

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO
DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE
APROVECHAMIENTO”**

Realizado por:

María Augustha Vásquez Pock

Directora del Proyecto:

MSc. Katty Coral

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERA AMBIENTAL

Enero, 2021

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA
EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, MARÍA AUGUSTHA VÁSQUEZ POCK, con cédula de identidad número 1724807332, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

A handwritten signature in blue ink, reading "María A. Vasquez", is written over two horizontal lines.

FIRMA

MARÍA AUGUSTHA VÁSQUEZ POCK

1724807332

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA
EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO
DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA CON FINES DE APROVECHAMIENTO”**

Realizado por:

MARÍA AUGUSTHA VÁSQUEZ POCK

Como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERA AMBIENTAL

Ha sido dirigido por la profesora:

KATTY CORAL

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Katty Coral', is written over a horizontal line. The signature is fluid and cursive.

FIRMA

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA
EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

Alberto Aguirre

Carolina Zurita

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral ante
el tribunal examinador



FIRMA
Alberto Aguirre



FIRMA
Carolina Zurita

Quito, Enero de 2021

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

El presente Trabajo de Fin de Carrera ha sido realizado dentro del Programa de Investigación de la Universidad Internacional SEK denominado:

BIODIVERSIDAD Y RECURSOS NATURALES APLICADOS A LA GESTIÓN AMBIENTAL Y LA BIOTECNOLOGÍA

Perteneciente a la Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido culminar mi carrera y darme día a día la fuerza, las ganas y la ayuda de luchar por mis sueños y bendecirme en cada etapa de mi formación y sobre todo por darme salud para salir adelante.

A mi Madre Martha y a mi Padre Iván que han sido los dos pilares fundamentales en mi vida y a lo largo de mi carrera, siendo mi motor para terminar mis estudios y siempre han estado junto a mi apoyándome y dándome consejos que han sido positivos para mi vida.

A mi hermano Joseph por su apoyo y palabras de ánimo en todo momento.

A mis familiares de igual manera por alentarme a esforzarme día a día.

Y a mis amigos y profesores de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK que han estado a lo largo de estos años en mi formación académica y que compartimos enseñanzas, conocimientos y momentos que perduraran por siempre.

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

AGRADECIMIENTO

A las personas más especiales e indispensables en mi vida que son mis dos padres y a mi hermano que día a día han estado alentándome a seguir adelante a nunca rendirme y a darme por vencida y gracias a sus consejos y a su esfuerzo he podido llegar a cumplir mi meta y ser un orgullo para ellos y para mí misma, además por su cariño siempre que ha sido importante.

A mi familia en general que de igual manera han estado presentes brindándome su apoyo y confianza.

A la MSc. Katty Coral por su ayuda, paciencia y comprensión para realizar mi trabajo y por brindarme sus conocimientos y experiencias día a día, y a todos mis profesores en general que formaron parte de mi proceso de enseñanza y aprendizaje para mi carrera.

A mi novio Jonathan Basall que durante años ha estado apoyándome y dándome el aliento para no rendirme y cumplir con mis metas y propósitos.

Finalmente, a mis amigos que me ayudaron en su momento a lo largo de todo este proceso, y por todos los años compartidos en clases.

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA
EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

Para someter a:

To be submitted:

**“RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO
DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE
APROVECHAMIENTO”**

María Augustha Vásquez, Katty Coral

Universidad Internacional SEK. Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito, Ecuador

*AUTOR DE CORRESPONDENCIA: MSc Katty Coral.

Universidad Internacional SEK,

Facultad de Ciencias Ambientales y Naturales, Quito, Ecuador.

Teléfono: 0983084617; email: katty.coral@uisek.edu.ec

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

RESUMEN

Esta investigación se basó en la recuperación electrolítica de Zinc a partir de residuos sólidos de una empresa metal – metálica, que cuenta con procesos de pintura electrostática, galvanizado y cromatizado. En estos procesos se generan residuos y lodos peligrosos que se los almacena en contenedores plásticos para su posterior gestión. La normativa ambiental ecuatoriana en la Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales establece un límite máximo permisible para el Zinc de 420 mg/kg para extracción de metales en base seca, los residuos de lodo de la empresa dan como resultado un valor de 45600.0 mg/kg de Zn, superando los valores de la normativa ambiental. Se diseñó y construyó un sistema electroquímico conteniendo una celda electroquímica, un transformador de energía y electrodos para realizar electrodeposición de Zinc. En total se realizaron ocho pruebas con diferentes metales como ánodos y cátodos en intervalos de diferentes tiempos, como resultado final se evidenció una eliminación de zinc del líquido electrolítico en la primera celda de 2.05 mg/L y en la segunda de 0.1 mg/L, a lo largo de todas las pruebas. Esta recuperación es baja para el lodo residual de la empresa, por lo que no se recomienda su aplicación. El líquido electrolítico no disolvió el total de zinc de la muestra, por lo que no se puede evaluar la eficiencia en el tratamiento en aguas, siendo esta una recomendación de este trabajo.

Palabras claves: Residuos, Zinc, normativa ambiental, sistema electroquímico, celda electroquímica

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

ABSTRACT

This research was based on the electrolytic recovery of Zinc from solid waste from a metal-metal company, which has electrostatic painting, galvanizing and chromating processes. In these processes, hazardous waste and sludge are generated and stored in plastic containers for later management. The Ecuadorian environmental regulations in the Technical Standard for Hazardous and Special Wastes establishes a maximum permissible limit for Zinc of 420 mg / kg for metal extraction on a dry basis, the company's sludge residues result in a value of 45600.0 mg / kg of Zn, exceeding the values of environmental regulations. An electrochemical system was designed and built containing an electrochemical cell, a power transformer and electrodes to perform zinc electrodeposition. In total, eight tests were carried out with different metals as anodes and cathodes at intervals of different times, as a final result, a removal of zinc from the electrolyte liquid was evidenced in the first cell of 2.05 mg / L and in the second of 0.1 mg / L, throughout all tests. This recovery is low for the company's residual sludge, therefore its application is not recommended. The electrolytic liquid did not dissolve the total zinc in the sample, so the efficiency of the water treatment cannot be evaluated, this being a recommendation of this work.

Keywords: Waste, Zinc, environmental regulations, electrochemical system, electrochemical cell

1 INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales están asociados a diferentes actividades productivas, la generación de material residual, al no haber, en algunos casos, una aplicación o un tratamiento posterior, termina siendo agregado al ambiente o ubicado en lugares específicos de almacenamiento, convirtiéndose en pasivos ambientales. La gestión de residuos sólidos y los desechos peligrosos, es un tema al cual se le debe dar importancia, ya que se ha ido complicando cada vez más, a medida que la sociedad ha cambiado su estructura y los esquemas de producción y consumo, (CALLE PIEDRA, 2015).

Actualmente existen una gran variedad de procesos para la recuperación de metales, métodos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, precipitación química, membranas de ultrafiltración, ósmosis inversa, intercambio iónico, electrodeposición, entre muchos más; en los cuales la eficacia depende principalmente de la cantidad de concentración de metales que se encuentre en el residuo y de su estado físico: líquido o sólido, (Antaño R et al., 2014).

Actualmente las industrias deben cumplir con los requisitos que establecen las leyes en el país, así como con las normas de vertimientos, descargas, desagües y entrega de residuos. La tecnología, con el tiempo, ha ido teniendo mayor acogida y avanzando cada día más provocando que el sector industrial tenga la necesidad de implementar nuevos equipos y materiales que se ajusten a las funciones de cada proceso.

El Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (RCOA) establece que les corresponde a las entidades de control y regularización, verificar el cumplimiento de las normas de calidad ambiental en cuanto al aire, agua, suelo, ruido, desechos y agentes contaminantes, para lo cual se debe realizar

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

un seguimiento, y así verificar que se cumpla con el régimen de permisos y contar con las licencias respectivas, (Gordón D, 2020).

“El reciclaje de metales es una actividad creciente y con un desprendido desarrollo debido a que proporciona un notable ahorro de energía, reduciendo la demanda de minerales naturales. Los metales son 100% reciclables y el ahorro de energía al utilizar metales reciclados sobrepasa el 60% y en el caso del zinc es del 70%”, (Pardavé, W., 2006), (Aser, S.A., 2000).

Este proyecto tuvo como objetivo recuperar, a través de una celda electrolítica, el Zinc de los residuos sólidos de proceso de una empresa metal – mecánica con fines de aprovechamiento, debido al elevado contenido de dicho metal en estos residuos, que sobre pasa y no cumple con la Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales para el Zn ²⁺.

“La electroquímica aporta herramientas para estudiar, controlar, mitigar, o tratar residuos industriales, al contribuir con la aplicación y mejora de tecnologías existentes, así como la investigación, desarrollo e implementación de nuevas tecnologías”, (JANSSEN, L.J.J. and L. Koene, 2002).

1.1 Electrodeposición

La técnica de electrodeposición es un proceso en el que un recubrimiento metálico es aplicado sobre una superficie a través de una corriente eléctrica y que por lo general es continua. Consta de diferentes componentes para el proceso de electrodeposición, los cuales se observan en la Figura 1, (Nava D, 2013).: **Figura 1 Principio de proceso de electrodeposición. (Tomado de: Nava D, 2013)**

- Electrolito: es aquella solución que contiene los iones de un metal que se desea depositar

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

- Cátodo: superficie donde se presenta la reacción de reducción
- Ánodo: superficie donde se produce la reacción de oxidación
- Corriente eléctrica: aquella que puede ser directa o pulsante, (Nava D, 2013).

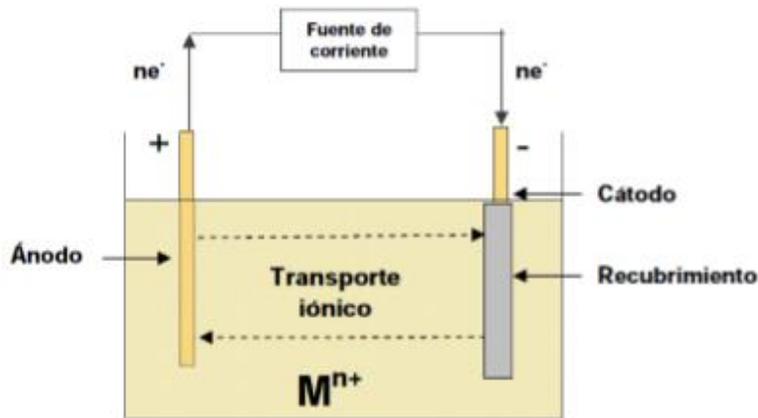


Figura 1. Principio de proceso de electrodeposición. (Tomado de: Nava D, 2013)

“La electrodeposición de metales constituye el proceso electroquímico industrial más relevante en cuanto a volumen de producción e impacto económico. La misma permite mejorar las características superficiales de materiales de bajo costo y uso generalizado”,
(Alvarado E, González K & Mendoza O, 2010. P. 72).

1.2 Electrólisis

Es un proceso por el cual se da la descomposición de sustancias químicas por medio de una fuente que transporta corriente eléctrica, consiste en tener un electrolito que es una sustancia capaz de ser alterada por medio de una fuente de electricidad. Al tener una masa o un cuerpo de forma sólida, este puede o no ser buen conductor así que se utilizan diferentes tipos de disolventes, (Field, S & A Dudlev Weill, 1955).

“Un proceso electrolítico se fundamenta en los principios de la electrólisis. Se genera una solución conductora de la electricidad, cuando un electrolito se disuelve en agua u otro

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

solvente polar. Los electrolitos consisten en iones con carga positiva y negativa (cationes y aniones. Los procesos de este tipo se denominan electrolíticos y la electrodeposición se fundamenta en este principio.” (Emewadmin, 2018).

1.3 Celda Electrolítica

Farhat Ali (2005) citado por Alvarado E, González K & Mendoza Oscar indican que:

“La operación de una celda durante la descarga también se muestra esquemáticamente en la Figura 2. Cuando la celda se conecta a una carga externa, los electrones fluyen del ánodo, que se oxida, a través de la carga externa hacia el cátodo, donde se aceptan los electrones y el material del cátodo se reduce. El circuito eléctrico se completa en el electrolito por el flujo de aniones (iones negativos) y cationes (iones positivos) hacia el cátodo y el ánodo, respectivamente”.

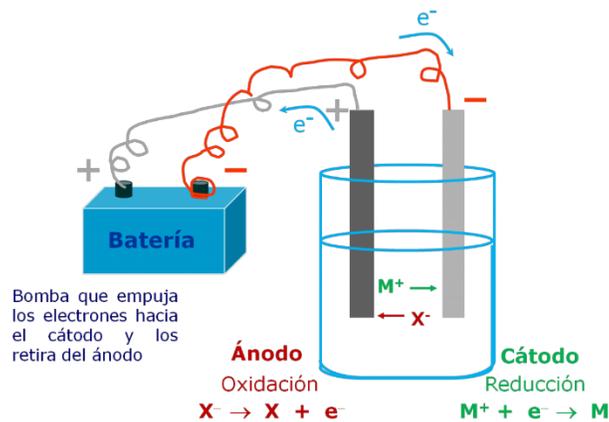


Figura 2. Descarga de una celda en una operación electroquímica (Fuente: Tomada de Cedrón J.; Landa V.; Robles J., 2011)

Para el funcionamiento de la celda, es importante la energía eléctrica que se aplica, ya que por medio de soluciones electrolíticas junto con los dos electrodos que se colocan, se va a conducir la electricidad metálicamente, volviéndolo en un medio conductor por el cual la corriente efectúa cambios químicos, esencialmente sobre la superficie que se encuentra sumergida, es decir, los

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

electrodos. Cuando la solución se pone en la celda electroquímica, la corriente es transportada entre los electrodos por los iones, los cuales se encuentran cargados negativamente, o aniones que son atraídos por el electrodo que se encuentra cargado positivamente, la oxidación se produce en el ánodo, y la reducción en el cátodo, en la **Figura 3** se puede observar cómo funciona la celda, (Pérez J, 2011).

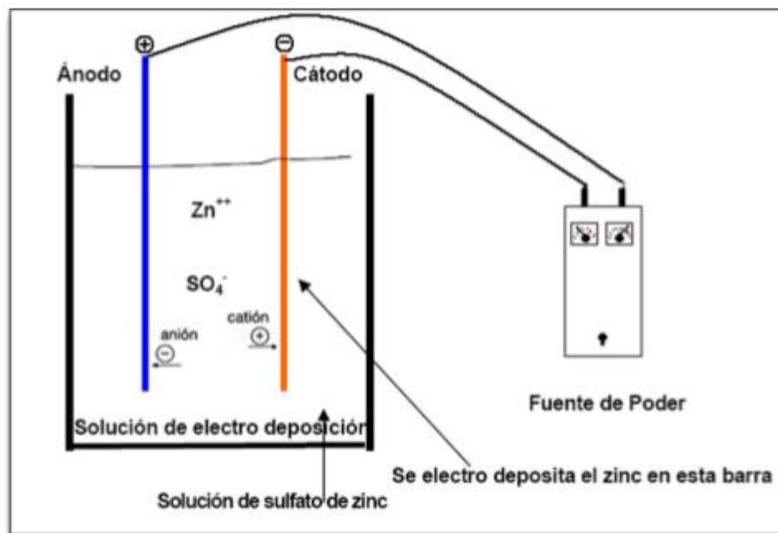


Figura 3. Celda electroquímica (Fuente: Tomada de Pérez J, 2011)

1.3.1.1 Funcionamiento de la celda electrolítica

La construcción de una planta de electrodeposición puede funcionar las 24 horas del día o los siete días de la semana, brindando grandes ventajas como: disminución en el desperdicio y uso de agua, mayor control sobre el proceso, cumplimiento de las licencias ambientales. Los metales recuperados se venden con un margen de ganancia y tecnología estable reconocida. Esta tecnología de electrodeposición se ha vuelto un proceso fundamental e interesante en las industrias de minería, refinación y acabado de metales, debido a que aporta grandes beneficios en el ámbito financiero y ambiental, (Emewadmin, 2018).

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

Para la construcción y funcionamiento de la celda electrolítica es importante el uso de diferentes materiales:

1.3.1.2 Bateria

Es un artefacto que está compuesto por celdas electroquímicas que se encargan de convertir la energía química que hay en el interior en energía eléctrica, esto funciona por medio de la acumulación de corriente alterna que se genera. Es así como sirven para sustentar diferentes circuitos eléctricos, dependiendo de su tamaño y potencia. Las baterías tienen la capacidad de poseer una carga determinada por su composición y se mide en amperios-hora (Ah), es decir da un amperio de corriente a lo largo de una hora continua. Cuando la capacidad de carga es mayor, se puede almacenar más corriente en su interior. Las baterías tienen celdas químicas que contienen un polo positivo que es el cátodo y otro negativo que es el ánodo, (Raffino M, 2019).

1.3.1.3 Electroodos

Para los electrodos generalmente se utilizan barras de metal, ya que el grado de calidad y pureza de este material debe ser óptimo, ya que, de no ser el caso, la solución se verá contaminada. (Gil J, 2012).

“En el caso de que la distancia entre el ánodo y el cátodo no sea uniforme, el proceso ofrecerá más resistencia en los sitios más alejados, es decir, la corriente circulara con desigualdad, depositando el metal de forma irregular. Estas irregularidades se presentan con mayor frecuencia cuando la distancia entre los electrodos es pequeña, por lo que la distancia entre electrodos se tiene que aumentar cuando los objetos son voluminosos o presentan mucha diferencia en su geometría”, (Panchi V, 2009. p.46).

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

1.3.1.4 Electrolito

“En el caso de la deposición de metales, el electrolito es generalmente una solución acuosa de sales metálicas, que, con la adición de otros materiales para incrementar su conductividad, modifican la textura del depósito y/o actúan como estabilizadores, pero en este caso, no se le adiciona ningún otro material aparte de ácido sulfúrico, haciendo el proceso más limpio y económico. Esta solución se somete a cambios electroquímicos o electrolisis cuando se aplica una corriente eléctrica a través de los electrodos” (Gil J, 2012).

Las soluciones ácidas que se utilizan para la electrodeposición contienen iones metálicos, sales y sustancias agregadas. Para regular el pH están soluciones buffer son usadas como agentes o aditivos para obtener las propiedades específicas en el depósito. Para obtener mayor eficiencia de corriente se usan las soluciones ácidas porque neutralizan la solución y dan valores de pH 8 o 9 con hidróxido de amonio o sodio precipitando el Zinc, luego se realiza la disposición de la solución, (Mahmud, Z., Gordillo, G., Ventura D Alkaine, 2017).

1.4 Zinc

El Zinc es un elemento químico, que se simboliza Zn, su número atómico es 30 y su peso atómico 65.37 g/mol, es conocido por ser un metal maleable y dúctil; es de color gris. Es un metal químicamente activo, que puede aparecer en forma de silicato, sulfuro o carbonato. El zinc es uno de los elementos poco comunes; se estima que forma parte de la corteza terrestre en un 0.0005-0.02%. Se encuentra en el lugar 25 de acuerdo con el orden de abundancia entre todos los elementos. Entre sus minerales principales esta la blenda, marmatita o esfalerita de zinc. Es, además, un metal quebradizo cuando está a bajas temperaturas, pero se vuelve muy maleable y dúctil entre temperaturas de 100 a 150 °C, (Taibe D, 2014).

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

“El zinc (Zn) es el primer elemento del Grupo IIB en la tabla periódica. En la corteza terrestre el Zn tiene un promedio de 76 ppm; en suelos es de 25 a 68 ppm; en corrientes es de 20 µg / L, y en aguas subterráneas es <0.1 mg / L. La solubilidad del zinc se controla en aguas naturales mediante adsorción en superficies minerales, equilibrio de carbonatos y complejos orgánicos. El zinc es un elemento que forma parte del crecimiento esencial para seres vivos como son las plantas y los animales, pero al encontrarse en concentraciones elevadas es tóxico para algunas especies de vida acuática. El nivel recomendado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura para el zinc en aguas de riego es de 2 mg / L. El estándar de agua potable secundaria de la EPA de EE. UU. MCL es de 5 mg / L. Las concentraciones superiores a 5 mg / L pueden causar un sabor astringente amargo y una opalescencia en aguas alcalinas. El zinc más comúnmente ingresa al suministro de agua doméstica por el deterioro del hierro galvanizado y la deszincificación del latón. En tales casos, el plomo y el cadmio también pueden estar presentes porque son impurezas del zinc utilizado en la galvanización. El zinc en el agua también puede resultar de la contaminación de residuos industriales”, (Métodos estándar, 2018).

Este tipo de metal se ha vuelto un elemento esencial y de gran importancia para el desarrollo y crecimiento de diferentes clases de organismos vegetales y animales. La deficiencia de zinc en la dieta humana perjudica el crecimiento y la madurez y produce anemia. El zinc está presente en la mayor parte de los alimentos, especialmente en los que son ricos en proteínas. En promedio, el cuerpo humano contiene cerca de dos gramos de zinc, (García A, s.f).

1.4.1 Aplicaciones del Zinc

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

Se utiliza principalmente como un agente anti – corrosivo en productos de metal, en procesos de galvanización para fabricar tela metálica, barandillas, puentes colgantes, postes de luz, techos de metal, intercambiadores de calor y carrocerías de automóviles. Se usa como ánodo en otros metales, en particular metales que se utilizan en trabajos eléctricos. En pilas de zinc y carbono se utiliza una lámina de este metal, en Estados Unidos es usado para la fabricación de las monedas. La aleación de este metal con cobre produce latón y bronce, los cuales se utilizan en una variedad de productos como tuberías, instrumentos, equipos de comunicación y válvulas de agua. El óxido de Zinc se utiliza como un pigmento blanco en pinturas y tintas de fotocopiadoras, también en el caucho para protegerlo de la radiación UV. Adicionalmente es comúnmente, utilizado en fungicidas agrícolas, (Taípe D, 2014).

El Zinc se combina con otros elementos para formar compuestos de zinc, algunos se encuentran en sitios de disposición de desechos peligrosos como cloruro de zinc, óxido de zinc, sulfato de zinc y sulfuro de zinc, estos son utilizados para fabricaciones como el caucho, tinturas, preservativos para maderas, ungüentos, ente otros, (ATSDR, 2016).

El Zinc al encontrarse junto con el Hierro y el Acero tiene un comportamiento anódico, ya que proporciona protección electroquímica cuando se aplica en forma de recubrimiento, debido a que el Fe y el Zn se caracterizan por tener potenciales negativos, de manera que el Zinc actúa como ánodo y se oxida, protegiendo al hierro cátodo, proveyéndole de electrones, (Ramírez J, 1991).

1.4.2 Efectos del Zinc sobre la salud y el ambiente

El zinc se encuentra en diferentes tipos de alimentos con ciertas concentraciones, así como el agua potable también contiene cierta cantidad de zinc, cuando las personas absorben poco zinc ellos experimentan una pérdida de apetito, disminución de la sensibilidad, el sabor y el olor. Además,

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

produce defectos en formación de fetos. En el ambiente de trabajo el contacto con el zinc puede causar la gripe, conocida como la fiebre del metal causada por una sobre sensibilidad al mismo. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda una ración de zinc de 10 mg/día para los niños, 12 mg/día para las mujeres y 15 mg/día para los hombres, (García A., s.f).

El Zinc se encuentra en el aire, agua y suelo, pero las concentraciones han ido aumentando por causas no naturales, debido a la introducción de este metal en las actividades humanas como es la minería, la combustión de carbón y residuos y el procesado metalúrgico. La producción mundial de zinc está todavía creciendo. Esto significa básicamente, que más y más zinc termina en el ambiente. El agua contaminada de Zinc es debido a la presencia de grandes cantidades de zinc en las aguas residuales de plantas industriales. Las aguas residuales no son depuradas satisfactoriamente y las consecuencias es que los ríos están depositando fango contaminado con zinc en sus orillas. El zinc puede también incrementar la acidez de las aguas, (García A., s.f).

1.5 PROCESADORA VYMSA

La procesadora VYMSA es una empresa metalmecánica ecuatoriana, dedicada a la producción y comercialización de servicios, productos, partes y piezas para el sector industrial y comercial las piezas son de acero fabricadas para electrodomésticos. La procesadora requiere de revestimientos de protección por pinturas electroestáticas líquidas y en polvo, además de tratamientos galvánicos por electrodeposición de zinc en formas de cromatizado, tropicalizado y zincado negro, luego de estos procesos se obtiene como resultado residuos, los cuales contienen lodos peligrosos, (VYMSA, 2019).

1.6 Normativa Ambiental Vigente Para Residuos Peligrosos

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

1.7 Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales

“Esta norma técnica se encarga de establecer los métodos y procedimientos para la determinación de las características de los desechos peligrosos y especiales para su adecuada gestión en la jurisdicción del Distrito Metropolitano de Quito y se aplica a todos los establecimientos públicos o privados que generen estos desechos peligrosos y especiales, y a los gestores ambientales involucrados en su gestión”, en la Tabla 1 se muestra los límites máximos permisibles que establece la norma”, (Consejo del Distrito Metropolitano de Quito, 2014, p.1).

Tabla 1. Límites máximos permisibles para extracción de metales pesados en base seca, (Digestión Ácida)

CONTAMINANTE	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (mg/kg) EN BASE SECA
Arsénico	75
Cadmio	85
Cromo	3000
Plomo	4300
Mercurio	840
Níquel	57
Zinc	420

Fuente: Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales, 2016, Pág. 8 (Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha)

En la Tabla 2 se observa la cantidad de contaminantes secos de la muestra del ensayo vía residuo, tomada de la tesis de (Gordon D, 2020), la cual se comparó los resultados con los límites máximos permisibles para la extracción de metales pesados en base del Código Municipal Único.

Tabla 2. Comparación del método Vía Residuo (MI) en mg/kg con el Código único Municipal; Límites máximos permisibles para extracción de metales pesados en base seca (Digestión Ácida)

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

		Base Seca		
	RESULTADOS	LÍMITA MÁXIMO PERMISIBLE	UNIDADES	CUMPLIMIENTO
Cadmio	2.6	85	mg/kg	Si
Cobre	24.0	NA	mg/kg	-
Hierro	20010.0	NA	mg/kg	-
Plomo	19.8	4300	mg/kg	Si
Zinc	45600.0	420	mg/kg	No

Fuente: (Gordon D, 2020)

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Diseño experimental

Se basó en la recuperación de zinc de la muestra de lodo galvanizado vía deposición electroquímica, para la cual se elaboraron dos celdas electroquímicas de diferentes volúmenes, se prepararon las soluciones a colocar con ácido sulfúrico y sulfato de amonio. Para realizar las pruebas se usaron diferentes tipos de cátodos y ánodos de diferentes metales como aluminio, plata, acero, plomo, zinc y cobre para observar el funcionamiento y eficiencia de cada uno. Se repitió el proceso con cada ánodo y cátodo haciendo pruebas a diferentes tiempos cada 1, 2, 3, 4 y 8 horas. Las variables que se analizaron en el proceso de electrodeposición son: tiempo, concentración de Zn en el líquido electrolítico, concentración de sulfato de amonio, distancia entre electrodos, pH, cátodos y ánodos.

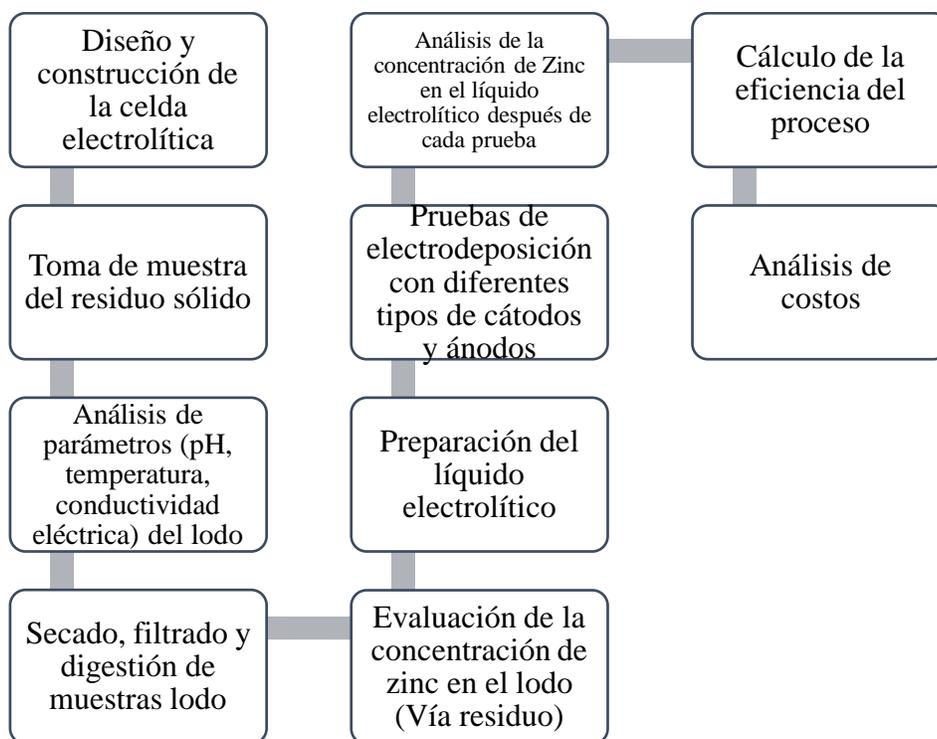
Es importante mencionar que debido a la emergencia sanitaria que atraviesa el país no fue posible realizar un análisis por duplicado como se planteó inicialmente, la investigación se llevó a cabo usando una celda de tamaño más pequeña para hacer una réplica de los resultados obtenidos

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

2.2 Metodología vía residuo

Para establecer la concentración de partida de Zn en el lodo se llevó a cabo el análisis del lodo vía residuo, que consiste en el análisis de la concentración del metal en el lodo propiamente dicho y se la hace a través de la digestión de la muestra de lodo con ácido sulfúrico y agua oxigenada en reflujo abierto por aproximadamente dos horas.

Diagrama de flujo 1. Procedimiento para la recuperación de zinc por electrodeposición



Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha

2.3 Celda electrolítica

El material con el que se construyó la celda no debe reaccionar con ningún electrolito y debe ser capaz de soportar las condiciones en las que se va a trabajar (temperatura, ambiente, agua destilada y ácido sulfúrico), (Pérez J, 2011). El material utilizado fue vidrio y el diseño de la celda electrolítica tubo las dimensiones que se muestran en las *Figura 5* y *Figura 6* en diferentes planos.

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

Altura = 30 cm, Ancho = 37 cm, Largo = 50 cm y Volumen total = $55\,500\text{ cm}^3 = 55.5\text{ L}$



Figura 4. Cuba de vidrio. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)

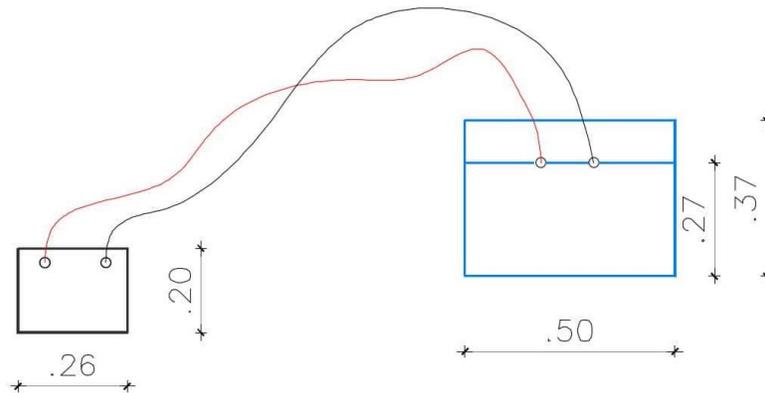


Figura 5. Dimensiones del diseño de la celda electrolítica. (Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha).

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

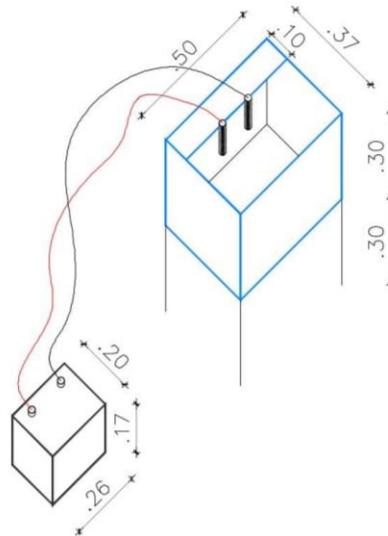


Figura 6. Plano dimensional de la celda. (Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha).

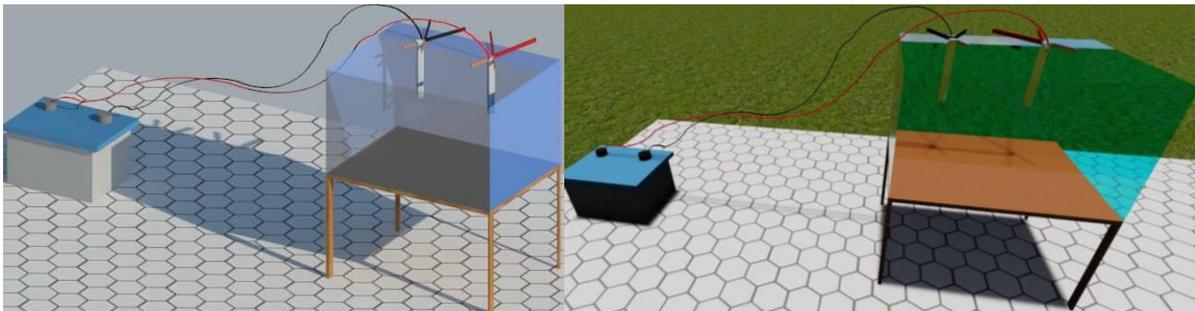


Figura 7. Diseño 3D de la Celda Electrolítica de vista posterior y frontal. (Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha)

Además, se utilizó una segunda celda más pequeña, con un volumen menor a la primera, como se muestra en la **Figura 8**. Se usaron las dos celdas de electrodeposición de diferentes dimensiones para probar justamente el funcionamiento de cada una de ellas, es decir una con mayor volumen en la cual entra más cantidad de masa de lodo y de solución y la otra de menor volumen con menos cantidad de masa de lodo y de solución, debido a que por la pandemia fue imposible realizar un segundo muestreo en la industria, utilizándose el residual de lodo que ya se disponía.

Altura = 14 cm, Ancho = 13 cm, Largo = 20 cm y Volumen total = 3.6 L

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO



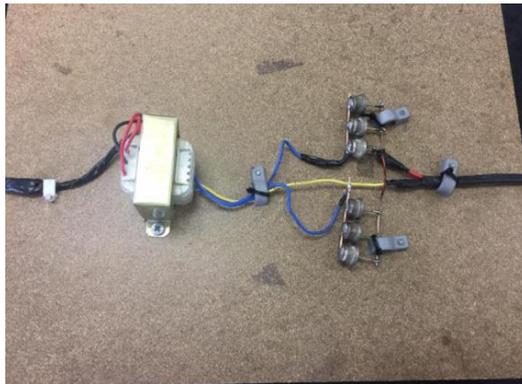
Figura 8. Celda pequeña. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)

2.4 Batería o Fuente de poder

En la *Figura 9* se muestra la batería que se utilizó al inicio para el proceso de electrodeposición, la cual fue de marca Bosch y de 12 V y 78 Ah, sin embargo, su funcionamiento no era eficiente, por lo que en la *Figura 10* se observa la elaboración de un equipo de transformador de energía de 15 V, que, al tener más voltaje, es más fuerte y funcionó de mejor manera.



Figura 9. Batería (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)



RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

Figura 10. Transformador de energía (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)

2.5 Cátodos

Como cátodos se usaron barras de acero, plomo, aluminio y cobre como se observa en la *Figura 11*.

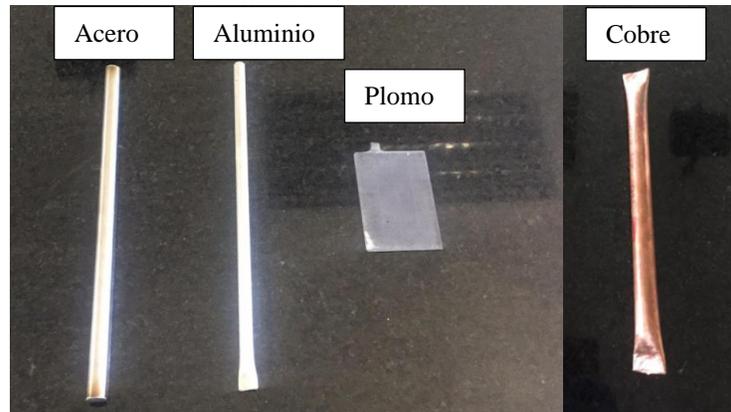


Figura 11. Cátodos. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)

2.6 Ánodos

Como ánodos se usaron barras de zinc, acero, plata y cobre como se observa en la *Figura 12*.

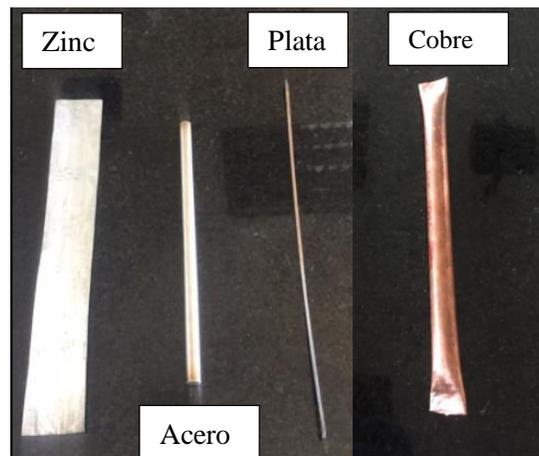


Figura 12. Ánodos. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)

Los electrodos se ubicaron en los extremos de la celda, con una distancia de 5 cm aproximadamente.

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

2.7 Colección y Análisis de muestras

Para la realización de la investigación se recolectó una cantidad de 5 kg de lodo de galvanizado, el cual se encontraba en estado líquido - sólido. Se colocó la muestra de lodo en un recipiente plástico como se observa en la **Figura 13**, el cual previamente fue lavado para evitar cualquier tipo de contaminación o alteración en la muestra.



Figura 13. Muestra de lodo (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)

A continuación, se observa en la **Tabla 3** los parámetros que fueron analizados en la muestra de residuo del lodo de galvanizado.

Tabla 3. Parámetros medidos en la muestra de lodo residual

Parámetro	Valor	Unidad
pH	11,92	-
Temperatura	18,2	°C
Conductividad eléctrica	29	mS/cm

Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha

2.7.1 Secado de muestras

Para secar las muestras, se utilizaron cinco vasos de precipitación de 50 mL, los cuales fueron lavados, luego se taró cada uno y se colocó muestra de lodo en cada vaso, obteniéndose el peso de la muestra con lodo, se procedió a colocar los vasos con las muestras en una incubadora a una

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

temperatura de 37°C para secarlas durante un tiempo de 48 horas y determinar el porcentaje de humedad del lodo, los resultados de cada vaso se observan en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Pesos de vasos de precipitación

Vaso de precipitación de 50 mL				
	Vaso vacío (g)	Vaso con lodo (g)	Vaso con muestra de lodo seco (g)	% Humedad
1	31,3174	94,5185	40,2988	57,3639
2	31,7251	91,3783	42,5270	53,4605
3	31,0610	89,5402	39,4455	55,3323
4	31,8575	94,5116	40,9502	56,6717
5	30,5885	90,2489	39,2647	56,4928

Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha



Figura 14. Pesos de vasos de precipitación de 50 mL con muestra de lodo. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)

Como se observa en la **Figura 15**, se secaron las muestras para el análisis vía residuo con el fin de determinar el porcentaje de humedad de la muestra y para establecer la concentración de zinc en la muestra original vía residuo seco.

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO



Figura 15. Muestras de lodo a secar en una incubadora. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha).

2.7.2 Filtración de muestras

Para la elaboración del líquido electrolítico no se secaron las muestras, pero si se optó trabajar con el lodo sin humedad superficial, para ello se filtraron las muestras con el fin de extraer cualquier sustancia líquida que se encuentre en el residuo como se muestra en la **Figura 16**. Se utilizaron los siguientes materiales y equipos: un Kitasato, un corcho, una bomba al vacío, un embudo y papel filtro de 125 mm.



Figura 16. Filtración de muestra (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)

2.7.3 Digestión de muestra de lodo seco

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

Los datos de partida de zinc debían obtenerse, como ya se indicó anteriormente, con el ensayo vía residuo en el lodo seco, para ello se utilizaron los reactivos y cantidades que se muestran en la

Tabla 5:

Tabla 5. Materiales para digerir la muestra

Materiales	Cantidad	Reactivos	Cantidad
Refrigerante	1	Ácido sulfúrico	5 mL
Balón de 250 mL	1	Agua oxigenada	10 mL
Muestra de lodo seco	1,4185 g		
Soporte	1		

Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha

En una estufa se colocó el balón con la muestra seca y el ácido sulfúrico y el refrigerante ya armado a una temperatura máxima (aproximadamente 150°C), se fue colocando poco a poco el agua oxigenada hasta que cambie de color anaranjado a amarillento. El proceso de digestión tuvo una duración de dos horas.



Figura 17. Digestión de muestra. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)

Una vez digerida la muestra se procedió a filtrar y preparar la dilución necesaria para el análisis.

Para ello, se tomó un mL de la muestra digerida y se aforó con agua destilada hasta 1000 mL, se

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

agitó, obteniéndose una dilución de 1:1000, para analizar la concentración inicial de Zinc en la muestra vía residuo.

2.7.4 Preparación de solución para el funcionamiento y electrodeposición de las celdas electrolíticas

En la primera celda electrolítica se colocaron 33 L de agua destilada, 805.7 g de residuo de lodo seco, 25 mL de ácido sulfúrico y 42.9 g de sulfato de amonio que se calculó multiplicando 1.3 g de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ por los 33 L de agua destilada (*Ecuación 1*) que se colocaron, para lo cual se tomó como base del estudio de (Pérez J, 2011).

En la segunda celda se colocaron 2,7 L de agua destilada, 227,3 g de residuo de lodo seco, 3,51 g de sulfato de amonio multiplicando, de igual manera, 1.3 g de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ por la cantidad de agua destilada que se colocó (*Ecuación 2*) y 10 mL de ácido sulfúrico.

Ecuación 1.

$$1ra\ Celda = \frac{1.3\ g}{L} * 33\ L\ de\ agua = 42.9\ g\ sulfato\ de\ amonio$$

Ecuación 2

$$2da\ Celda = \frac{1.3\ g}{L} * 2.7\ L\ de\ agua = 42.9\ g\ sulfato\ de\ amonio$$

2.8 Análisis de muestras

Para analizar las muestras se utilizó el espectrofotómetro de luz visible marca HACH, que mediante colorimetría y utilizando el Método Zincon 2 – Método HACH 8009 proporcionó las concentraciones necesarias para esta investigación.

3 RESULTADOS

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

De la muestra tomada, el análisis vía residuo que se realizó en el de lodo seco digerido, dio como resultado un valor de 2530 mg/kg de Zinc.

3.1 Cálculo del porcentaje de humedad de la muestra líquida de lodo

Para calcular y determinar el porcentaje de humedad que tenía el residuo de lodo, se utilizaron los datos que se encuentran en la *Tabla 4. Pesos de vasos de precipitación*, con estos valores se trabajó para los cálculos respectivos. Tabla 6 .

Tabla 6. Cálculo del porcentaje de humedad

Vasos de precipitación de 50 ml	% Humedad
1	57,3639
2	53,4605
3	55,3323
4	56,6717
5	56,4928
Promedio	55,86424

Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha

$$\% H = \frac{P \text{ inicial} - P \text{ final}}{P \text{ inicial}} * 100$$

Ecuación 3. Porcentaje de humedad

La Ecuación 3 se utilizó para calcular el porcentaje de humedad del lodo en cada vaso, para luego obtener el promedio de 55,86 %, lo cual indica que la cantidad de agua en la muestra era alta.

3.2 Concentración inicial de Zn en muestra seca vía residuo

Luego del análisis de Zinc de la muestra sólida seca por digestión ácida, se obtuvo como resultado una concentración 2.53 mg/L en la muestra diluida. Para obtener el valor final se multiplicó por el factor de dilución de 1:1000 dando como resultado 2 530 mg/L de Zinc en el extracto líquido de la

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

muestra digerida, en el ensayo vía residuo del lodo. Este valor al corresponder al extracto líquido - producto de la digestión, debe ser transformado a unidades congruentes con la muestra sólida, para lo cual se aplicaron los valores de la **Tabla 7**, con el fin de calcular la concentración de Zn en el lodo.

Tabla 7. Valores iniciales para trabajar

Concentración de muestra vía residuo	2 530 mg/L
Masa digerida	1.4185 g

$$2530 \frac{\text{mg Zn}}{\text{L dig}} * \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} * \frac{100 \text{ mL}}{1.4185 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = 178357.4 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$$

Es decir, que, por cada kg de lodo, se dispone de 178357.4 mg de Zinc. Con este valor se procedió al cálculo de zinc, que se ubicó en la primera celda electrolítica.

$$178357.4 \frac{\text{mg Zn}}{\text{kg muestra}} * 0.8057 \text{ kg muestra} = 143702.5572 \text{ mg de Zn}$$

$$\text{masa Zn en la celda} = \frac{143702.5572 \text{ mg}}{33 \text{ L}}$$

Masa Zn = 4 354.62 mg/L Zn ----> concentración teórica de Zn en la celda

Análisis muestra= 2.72 mg/L de Zn ----> concentración en el líquido en la celda

Con estos datos se calculó la concentración de zinc disuelto a partir del lodo residual colocado en el líquido electrolítico:

$$\% \text{ dilución} = \frac{2.72}{4354.62} * 100$$

$$\% \text{ dilución} = 0.06 \%$$

En la segunda celda se calculó la concentración inicial de Zn en el agua y en el lodo.

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

$$C1 = 178357.4 \frac{mg \text{ Zn}}{kg \text{ muestra}} * 0.2273 \text{ kg muestra} = 40540.64 \text{ mg Zn}$$

$$C1 = \frac{40540.64 \text{ mg Zn}}{2.7 \text{ L}}$$

$$C1 = 15015.05 \frac{mg}{L} \text{ concentración de Zn en el lodo de la celda pequeña}$$

$$C1 = 0.69 \frac{mg}{L} \text{ concentración de Zn en el agua de la celda pequeña}$$

$$\% \text{ dilución} = \frac{0.69}{15015.05} * 100$$

$$\% \text{ dilución} = 0.0045 \%$$

Dado los resultados se observa que hay una alta concentración de Zinc en el lodo en ambas celdas y en la muestra líquida.

3.3 Uso y funcionamiento de ánodos y cátodos

Las pruebas se efectuaron usando diferentes tipos de metales como ánodos y cátodos, para determinar la eficiencia de cada uno de ellos, en la **Tabla 8** se observa un total de 8 pruebas realizadas en diferentes tiempos, el cátodo en este caso es el principal electrodo, ya que en este es donde se produce la electrólisis y debía adherirse el Zinc. En la primera prueba el acero, a la hora, aumento su masa en 0.3 g, pero al pasar las horas se mantuvo constante.

El aluminio tuvo a la hora pérdida de masa, en la segunda prueba se dejó al acero por más tiempo y a la hora aumento 0.3 g de masa para luego mantenerse constante.

En la tercera prueba se usó ambos electrodos de acero en un tiempo de 4 horas y su masa aumento únicamente 0.1 g; en la cuarta, quinta y sexta prueba se usó el mismo cátodo de plomo lo que se

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

cambio es el ánodo para verificar la variación de la reacción con cada uno de ellos. Se observó que, a las 4 horas, el plomo aumento su masa 0.6 g pero en las 4 horas siguientes perdió 0.9 g, debido a que empezó a desprenderse su propio metal. Luego de 8 horas consecutivas de electrólisis, se perdió 0.4 g de plomo. En la séptima prueba se usó cobre, el cual a las 4 horas aumentó su masa 0.3 g pero a las 8 horas perdió 0.1 g, estas 7 primeras pruebas se realizaron en la primera celda electrolítica, con un volumen grande, optándose por realizar una segunda celda, con un volumen mucho menor. En esta se realizó una octava prueba usando cobre como cátodo; se dejó un tiempo de electrólisis de 4 horas en el cual aumento la masa del cátodo en 0.6 g.

En los cátodos de acero, plomo y cobre se nota una recuperación de zinc, pero con valores bajos.

La medición de pH, al inicio del proceso, fue 0 y a medida que la electrodeposición iba generándose el pH subió manteniéndose ácido, en ocasiones subía y bajaba dependiendo del metal que se encontraba funcionando en ese momento como cátodo.

Tabla 8. Pruebas realizadas en las celdas electrolíticas

1ra Celda					
	Tiempo (h)	Cátodo (-)	Masa(g)	Ánodo (+)	pH
1ra Prueba	0	Acero	268.4	Zn	0
	1		268.7		0
	2		268.7		0
	3	Al	19.8	Acero	0
	4		19.6		0
2da Prueba	0	Acero	268.5	Zn	0
	1		268.8		4.65
	2		268.8		4.66
	3	Ag	268.8	4.66	
	4		268.8	4.84	
3ra Prueba	0	Acero	268.4	Acero	4.93
	2		268.4		3.46
	4		268.5		3.44

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

1ra Celda					
	Tiempo (h)	Cátodo (-)	Masa(g)	Ánodo (+)	pH
4ta Prueba	0	Plomo	32.6	Acero	3.50
	4		33.2		2.55
	8		32.3		3.00
5ta Prueba	0	Plomo	33.6	Acero	2.54
	8		33.2		2.74
6ta Prueba	0	Plomo	34.6	Zinc	2.90
	3		34.4		4.30
7ma Prueba	0	Cobre	118.3	Cobre	3.37
	4		118.6		4.39
	8		118.5		4.35
2da Celda					
	Tiempo (h)	Cátodo (-)	Masa (g)	Ánodo (+)	pH
8va Prueba	0	Cobre	66.0	Cobre	0
	4		66.6		3.57

Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha

En las diferentes pruebas realizadas se observó que, en el acero, el plomo y el cobre son metales que, si funcionan y hacen reacción de electrólisis para la recuperación del zinc de la muestra de lodo residual, pudiendo evidenciar la formación de gases en sus alrededores, sin embargo, el aluminio no mostró el mismo resultado ya que no tuvo ninguna reacción ni se observó la formación de estos gases como en los otros tres metales, la *Figura 18*.

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO



Figura 18. Formación de gases en cátodos (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)

A continuación, en la Figura 19 se observa el resultado de los ánodos y cátodos después de finalizar la electrólisis, es decir el desgaste que tuvo cada uno en el proceso.



Figura 19. Resultados de los cátodos y ánodos después del proceso de electrodeposición. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

En la Tabla 9 se observan los resultados de los análisis de Zinc en el líquido electrolítico, después de cada prueba. Se determinó que la eficiencia sin agitación era menor que la eficiencia con agitación, entonces los últimos ensayos se decidió realizar las pruebas únicamente con agitación. Con el acero se disminuyeron los tiempos de proceso porque se notó que el metal empezó a diluirse, alterando el proceso, por lo que se detuvo el ensayo, sin embargo, tuvo una buena eficiencia de eliminación del Zn en el líquido electrolítico de 33.7 %, bajando la concentración de Zinc cada hora.

El plomo a las ocho horas de ensayo presentó ablandamiento de su estructura, por dilución en el líquido electrolítico, en tanto que el cobre obtuvo un mejor rendimiento que los otros, al término de 4 y 8 horas hubo una recuperación de zinc.

Tabla 9. Análisis de muestras de las celdas

	Prueba	Cátodo (-)	Peso cátodo (g)	Tiempo (h)	Concentración de Zinc Sin agitación (mg/L)	%Eficiencia de remoción	Concentración de Zinc Con agitación (mg/L)	%Eficiencia de remoción
1ra Celda	1	Acero	268.4	0	0.94	0	2.72	0
	2	Acero	268.5	1	0.85	9.6	2.26	16.9
	3	Acero	268.4	2	0.78	17.8	1.88	33.7
	4	Plomo	32.6	4	-	-	1.47	0.0
	5	Plomo	32.3	8	-	-	1.28	12.9
	6	Cobre	118.3	4	-	-	0.80	0.0
	7	Cobre	118.5	8	-	-	0.67	16.3
2da Celda	8	Cobre	66.0	0	-	-	0.69	0
			66.6	4	-	-	0.59	14.49

Realizado por: Vásquez Ma. Augustha

3.4 Análisis Económico

En la Tabla 10 se observa el análisis económico con todos los materiales que se utilizó y las cantidades mencionadas para las dos celdas electrolíticas en el proceso de electrodeposición.

Tabla 10. Análisis económico

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

Materiales	Cantidad	Precio \$ (Dólares)
Celda de vidrio pequeña	1	5
Celda de vidrio grande (55.5 L)	1	10
Equipo de transformador de energía (15 V)	1	25
Zincover	1 kit	93
Electricidad	47 horas (1 kwh=0.04)	1.88
Agua Destilada	40 L (1 L= 0.50 ctvs)	20
Ácido sulfúrico	35 mL (2.5 L=38.70)	2.26
Sulfato de amonio	46.41 g (1 kg = 128.26)	0.36
Agua oxigenada	345 mL (360 mL = 2.10)	2.1
Barras de Zinc	4	1
Barras de Acero	6	3
Barras de Cobre	4	2
Placas de Plomo	3	1
Barra de Aluminio	1	0.25
Barra de Plata	1	0.25
Papel filtro	50 (1 caja de 100=19.31)	19.31
	Total	181.41

Realizado por: Vásquez Ma. Augustha

En la categoría Economía Internacional el precio del zinc más reciente en kilogramos es de 2,36 dólares por kilo, (Temáticas.org., 2020).

La cantidad total recuperada fue únicamente de 1.26 g, es decir 0.00126 kg que por el costo que esta hoy en día el Zinc vendría hacer \$ 0.0029, lo cual es una cifra insignificante.

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

Haciendo el cálculo respectivo para saber el costo de 1 kg de zinc y teniendo el valor del tratamiento fue:

$$1 \text{ kg de Zn} = \frac{181.41}{0.00126 \text{ kg}} = \$ 143\,976.19$$

Para sacar 1 kg de Zinc se necesitaría aproximadamente este valor de \$143 976.19 en dólares USA, lo que demuestra que la recuperación de este metal en el lodo de la empresa no tendría buenos resultados ni operativos ni económicos.

3.5 Resultados de la recuperación de Zn en el líquido electrolítico

Como se observa en la Figura 20. , el resultado final de la recuperación en las ocho pruebas es un polvillo de Zn, con una masa total de 1,26 gramos. Para el cálculo de la remoción de Zn en el líquido se partió del valor inicial de 2.72 mg/L ubicado en la primera celda y los valores finales con cada electrodo como se observa en la

Tabla *II*, se calculó el porcentaje de recuperación que había en el líquido de las celdas siendo el más efectivo en este caso el acero con un 30.88 % de recuperación.

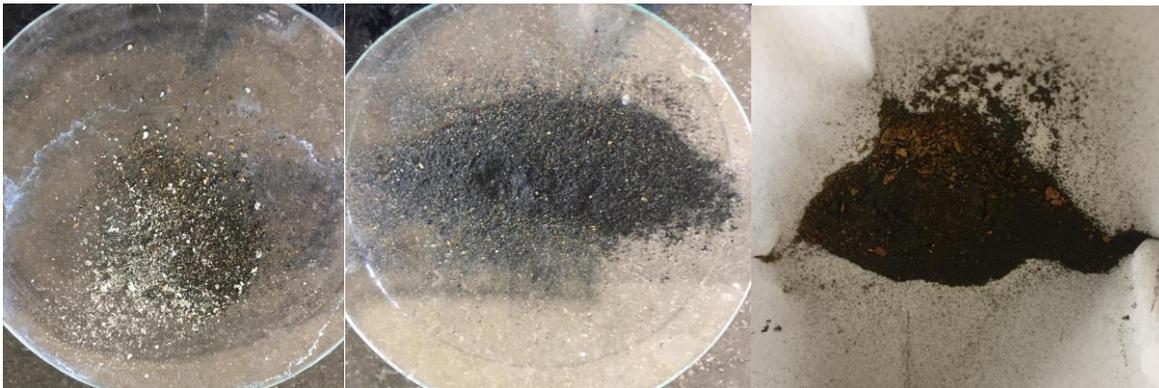


Figura 20. Resultados de la recuperación (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

Tabla 11. Porcentaje de recuperación de Zinc

	Cátodo	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de recuperación
1ra Celda	Acero	2.72	1.88	30.88
	Plomo	1.47	1.28	12.93
	Cobre	0.8	0.67	16.25
2da Celda	Cobre	0.69	0.59	14.49

Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha

4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la **Tabla 9** se observan los porcentajes de remoción del Zn disuelto a partir del lodo en el líquido electrolítico con agitación y sin agitación. El primer valor (agitado) refleja la cantidad de zinc que hay en toda la celda representando una concentración más homogénea. En tanto que la medición sin agitación representa la concentración de zinc disuelta en el agua al momento de tomar la muestra, por lo que se la consideró menos representativa. En las pruebas efectuadas cada 4 horas, con el acero, el plomo, y cobre, el porcentaje de recuperación en los cátodos aumento a medida que la concentración de zinc en el líquido electrolítico disminuía, aunque en valores bajos.

Al hablar del uso de los electrodos como son los cátodos y los ánodos, es importante tomar en cuenta el material con el que se va a realizar la electrodeposición siendo mejor si se conoce la pureza que tiene el metal utilizado como electrodo, porque mientras más puro sea funciona de mejor manera, sin embargo, el costo puede ser mayor. En este estudio no se pudo conocer el porcentaje de pureza de los electrodos utilizados en las distintas pruebas.

En la celda pequeña se observó una espuma con color azulado que se supone que fue el cobre del electrodo por el color dado. El cobre empezó a desprenderse a tal punto que se observó empezó a hacer interferencia en la recuperación del Zinc, la celda con mayor volumen dio menos problema

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

en ese sentido, debido al volumen de líquido electrolítico usado que era muy superior al de la celda pequeña, facilitándose la parte analítica en las muestras con menos presencia de cobre, esto es en las muestras de la celda grande.

El extracto para hacer el análisis de la muestra, una vez digerido, debe ser transparente, aunque coloreado, ya que la medición en el equipo HACH es colorimétrica pudiendo interferir los sólidos suspendidos.

El Zinc del lodo tiene baja solubilidad en el agua destilada ácida de la celda lo que impide su recuperación en las cantidades necesarias para hacerlo técnica y económicamente factible.

El tratamiento implementado no es adecuado para remover zinc en este tipo de lodos residuales, ya que aún a escala de laboratorio y a pesar de manejar altas concentraciones de Zn en el lodo, el consumo de electricidad, de agua y la generación de residuos resultó elevada, lo que es un claro indicativo que si se realiza a grande escala es decir de forma industrial la cantidad de residuos y el consumo de recursos será mucho más grande y los costos más elevados. La tecnología evaluada no es eficiente por lo que no se recomienda su aplicación.

Con los datos obtenidos y ante la situación de pandemia que vive el país y el planeta, no fue factible realizar cálculos estadísticos que permitan su validación, ya que la repetición de las pruebas requería nuevos muestreos y mayor tiempo de presencia en el laboratorio, lo que resultó imposible de realizar.

En la investigación en la primera prueba, como se observa en la **Tabla 8**, se utilizó como cátodo acero y como ánodo zinc, al igual que la investigación de (Ramírez J, 1991), en la cual se obtuvo recubrimientos de zinc mediante electrólisis, usando como ánodo placas de zinc puro y cátodo acero, en la primera prueba, presentaron una diferencia en peso de 0.1886 g, y en una segunda

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

prueba una diferencia en peso de 0.1610 g, por último en la tercera prueba una diferencia de peso de 0.1502 g. Tomando en cuenta que sus recuperaciones fueron de diferentes soluciones químicas diseñadas para tal efecto, mientras que la recuperación de zinc, en esta investigación, fue a partir del residuo sólido de la empresa VYMSA, se establece que la recuperación es más efectiva y en menos tiempo en soluciones químicas preparadas específicamente para la electrodeposición, mientras que la recuperación en el residuo fue más lenta y mucho menos efectiva, esto debido a que el lodo presenta diferentes tipos de metales que pueden interferir entre sí.

El trabajo de (Pérez J, 2011) consistió en la obtención de polvos de zinc por vía electrolítica utilizando electrolitos de sulfato de zinc ($ZnSO_4$) con una concentración de 15 g/L y 30-50 g/L de sulfato de amonio $(NH_4)_2SO_4$, en el presente trabajo se utilizó únicamente sulfato de amonio, y la sal de Zn la proporcionó el lodo residual; en cuanto al voltaje Pérez utilizó un rectificador de 20 V y en este caso se utilizó un transformador de energía de 15 V, como cátodo Pérez uso platinas de plomo antimonial (Pb 6%) y ánodos de zinc, el trabajo fue de 8 tratamientos, cada uno se replicó tres veces para un total de 24 experimentos, el tiempo fue de 10 min y 20 min por cada tratamiento mientras que en esta recuperación los tiempos variaron entre 1 y 8 horas de deposición. Esto ratifica la poca eficiencia de la electrodeposición utilizando lodo residual.

El estudio de electrodeposición del zinc de (Porroa E, 2014), usó ánodos de Pb-Ag y cátodos de Al, la recuperación se llevó a cabo con un electrolito acuoso de $ZnSO_4$ y H_2SO_4 , los resultados muestran, para la primera prueba una recuperación de 1.09 g en un tiempo de 40 min, en la segunda prueba una recuperación de 2.79 g, en un tiempo de 70 minutos, ratificando, otra vez, que la recuperación en soluciones químicas tiene mejor eficiencia.

En el estudio de aspectos teóricos y prácticos de la tecnología de electrodeposición de cinc de (Mahmud, Z.; Gordillo, G.; Ventura D'Alkaine, C., 2017), cuando la concentración de zinc en la

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

solución es baja, se pueden quemar los depósitos, pero si es alta se producen depósitos a baja densidad de corriente, el contenido de zinc es alto cuando aumenta la velocidad de disolución de los ánodos como paso en este tratamiento que al colocar el ánodo de zinc este empezó a diluirse y aumento el pH de la solución. El pH debe permanecer en valores entre 3.5 a 4.5 como lo indica el autor, en este estudio, el pH se mantuvo desde 3 y en ocasiones subió a 4.6 o 4.8 por el cambio de cátodo por otro metal.

La recuperación en soluciones químicas de zinc, utilizando celdas electroquímicas, es mucho más efectiva que en residuos sólidos o líquidos. De la comparación bibliográfica revisada en las tesis de (Pérez J, 2011), (Ramírez J, 1991), (Mahmud, Z., Gordillo, G., Ventura D'Alkaine, C.,2017) la recuperación con soluciones específicamente preparadas para las celdas funciona mejor.

5 CONCLUSIONES

1. Se recuperó un polvillo negro después de cada proceso en el tratamiento teniendo una cantidad de 1.27 g el cual se fue depositando en los cátodos y removido de la solución electrolítica, es una cantidad mínima, comparada con la cantidad de lodo depositado en la celda que aportaba 805.7 g de residuo sólido que contenía zinc, sin embargo, al analizar el agua se vio que había una menor cantidad de zinc por lo que esa es la cantidad eliminada en el polvillo negro obtenido. Por cuestiones de Pandemia no se pudo determinar la sal de zinc a la que correspondía este material, por lo que se recomienda en otros estudios realizar la caracterización química de este material.

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

2. El porcentaje de recuperación de zinc en la primera celda con electrodos de acero en un tiempo de 2-4 horas fue de 30.88%, con el plomo en 4-8 horas fue de 12.93 % y con el cobre en 4-8 horas fue de 16.25 %, y en la segunda celda en 4 horas fue de 14.49 %.
3. El Zinc es un elemento que hoy en día está siendo muy cotizado y utilizado por muchas empresas para diferentes usos, en especial en el galvanizado, por lo cual se recomienda a la empresa VYMSA un correcto manejo de dosificaciones en sus procesos para que los lodos no presenten elevadas concentraciones que a la final representan pérdidas del metal y consecuentemente de dinero a la empresa. Hay que evitar las pérdidas no solo por la importancia y uso del elemento, sino porque existen impactos asociados a la extracción y la ineficiencia en los procesos productivos que promueven mayor consumo y por ende mayor impacto en la cadena de suministro del elemento.
4. Los cátodos de acero, plomo y zinc son metales que, al encontrarse en contacto con energía eléctrica con voltaje por varias horas, fueron perdiendo su masa y su rigidez. El aluminio, especialmente, en un corto tiempo (1 hora) perdió su masa significativamente y el Zinc como ánodo de igual manera. El pH manejado era extremadamente ácido ya que lo que se pretendía era la mayor dilución de los metales del lodo en el líquido electrolítico, por lo tanto, no se recomienda la electrodeposición como tratamiento de lodos a menos que estos presenten alta solubilidad en el agua a pH mayores a 3.
5. En el líquido electrolítico se inició con una concentración de 2.72 mg/L de Zn, y una concentración final de 0.69 mg/L, en conclusión, esta investigación indica que el proceso podría tener una mayor utilidad como tratamiento de aguas con metales, pero no para su recuperación, ya que al ser muy baja impide su purificación y comercialización.

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

6. En análisis económico dio en gastos un valor total de \$181.4, pero se calculó que para sacar 1 kg de Zinc se necesitaría aproximadamente de \$143 976.19 lo cual es demasiado costoso e indica que no va a ser de utilidad implementar este método en la empresa.

6 RECOMENDACIONES

1. La superficie de la celda electrolítica con la que se va a trabajar, antes de iniciar cualquier tratamiento como en este caso la electrodeposición debe estar completamente limpia y libre de cualquier tipo de sustancia que pueda alterar el proceso.
2. Durante el proceso en el laboratorio es importante controlar periódicamente el pH en este caso que se encuentre ácido entre 3-4, así como los aditivos y el tiempo que es una variable importante, ya que de esto depende como se encuentre la solución en la celda.
3. Realizar un análisis de la recuperación del polvillo negro por un Laboratorio acreditado, para determinar su composición y verificar si los electrodos se desprendían en la electrodeposición.
4. Debido a la situación se hizo un solo análisis se recomienda validar este estudio en otras circunstancias con más datos para hacer el cálculo estadístico respectivo.
5. No se recomienda aplicar este método, no es adecuado porque no se tiene una buena recuperación, sin embargo, se recomienda probar otros métodos de recuperación de zinc.

7 BIBLIOGRAFÍA

Alvarado E, González K & Mendoza O. (2010). *PROPUESTA DE UN MÉTODO PARA LA RECUPERACIÓN DE ZINC DE PILAS ALCALINAS USADAS BAJO EL ENFOQUE DE PRODUCCIÓN MAS LIMPIA*. Universidad de El Salvador

Antaño R et al. (2014). *Proceso para la extracción de Zinc a partir de residuos sólidos de galvanoplastia*. IMPI

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

Aser, S.A., (2000). “Reciclaje de metales a partir de chatarras y residuos industriales”, Ingeniería Química, 32 (367), 211.

ATSDR. (2016). (*Zinc*). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts60.html

CALLE PIEDRA, L. G. (2015). *Diseño De Una Planta De Tratamiento De Lodos Provenientes De La Industria De Galvanizado, Mediante Encapsulado*. Escuela Politécnica Nacional. Quito

Cedron J.; Landa V. & Robles J. (2011). *Celdas Electrolíticas*. Química General. Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de: <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/43-celdas-electroliticas.html>

Emewadmin. (2018). ELECTRODEPOSICIÓN 101: ¿QUÉ ES LA ELECTRODEPOSICIÓN? West Georgia St. Canada: emew clean technologies. Recuperado de: <https://es.emew.com/electrodeposicion-101-que-es-la-electrodeposicion/>

Field, S & A Dudlev Weill. (1955). Recubrimientos electrolíticos técnicas Modernas y análisis de baños. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona. Página 39.

García A. (s.f). *RECUPERACIÓN DEL ZINC DE UNA SOLUCIÓN DE LAVADO DEL PROCESO DE GALVANIZACIÓN*. Universitat Politècnica de Catalunya

Gil J. (2012). TRATAMIENTO ELECTROQUIMICO PARA LA REMOCION DE METALES PESADOS EN RESIDUOS LIQUIDOS PELIGROSOS GENERADOS EN LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA. Universidad del Valle. Santiago de Cali

Gordón D. (2020). “*INERTIZACIÓN DE LOS LODOS DE GALVANIZADO DE LA PROCESADORA VYMSA CON FINES DE VALORIZACIÓN*”. Quito. Universidad Internacional SEK. Tesis de Grado

JANSSEN, L.J.J. and L. Koene, The role of electrochemistry and electrochemical technology in environmental protection. Chemical Engineering Journal, 2002. 85(2-3): p. 137-146

Mahmud, Z.; Gordillo, G.; Ventura D'Alkaine, C, (2017-10). *Aspectos teóricos y prácticos de la tecnología de electrodeposición de zinc*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/technicalreport/technicalreport_00022.pdf

Métodos estándar (2018). "3500-Zn ZINC (2017)", *Métodos estándar para el examen de aguas y aguas residuales* DOI: 10.2105 / SMWW.2882.065 <https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.065>

Nava D. (2013). *Electrodeposición y caracterización de recubrimientos de Ni-P*. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

PANCHI, V. Vinicio., (2009) Estudio del proceso de electrodeposición de metales sobre una base polimérica. Tesis de grado. Ingeniero Mecánico. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica. Quito. p. 46

Pardavé, W., (2006). *Generalidades “Reciclado industrial de metales: una aproximación”*, Ecoe Ediciones, Bogotá, Colombia, pp. 2-5.

Pérez J. (2011). *OBTENCIÓN DE POLVOS DE ZINC POR VIA ELECTROLITICA*. Universidad del Valle.

Porroa E. (2014). *Electrodeposición del Zinc*. Universidad Nacional de San Antonio ABAD del Cusco

Ramírez J. (1991). *Obtención de Recubrimientos de Zinc Mediante Electrolisis y sus Tecnologías*. Universidad Autónoma de Nuevo León

Raffino M. (11 de Octubre de 2019). Batería. Obtenido de: *Concepto.de*. <https://concepto.de/bateria/>. Consultado: 02 de junio de 2020.

Taípe D. (2014). *Validación de Métodos Analíticos para la Determinación de Boro, Zinc y Potasio por espectrofotometría en muestras de agua en el centro de Investigaciones y control Ambiental. (CICAM)*. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Tesis de Grado

Temáticas.org (2020). *PRECIO ZINC*. Obtenido de: <https://tematicas.org/indicadores-economicos/economia-internacional/precios/precio-zinc/>

VYMSA. (2019). Recubrimientos electroquímicos para piezas metálicas. Quito: Procesadora VYMSA

Normativa

Consejo de Distrito Metropolitano de Quito. (2016). Código Municipal Único. Quito. Ecuador

Consejo del Distrito Metropolitano de Quito (2014). Norma técnica de desechos peligrosos o especiales de la Ordenanza Metropolitana No 404, NT005. Quito – Ecuador

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Límites máximos permisibles para extracción de metales pesados en base seca, (Digestión Ácida)</i>	21
<i>Tabla 2. Comparación del método Vía Residuo (MI) en mg/kg con el Código único Municipal; Límites máximos permisibles para extracción de metales pesados en base seca (Digestión Ácida)</i>	21
<i>Tabla 4. Parámetros medidos en la muestra de lodo residual</i>	28
<i>Tabla 5. Pesos de vasos de precipitación</i>	29

RECUPERACIÓN ELECTROLÍTICA DE ZINC DE LOS RESIDUOS DE PROCESO DE UNA EMPRESA METAL – MECÁNICA (VYMSA) CON FINES DE APROVECHAMIENTO

<i>Tabla 6. Materiales para digerir la muestra</i>	31
<i>Tabla 8. Cálculo del porcentaje de humedad</i>	33
<i>Tabla 9. Valores iniciales para trabajar</i>	34
<i>Tabla 10. Pruebas realizadas en las celdas electrolíticas</i>	36
<i>Tabla 11. Análisis de muestras de las celdas</i>	39
<i>Tabla 12. Análisis económico</i>	39
<i>Tabla 13. Porcentaje de recuperación de Zinc</i>	42

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Principio de proceso de electrodeposición. (Tomado de: Nava D, 2013)</i>	13
<i>Figura 2. Descarga de una celda en una operación electroquímica (Fuente: Tomada de Cedrón J.; Landa V.; Robles J., 2011)</i>	14
<i>Figura 3. Celda electroquímica (Fuente: Tomada de Pérez J, 2011)</i>	15
<i>Figura 4. Cuba de vidrio. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	24
<i>Figura 5. Dimensiones del diseño de la celda electrolítica. (Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha)</i> ..	24
<i>Figura 6. Plano dimensional de la celda. (Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	25
<i>Figura 7. Diseño 3D de la Celda Electrolítica de vista posterior y frontal. (Elaborado por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	25
<i>Figura 8. Celda pequeña. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	26
<i>Figura 9. Batería (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	26
<i>Figura 10. Transformador de energía (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	27
<i>Figura 11. Cátodos. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	27
<i>Figura 12. Ánodos. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	27
<i>Figura 13. Muestra de lodo (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	28
<i>Figura 14. Pesos de vasos de precipitación de 50 mL con muestra de lodo. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	29
<i>Figura 15. Muestras de lodo a secar en una incubadora. (Tomada por. Vásquez Ma. Augustha)</i>	30
<i>Figura 16. Filtración de muestra (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	30
<i>Figura 17. Digestión de muestra. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	31
<i>Figura 18. Formación de gases en cátodos (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	38
<i>Figura 19. Resultados de los cátodos y ánodos después del proceso de electrodeposición. (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	38
<i>Figura 20. Resultados de la recuperación (Tomada por: Vásquez Ma. Augustha)</i>	41