*, Edit. Reverté, Barcelona, España. 1992.

23. J. M. Costa, *Fundamentos de Electrólica: Cinética electroquímica y sus aplicaciones*, Edit. Alhambra, Barcelona, España. 1982.
24. K. Rajeshwar, J.G. Ibañez y G.M. Swain, *J. Appl. Electrochem., Reviews of Electrochemistry*, 1075, 1994.
25. Rivera, F.F., Nava, J.L., 2007. Mass transport studies at rotating cylinder electrode (RCE) Influence of using plates and concentric cylinder as counter electrodes. *Electrochimica Acta* **52**, 5868–5872.
26. E.P. Rivero, P. Granados, F.F. Rivera, M. Cruz, I. González. *Chemical Engineering Science* **65** (2010) 3042–3049.
27. F. Goodridge y K. Scott (1995). “Electrolytic Reactor Design, Selection and Scale-up en Electrochemical Process Engineering: a guide to the design of electrolytic plant”. Edit. Plenum Press. New York, USA. 201-204.
28. D. Pletcher and F.C. Walsh. *Industrial Electrochemistry, Blackie Academic & Professional*. 1990.
29. J. M. Grau and J.M. Bisang, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **77**, 465 (2002)
30. E.R. Soto, *Ingenierías*, **23**, 46 (2004)
31. S. Alonso, M. Tesillo, F.F. Rivera, E.P. Rivero, I. González, *Proceedings of the XXIV congress of SMEQ*, Puerto Vallarta Jalisco, Méx. (2009).
32. F. Fabian, Ph. Mandin, M. J. Ridd, M. Sheehan, *ECS Transactions*, **3** (2006) 303.
33. <https://patentados.com/patente/procedimiento-recuperacion-niquel-cobalto-mediante-lixiviacion-pilas/> consulta: 07 de Agosto del 2017

34. Lupi, C., Pilone, D., Ni-HM spent batteries: A raw material to produce Ni-Co alloys. *Waste Management*, 22 (2002), 871-874.
35. <http://www.irabia.org/web/ciencias/elementos/elementos/pilas/toc.htm>
consulta: 08 de Agosto del 2017
36. F.J. Almazán, F. Caballero, M. Cruz, E.P. Rivero, I. González. Scale-up of rotating cylinder electrode electrochemical reactor for Cu(II) recovery: Experimental and simulation study turbulence regimen. *Electrochimica Acta* **77** (2012) 262-271.
37. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4482/semarnat/semarnat.htm>
consulta: 11 de Agosto del 2017

Anexos.

**PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-161-SEMARNAT-2011,
Que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial**

y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.-
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SANDRA DENISSE HERRERA FLORES, Subsecretaria de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y Presidenta del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con fundamento en los artículos 32 Bis fracción IV de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 7 fracción V, 20, 28 fracción III, 30 y 32 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos; 38 fracción II, 40 fracción X, 41, 44, 45, 46 y 47, de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 12, 13 y 17 del Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos; 28 y 30 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y 8 fracciones V y VI del Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONSIDERANDOS

Que los modelos lineales de producción y consumo actuales provocan una mayor generación de residuos, los cuales de no reciclarse, requerirán de un sitio de disposición final donde ser desechados una vez que termina su vida útil.

Que los Residuos de Manejo Especial pueden recuperarse, ya sea como materia prima para procesos de manufactura o aprovechamiento energético, sin embargo en la actualidad sólo un pequeño porcentaje de los mismos se recupera y aprovecha.

Que, al no valorizar o aprovechar los Residuos de Manejo Especial que pueden ser sujetos a ello, éstos se envían a los sitios de disposición final de Residuos Sólidos Urbanos, reduciendo la vida útil de los mismos, demandando así con mayor frecuencia sitios para la disposición final de los residuos.

Que a través de la aplicación de la presente Norma Oficial Mexicana, se puede incrementar el aprovechamiento de los Residuos de Manejo Especial y tener los beneficios ambientales, económicos y sociales correspondientes, toda vez que un Plan de Manejo es un instrumento a través del cual se busca minimizar la generación y maximizar el aprovechamiento de los residuos en los que se aplica, por lo que al lograr su implementación se incrementaría la cantidad de residuos aprovechados, y como consecuencia se disminuye la carga sobre los recursos naturales y sobre la vida útil de los sitios de disposición final donde se disponen.

Que en cumplimiento a lo establecido en el artículo 47 fracción I de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales aprobó la publicación en el Diario Oficial

de la Federación, con carácter de Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-161-SEMARNAT-2011, Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el Listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho Listado; así como, los elementos y procedimientos para la formulación de los Planes de Manejo, con el fin de que dentro de los 60 días naturales siguientes a su publicación, los interesados presenten sus comentarios ante el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a través del Coordinador del Subcomité IV de Fomento Ambiental, Urbano y Turístico, Mtro. César Rafael Chávez Ortiz, a la dirección Boulevard Adolfo Ruiz Cortines número 4209, piso 5o., ala B, colonia Jardines en la Montaña, código postal 14210, Delegación Tlalpan, o enviarse al fax 56 28 08 98 o al correo electrónico cesar.chavez@semarnat.gob.mx.

Que durante el citado plazo, la Manifestación de Impacto Regulatorio correspondiente estará a disposición del público para su consulta en el domicilio señalado, de conformidad con el artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

Por lo expuesto y fundado he tenido a bien expedir el siguiente:

PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA PROY-NOM-161-SEMARNAT-2011, QUE ESTABLECE LOS CRITERIOS PARA CLASIFICAR A LOS RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL Y DETERMINAR CUALES ESTAN SUJETOS A PLAN DE MANEJO; EL LISTADO DE LOS MISMOS, EL

**PROCEDIMIENTO PARA LA INCLUSION O EXCLUSION A DICHO LISTADO;
ASI COMO, LOS ELEMENTOS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA
FORMULACION DE LOS PLANES DE MANEJO**

PREFACIO

Esta Norma Oficial Mexicana fue elaborada con la participación de los siguientes organismos, bajo la coordinación del Subcomité IV de Fomento Ambiental, Urbano y Turístico, del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales:

AGENCIA DE COOPERACION TECNICA ALEMANA (GTZ)

ALIANZA UNIDOS AMIGOS DEL MEDIO AMBIENTE, A.C.

AMBIEN, SOLUCIONES ECOLOGICAS

ASOCIACION NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA (ANIQ)

ASOCIACION NACIONAL DE TIENDAS DE AUTOSERVICIO Y
DEPARTAMENTALES (ANTAD)

CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LA CELULOSA Y DEL PAPEL
(CNIP)

CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA ELECTRONICA, DE
TELECOMUNICACIONES Y TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION (CANIETI)

CONFEDERACION PATRONAL DE LA REPUBLICA MEXICANA (COPARMEX)

CONCRETOS RECICLADOS, S. A. DE C. V.

CRISTINA CORTINAS NAVA, CONSULTORA AMBIENTAL

ECOLOGIA Y COMPROMISO EMPRESARIAL (ECOCE)

INSTITUTO DE SEGURIDAD Y SERVICIOS SOCIALES DE LOS
TRABAJADORES DEL ESTADO (ISSSTE)

PETROLEOS MEXICANOS (PEMEX)

DIRECCION CORPORATIVA DE OPERACIONES

EXPLORACION Y PRODUCCION

PROACTIVA

SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT)

SERVICIOS Y PROYECTOS EN INGENIERIA AMBIENTAL, S.A. DE C.V.
(SEPIASA)

SUSTENTA

1. Introducción

Gran parte de los residuos que se generan en los procesos industriales, ya sea como subproductos no deseados o como productos fuera de especificación, son Residuos de Manejo Especial. Incorporados a tales residuos de procesos, se generan residuos derivados del consumo de las demás áreas que forman parte de las instalaciones industriales, como oficinas, comedores, centros comerciales, etc.

los cuales por sus características se consideran como Residuos Sólidos Urbanos, pero que por sus volúmenes de generación (superiores a 27.3 kilogramos por día o 10 toneladas por año), pueden requerir ser manejados como Residuos de Manejo Especial.

Refiriéndonos a la última etapa del manejo de residuos, se determina que al recibir en los sitios de disposición final una gran cantidad de Residuos de Manejo Especial, se provoca que éstos se acumulen rápidamente junto con los Sólidos Urbanos y en un tiempo menor al proyectado termine la vida útil de dichos sitios de disposición, además de traer como consecuencias el deterioro al medio ambiente afectando negativamente a: la calidad del aire -por la quema de residuos plásticos, papel, cartón, maderas, textiles, etc.-; contaminación de los suelos y acuíferos -por la excesiva producción de lixiviados con sus respectivos componentes tóxicos-; y afectaciones a la salud -por la proliferación de vectores y fauna nociva-.

Por lo que el objetivo primordial que se persigue con la presente Norma es el de controlar y reducir significativamente cada una de las problemáticas vistas en los puntos anteriores, mediante la elaboración, desarrollo y aplicación de los Planes de Manejo para los Residuos de Manejo Especial.

2. Objetivos

La presente Norma Oficial Mexicana tiene los siguientes objetivos:

2.1 Establecer los criterios que deberán considerar las Entidades Federativas para solicitar a la Secretaría la adición de otras categorías de Residuos de Manejo Especial, de conformidad con la fracción IX del artículo 19 de la Ley.

2.2 Establecer los criterios para determinar los Residuos de Manejo Especial que estarán sujetos a Plan de Manejo y el Listado de los mismos.

2.3 Establecer los criterios que deberán considerar las Entidades Federativas para solicitar a la Secretaría la inclusión o exclusión del Listado de los Residuos de Manejo Especial sujetos a un Plan de Manejo.

2.4 Establecer los elementos y procedimientos para la elaboración de los Planes de Manejo para los Residuos de Manejo Especial.

2.5 Establecer los procedimientos para que las Entidades Federativas soliciten la inclusión o exclusión de Residuos de Manejo Especial del Listado.

3. Campo de aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional para:

3.1 Los grandes generadores de Residuos de Manejo Especial.

3.2 Los grandes generadores de Residuos Sólidos Urbanos.

3.3 Los grandes generadores y los productores, importadores, exportadores, comercializadores y distribuidores de los productos que al desecharse se convierten en Residuos de Manejo Especial sujetos a un Plan de Manejo.

3.4 Las Entidades Federativas que intervengan en los procesos establecidos en la presente Norma.

Quedan excluidos de conformidad con los artículos 17 de la Ley y 33 de su Reglamento, los Residuos de la Industria Minero-Metalúrgica.

4. Referencias

Para la correcta utilización de esta Norma Oficial Mexicana es necesario consultar las Normas Oficiales Mexicanas siguientes o las que las sustituyan:

4.1 Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.- Protección ambiental–Lodos y biosólidos–Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de agosto de 2003.

4.2 Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de junio de 2006.

4.3 Norma Oficial Mexicana NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002.- Protección ambiental- Salud ambiental-Residuos peligrosos biológico-Infeciosos-Clasificación y especificaciones de manejo. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 17 de febrero de 2003.

5. Definiciones

Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana se considerarán las definiciones contenidas en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y su Reglamento, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y las siguientes:

5.1 Características domiciliarias

Son las características físicas, químicas y de cantidad que presentan los residuos generados en casas habitación.

5.2 Estudio técnico-económico:

Estudio realizado a un residuo o a una corriente de Residuos de Manejo Especial, generado en una o más Entidades Federativas que identifique:

- a.** El número de generadores, que hagan posible que el manejo específico y coordinado del residuo permita fomentar o establecer los mecanismos para incrementar su valorización y aprovechamiento.
- b.** Los problemas ambientales asociados al residuo y que a través del manejo específico y coordinado con los diversos sectores involucrados, se minimicen dichos problemas.
- c.** Las opciones técnicas, financieras y sociales disponibles para mejorar el manejo, basado en esquemas de minimización, reutilización, reciclaje y/o valorización del residuo.
- d.** La factibilidad técnica, ambiental, social y económica para mejorar su manejo o facilitar su aprovechamiento.

5.3 Ley

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

5.4 Reglamento

El Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

5.5 Secretaría

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

6. Criterios para clasificar a los residuos de manejo especial

Los criterios aplicables para que las Entidades Federativas soliciten la clasificación de manejo especial para uno o varios residuos son:

6.1 Que se generen en cualquier actividad relacionada con la extracción, beneficio, transformación, procesamiento y/o utilización de materiales para producir bienes y servicios, y que no reúnan características domiciliarias o no posean una de las características de peligrosidad en los términos de la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005.

6.2 Que sea un Residuo Sólido Urbano generado por un gran generador en una cantidad igual o mayor a 10 toneladas al año y que requiera un manejo específico para su valorización y aprovechamiento.

6.3 Que sea un residuo, incluido en el Diagnóstico Básico Estatal para la Gestión Integral de Residuos de una o más Entidades Federativas, o en un Estudio Técnico- Económico.

7. Criterios para determinar los residuos de manejo especial sujetos a plan de manejo

Para que un Residuo de Manejo Especial se encuentre sujeto a un Plan de Manejo, deberá cumplir con los criterios que se detallan a continuación y estar en el Listado de la presente Norma.

7.1 Que sea un Residuo de Manejo Especial.

7.2 Que el residuo como tal o los materiales que lo componen tengan un alto valor económico para el generador o para un tercero, es decir, que genere un beneficio en su manejo integral, a través de la reducción de costos para el generador o que sea rentable para el generador o para el tercero, con base en las posibilidades técnicas y económicas del residuo para:

- a.** Su aprovechamiento mediante su reutilización, remanufactura, rediseño, reciclado o recuperación de materiales secundarios o de energía, o
- b.** Su valorización o co-procesamiento a través de su venta o traslado a un tercero, o
- c.** La recuperación de sus componentes, compuestos o sustancias.

7.3 Cuando se trate de un residuo de alto volumen de generación, lo que implica que el residuo generado represente al menos el 10% del total de los Residuos de

Manejo Especial, incluidos en el Diagnóstico Básico Estatal para la Gestión Integral de Residuos; únicamente para efectos del cálculo anterior no se consideraran los residuos de la construcción; y que sea generado por un número reducido de generadores, esto es, que el 80% del mismo, sea generado por el 20% o menos, de los generadores.

7.4 Que con base en el Diagnóstico Básico Estatal para la Gestión Integral de Residuos, o en un Estudio Técnico-Económico, se demuestre que se cuenta con la infraestructura necesaria para manejar el residuo, y que por sus características y cantidad generada, se requiera facilitar su gestión o mejorar su manejo en todo el país.

8. Criterios para la inclusión o exclusión de residuos al listado de residuos sujetos a plan de manejo

Para que un Residuo de Manejo Especial sea incluido en el Listado contenido en la presente Norma, además de cumplir con los criterios del apartado 7, deberá ser de interés para 2 o más Entidades Federativas para su control o aprovechamiento, a través de los Planes de Manejo. En caso contrario, para que un Residuo de Manejo Especial sea excluido del referido Listado, además de no cumplir con los criterios del apartado 7, no deberá ser de interés para las Entidades Federativas referente a su control o aprovechamiento, a través de los Planes de Manejo.

Para lo anterior, la Secretaría establecerá el procedimiento a través del cual, las Entidades Federativas solicitarán la inclusión o exclusión del Listado, de un

Residuo de Manejo Especial en los términos del artículo 19 fracción IX de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

9. Elementos para la formulación de los planes de manejo

Para formular y aplicar los Planes de Manejo de los Residuos de Manejo Especial sujetos a ellos se deberá incluir el principio de responsabilidad compartida, según sea el caso, que requiere de la participación conjunta, diferenciada y coordinada de los actores involucrados en la cadena de valor, además de evitar el establecer barreras técnicas y económicas innecesarias al comercio y considerar los elementos siguientes:

9.1 Elementos Generales

Los elementos generales que debe contener el Plan de Manejo independientemente de su modalidad son:

9.1.1 Información general:

9.1.1.1 Nombre, denominación o razón social del solicitante,

9.1.1.2 Nombre del representante legal,

9.1.1.3 Domicilio para oír y recibir notificaciones,

9.1.1.4 Modalidad del Plan de Manejo y su ámbito de aplicación territorial,

9.1.1.5 Residuo(s) objeto del plan.

9.1.2 Diagnóstico del Residuo:

9.1.2.1 Para los Residuos de Manejo Especial generados en la actividad productiva, el diagnóstico deberá contener únicamente la cantidad de residuos generados expresado en toneladas por día o kilogramos por día,

9.1.2.2 Para productos de consumo que al desecharse se convierten en Residuos de Manejo Especial el diagnóstico deberá contener la cantidad generada o estimada del residuo e identificación de sus fuentes potenciales de generación; y además podrá contener:

9.1.2.2.1 Principales materiales que componen el residuo,

9.1.2.2.2 Manejo actual del residuo,

9.1.2.2.3 Problemática ambiental, asociada al manejo actual del residuo,

9.1.2.2.4 Identificación del uso o aprovechamiento potencial del residuo en otras actividades productivas,

9.1.3 Formas de manejo integral propuestas para el residuo;

9.1.4 Metas de cobertura del plan, de recuperación o aprovechamiento del residuo, durante la aplicación del Plan de Manejo;

9.1.5 Descripción del destino final del residuo sea nacional o internacional;

9.1.6 Mecanismos de operación, control y monitoreo para el seguimiento del plan;

9.1.7 De ser aplicable, especificar los participantes del plan y su actividad;

9.1.8 De ser aplicable indicar los mecanismos de difusión y comunicación a la sociedad en general.

9.2 Elementos Adicionales

Los elementos adicionales que se consideren para la elaboración de los Planes de Manejo, atenderán a una o más de las modalidades establecidas en el artículo 16 del Reglamento, de acuerdo con lo siguiente:

9.2.1 Privados

9.2.1.1 Descripción de la Infraestructura interna y externa involucrada,

9.2.1.2 De ser aplicable, descripción de las estrategias de prevención y minimización, que pueden ser:

9.2.1.2.1 Sustitución de materias primas,

9.2.1.2.2 Cambio de tecnología, o

9.2.1.2.3 Aplicación de mejores prácticas.

Todas las estrategias propuestas deben ser viables en términos técnicos, económicos y ambientales, así como las etapas y necesidades para la programación, implementación y operación del Plan de Manejo.

9.2.2 Mixtos

9.2.2.1 Identificar las acciones de participación en el ámbito de sus respectivas competencias, de las autoridades, federal, estatal o municipal y del sujeto obligado para la aplicación del Plan de Manejo.

9.2.2.2 En su caso, descripción de los mecanismos de adhesión al Plan de Manejo.

9.2.2.3 Elaborar y firmar un convenio marco que permita dar certidumbre a los acuerdos alcanzados en el desarrollo del Plan de Manejo.

9.2.3 Individuales

Los Planes de Manejo individuales deberán contener únicamente los elementos generales descritos en el numeral 9.1 y en su caso los del 9.2.1.

9.2.4 Colectivos

9.2.4.1 Identificar las acciones de participación de cada uno de los involucrados para la aplicación del Plan de Manejo.

9.2.4.2 En su caso, descripción de los mecanismos de adhesión al Plan de Manejo.

9.2.4.3 En su caso, definir las estrategias para difundir y comunicar a los consumidores, las sugerencias y posibilidades existentes para prevenir y minimizar la generación del residuo sujeto a Plan de Manejo, así como las formas adecuadas para manejarlos, valorizarlos o acopiarlo.

9.2.4.4 Elaborar y firmar un convenio marco que permita dar certidumbre a los acuerdos alcanzados en el desarrollo del Plan de Manejo.

10. Procedimientos aplicables en esta norma

10.1 La Secretaría y las Entidades Federativas de común acuerdo determinarán nuevas categorías de Residuos de Manejo Especial, de conformidad con la fracción IX del artículo 19 de la Ley y con los criterios del punto 6 de esta Norma, mismas que se publicarán en el Diario Oficial de la Federación.

10.2 La Secretaría deberá cumplir con lo establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización sobre el procedimiento para modificación de Normas Oficiales Mexicanas, para la inclusión o exclusión de un Residuo de Manejo Especial al Listado de los residuos sujetos a Plan de Manejo de la presente Norma.

10.3 Para la presentación y registro de los Planes de Manejo.

Una vez formulado el Plan de Manejo, deberá presentarse ante la Entidad Federativa que corresponda al ámbito territorial de implementación, a través de los formatos que se expidan para los fines y efectos correspondientes. En el caso de los Planes de Manejo bajo la modalidad nacional y regional, deberán adicionalmente presentarse ante la Secretaría.

Las Entidades Federativas podrán, de conformidad con sus facultades, implementar un registro de los Planes de Manejo presentados por los particulares y hacerlo del conocimiento del público en general.

11. Concordancia con normas internacionales

Esta Norma no coincide con ninguna Norma Internacional por no existir Norma Internacional sobre el tema tratado.

12. Bibliografía

12.1 Ley Federal del Mar. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de enero de 1986.

12.2 Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT-2004, que establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción en el Distrito Federal. Publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 12 de julio de 2006.

12.3 Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-011-SMA-RS-2008, que establece los requisitos para el manejo de los residuos de la construcción para el Estado de México. Publicada en la Gaceta del Gobierno del Estado de México el 21 de mayo de 2009.

12.4 SEMARNAT, Guía de cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002.

13. Vigilancia

La vigilancia de la presente Norma Oficial Mexicana corresponde a los Gobiernos del Distrito Federal y de los Estados a través de sus Instancias Ambientales de Inspección y Vigilancia, en el ámbito de sus respectivas jurisdicciones y

competencias, quienes verificarán la existencia y la presentación del Plan de Manejo.

ANEXO NORMATIVO

LISTADO DE RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL SUJETOS A PRESENTAR PLAN DE MANEJO

El Listado de los Residuos de Manejo Especial sujetos a Plan de Manejo se indica a continuación:

I. Los siguientes residuos de servicios de salud, generados por un gran generador en centros médico-asistenciales:

- Papel y cartón
- Ropa clínica, ropa de cama y colchones
- Plásticos
- Madera
- Vidrio

II. Los residuos agroplásticos generados por las actividades intensivas agrícolas, silvícolas y forestales

III. Los residuos orgánicos de las actividades intensivas avícolas, ganaderas y pesqueras

IV. Los residuos de las actividades de transporte federal, que incluye servicios en los puertos, aeropuertos, centrales camioneras y estaciones de autotransporte y los del transporte público, que incluye a los prestadores de servicio que cuenten con terminales, talleres o estaciones, que se incluyen en la lista siguiente y que se generen por un gran generador en una cantidad mayor a 10 toneladas al año por residuo o su equivalente:

- Envases metálicos.
- Envases y embalajes de papel y cartón.
- Envases de vidrio.
- Envases de tereftalato de polietileno (PET).
- Envases de poliestireno expandido (unicel).
- Bolsas de polietileno.
- Tarimas de madera.

V. Lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales:

- Aquellos que se generen por un gran generador en una cantidad mayor a 100 toneladas anuales o su equivalente.

VI. Los residuos de las tiendas departamentales o centros comerciales, que se incluyen en la lista siguiente y que se generen en una cantidad mayor a 10 toneladas al año por residuo o su equivalente:

- Envases metálicos.
- Envases y embalajes de papel y cartón.
- Envases de vidrio.
- Envases de tereftalato de polietileno (PET).
- Envases de poliestireno expandido (unicel).
- Tarimas de madera.
- Residuos orgánicos.
- Película de polietileno para embalaje (playo).

VII. Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general, que se generen en una obra en una cantidad mayor a 80 m³.

VIII. Los productos que al transcurrir su vida útil se desechan y que se listan a continuación:

a) Residuos tecnológicos de las industrias de la informática y fabricantes de productos electrónicos:

- Computadoras personales de escritorio y sus accesorios.
- Computadoras personales portátiles y sus accesorios.
- Teléfonos celulares.
- Monitores con tubos de rayos catódicos (incluyendo televisores).
- Pantallas de cristal líquido y plasma (incluyendo televisores).
- Reproductores de audio y video portátiles.
- Cables para equipos electrónicos.
- Impresoras, fotocopiadoras y multifuncionales.

b) Residuos de fabricantes de vehículos automotores:

- Vehículos al final de su vida útil.

c) Otros que al transcurrir su vida útil requieren de un manejo específico y que sean generados por un generador en una cantidad mayor a 10 toneladas al año y por residuo:

Neumáticos de desecho.

Artículos de plástico como: politereftalato de etileno (PET), polietileno de alta y baja densidad (PEAD y PEBD), policloruro de vinilo (PVC), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y policarbonato (PC).

Bolsas de polietileno.

Envases, embalajes y artículos de madera.

Envases, embalajes y perfiles de aluminio.

Envases, embalajes y perfiles de metal ferroso.

Envases, embalajes y perfiles de metal no ferroso.

Papel y cartón.

Vidrio.

Ropa, recorte y trapo de algodón.

Ropa, recorte y trapo de fibras sintéticas.

Hule natural y sintético.

Envase de multilaminados de varios materiales.

Refrigeradores.

Aire acondicionado.

Lavadoras.

Secadoras.

Hornos de microondas.