



**CONTROL DE PARÁMETROS DE CELDA ELECTROLÍTICA EN PLANTA
PILOTO DE GALVANOPLASTIA**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN
MANUFACTURA AVANZADA**

P RESENTA

**ING. FAMARI VALDEZ DE JESÚS
DR. VÍCTOR ESTEBAN REYES CRUZ**

CD. SAHAGÚN, HIDALGO, JULIO 2018.

CARTA LIBERACIÓN DEL ASESOR



22 de junio de 2018

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno Ing. Famari Valdez De Jesús, una vez revisada la Tesis o tesina titulada: "CONTROL DE PARAMETROS DE CELDA ELECTROLITICA EN PLANTA PILOTO DE GALVANOPLASTIA", autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de Maestría en manufactura avanzada, durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 22 días del junio del año 2018.



Dr. Victor Esteban Reyes Cruz
RECV670916HHGYRC04

Asesor Académico



Dr. José Angel Cobos Murcia
COMA780727HVZBRN03

Asesor en Planta

CARTA LIBERACIÓN DEL REVISOR



Santiago de Querétaro, Qro.
27 de junio del 2018

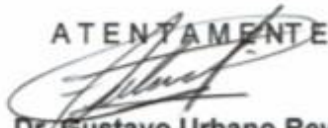
Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora
Posgrado CIATEQ
PRESENTE.

Por medio de la presente me estoy dirigiendo a Ud. de la manera más atenta, de que fui designado como revisor del trabajo de tesis del (la) **Ing. Famari Valdez de Jesús**, del trabajo titulado:

"Control de parámetros de celda electrolítica en planta piloto de galvanoplastia"

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con el (la) estudiante antes mencionado(a), el trabajo de tesis que me fue entregado y haciendo resaltar que el (la) estudiante realizó todos los cambios que le fueron sugeridos a la tesis, ésta puede ser autorizada para su publicación y que de ésta manera pueda iniciar los trámites correspondientes para iniciar el proceso de titulación.

Sin otro particular por el momento y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta y en beneficio del estudiante y la institución, agradezco la atención que se sirva prestar a la presente.

ATENTAMENTE

Dr. Gustavo Urbano Reyes
CURP: UARG760710HHGRYS03

RESUMEN

En gran parte de las empresas de galvanoplastia debido a la demanda y el tiempo de los procesos, es muy complicado realizar un estudio a nivel piloto en sus plantas para controlar las variables que determinan la calidad de los depósitos. Por lo tanto, en este trabajo se presenta un estudio para determinar las condiciones de corriente y potencial, así como evaluar algunos tipos de agitación para la operación de una planta piloto de galvanoplastia y controlar la calidad de los depósitos, utilizando algunas soluciones electrolíticas de la industria. Se utilizó una celda electrolítica típica con capacidad de 70 L conectada a una fuente de poder, como ánodos se usaron placas de latón y como cátodo se utilizó una lámina de acero inoxidable 304, utilizando un multímetro para registrar la corriente y el potencial durante el electrodeposición. La agitación de la solución electrolítica se controló de tres formas: flujo de aire, propela y utilizando propela con un equipo sonotrodo (sonda de ultrasonido). Los resultados mostraron que el depósito de Cu-Zn (latonado) ocurre en un intervalo de corriente entre 0.45 a 0.55 A y un voltaje de -0.48 a -0.6 V, para evitar la evolución de hidrógeno y que solo se deposite cobre. También se determinó que el tipo de agitación donde se controla mejor el depósito es con la sonda de ultrasonido y la propela a una velocidad controlada, debido a que se evita una pasivación de la superficie de los ánodos por la formación de óxidos. Además permite obtener un flujo más controlado de los iones del ánodo hacia el cátodo (transporte de masa).

Palabras Clave: Codepósito Cu-Zn, Latonado, Galvanoplastia, Proceso de electrodeposición, Soluciones electrolíticas, Pasivación de electrodos, Ingeniería y tecnología, Tecnología Industrial, Especificaciones de procesos.

TEMAS DEL REPOSITORIO NACIONAL

CLASES PRINCIPALES	Elige un valor para la clase primaria	Elige un valor de la clase secundaria
Biología QUÍMICA		
Biología CS.DE LA VIDA		SE QUEDA VACIO
CS.AGRARIAS y Biotecnología		
Cs. Físico Matemática LÓGICA		
Cs. Físico MATEMATICAS		
Cs. Físico Mat. ASTRONOMIA		
Cs. Físico Mat. FISICA		
Cs.FísicoMat. TIERRA Y ESPACIO		
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA	Tecnología_industrial	Especificaciones_de_procesos

ABSTRACT

In large part of the electroplating companies due to the demand and time of the processes, it is very complicated to carry out experiments to study and control the variables that determine the quality of the deposits. Therefore, in this work a study is presented to determine the potential, current and agitation parameters for the operation of a pilot electroplating plant, using some electrolytic solutions of industry. A typical electrolytic cell with a capacity of 70 L connected to a power source was used. Two brass plates as anodes and a 304 stainless steel plate as cathode were used with two multimeters to record the current and the potential during the electrodeposition process. The agitation of the electrolytic solution was tested in three ways: air flow, propeller and using a propeller with a sonotrode device (ultrasound probe). The results showed that the deposit of Cu-Zn (brass) occurs in a current interval between 0.45 to 0.55 A and a voltage of -0.48 to -0.6 V, to avoid the evolution of hydrogen and that only copper will be deposited. It was also determined that the type of agitation where the deposit is better controlled is with the ultrasound probe and the propeller at a controlled speed, because a passivation of the surface of the anodes is prevented by oxides formation. It also allows obtaining a more controlled flow of metal ions from the anode to the cathode (mass transport).

Key words: Cu-Zn deposit, brass process, electroplating, electrodeposition process, Electrolytic solutions, Electrode passivation.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARTA LIBERACIÓN DEL ASESOR.....	I
CARTA LIBERACIÓN DEL REVISOR	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
GLOSARIO	XIV
AGRADECIMIENTOS.....	XVII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4 OBJETIVOS	3
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.4.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS:.....	3
1.5 HIPÓTESIS.....	3
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	4
2.1. PRINCIPIOS DE ELECTROLISIS PARA EL PROCESO DE LATONADO	4
2.1.1 Electrólisis	4
2.1.2 Galvanoplastia.....	4
2.1.3 Electroquímica y celda electrolítica.....	5
2. 2. SOLUCIONES ELECTROLÍTICAS INDUSTRIALES.....	5

2.2.1 pH de la solución electrolítica	6
2.2.2 Disociación iónica y concentración iónica.....	7
2.2.3 Densidad de corriente	8
2.2.4 Distribución de corriente.....	9
2.2.5 Potencial de electrodo.....	9
2.2.6 Relación del potencial	11
2.3 PROCESO ELECTROLÍTICO DE LATONADO.....	12
2.3.1 Soluciones electrolíticas para el proceso de latonado	12
2.3.2 Agitación de la solución.....	13
2.3.3 Efecto de la temperatura.....	13
2.4 LEY DE FARADAY	13
2.5 INVESTIGACIONES MÁS RECIENTES	20
CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN	23
3.1 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL	23
3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	24
3.2.1 Celda electrolítica.....	24
3.2.2 Solución electrolítica.....	25
3.2.3 Agitación de la solución electrolítica	26
3.3. PROCESO PREPARACIÓN DE LA PIEZA A RECUBRIR	27
3.3.1 Proceso de electrodepositos y parámetros del proceso.....	28
3.3.2 Control potencioestáticos	28
3.3.3 Control galvanostatico	29
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	30
4.1 PREPARACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LA CELDA ELECTROLÍTICA.....	30

4.2 PREPARACIÓN DE LA PIEZA A RECUBRIR.....	31
4.2.1 Limpieza e la pieza a recubrir	31
4.2.2 Pulido de la pieza	32
4.2.3 Desengrasante	33
4.2.4 Enjuague	35
4.3 ELECTRODEPÓSITO Y TIPOS DE AGITACIÓN (PARÁMETROS DEL PROCESO)	36
4.3.1 Agitación con flujo de aire	37
4.3.2 Agitación con propela.....	39
4.3.3 Agitación con propela y ondas de vibración	42
4.3.4 Interacción de corriente y potencial	44
4.4 CONTROL POTENCIOSTÁTICO	45
4.4.1 Control de potencial en -0.35V y -0.40V.	45
4.4.2 Control de potencial en -0.42V y -0.45V.	47
4.4.3 Control de potencial en -0.48V y -0.55V.	50
4.4.4 Intervalo de Potencial de -0.60V, -0.65V.	52
4.5 CONTROL GALVANOSTÁTICO	55
4.5.1 Corriente controlada a 0.33 A y 0.35 A.	55
4.5.2 Corriente controlada en 0.45 A y 0.48 A.	57
4.5.3 Corriente controlada en 0.55 A y 0.60 A.	60
4.6 EFICIENCIA DE CORRIENTE	63
CONCLUSIONES	67
APORTACIONES DE LA TESIS.....	69
RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	71

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1 Imagen de la Celda electrolítica, fuente: http://celdaelectrolitica.blogspot.com .	14
2 Diagrama de flujo de la metodología desarrollada.	23
3 Esquema de: a) celda electrolítica, b) tubo de cobre para flujo de corriente eléctrica, c) fuente de poder y d) vista de planta de las conexiones del arreglo electroquímico.	24
4 Imagen de la celda electrolítica conectada a la fuente de poder y los multímetros para censa el potencial y la corriente.	30
5 Preparación de la pieza a recubrir: lavado inicial de la pieza con jabón a base de hidróxidos.	31
6 Imagen de la preparación de la pieza, pulido de la superficie bajo chorro de agua de una llave.	32
7 Lavado de la pieza, después del pulido de la superficie bajo chorro del agua de la llave.	33
8 Decapado químico con una solución de ácido clorhídrico al 10%, por alrededor de 30 segundos.	34
9 Imagen del último enjuague con agua desionizada utilizando una pizeta.	35
10 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodos después de realizar el proceso de electrodeposición, aplicando agitación con flujo de aire.	38
11 Figura de la gráfica de la variación de la corriente durante el tiempo del electrodeposición, aplicando agitación con flujo de aire a una corriente fija de 0.35 A.	38
12 Figura de la gráfica de la variación del potencial, durante el tiempo del electrodeposición, aplicando agitación con flujo de aire.	39

	pág.
13 Figura gráfica de la variación del potencial, durante el tiempo del electrodepósito, aplicando agitación con propela a 350 rpm.	40
14 Figura gráfica de la variación de la corriente, durante el tiempo del electrodepósito, aplicando agitación con propela a 350 rpm.	41
15 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodepósito, aplicando agitación con propela a 350 rpm.	41
16 Imagen de la gráfica de la variación del potencial, durante el tiempo del electrodepósito, aplicando agitación con propela a 350 rpm y ondas de vibración.	42
17 Imagen de la gráfica de la variación de la corriente, durante el tiempo del electrodepósito, aplicando agitación con propela a 350 rpm y ondas de vibración.	43
18 Figura de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodepósito, aplicando agitación con propela a 350 rpm y ondas vibración.	44
19 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodepósito, aplicando un potencial fijo de -0.35V.	45
20 Imagen de la gráfica de la variación de: corriente, durante el tiempo del electrodepósito, aplicando un potencial fijo de -0.35V y -0.40 V.	46
21 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodepósito, aplicando un potencial fijo de -0.40V.	46
22 Grafica de la variación de: corriente, durante el tiempo del electrodepósito, aplicando un potencial fijo de -0.42V y -0.45 V.	48
23 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodepósito, imponiendo el valor del potencial a -0.42 V.	49

	pág.
24 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso electrodeposición, imponiendo el valor del potencial a -0.45 V .	49
25 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor del potencial a -0.48 V .	51
26 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso electrodeposición, imponiendo el valor de la potencial a -0.55 V .	51
27 Figura Gráfica de la variación de: corriente, durante el tiempo de electrodeposición, aplicando un potencial fijo de -0.48 V y -0.55 V .	52
28 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor del potencial a -0.60 V .	53
29 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la potencial a -0.65 V .	54
30 Figura de la gráfica de la variación de: corriente, durante el tiempo del electrodeposición, aplicando un potencial fijo de -0.60 V y -0.65 V .	54
31 Figura de la gráfica de la variación de: potencial durante el proceso del electrodeposición, imponiendo un valor de corriente de 0.33 A y 0.35 A .	56
32 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.33 A .	56
33 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.35 A .	57

	pág.
34 Figura de la gráfica de la variación de: potencial durante el tiempo del proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente a 0.45 A y 0.48 A.	58
35 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.45 A.	59
36 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.48 A.	59
37 Figura, gráfica de la variación de: potencial durante el proceso del electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente a 0.45 A y 0.48 A.	61
38 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.55 A.	61
39 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.55 A.	62
40 Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.60 A.	63
41 Gráfica de la variación del potencial durante el proceso del electrodeposición, imponiendo una corriente fija.	63
42 Imagen de la eficiencia del proceso a diferentes corrientes impuestas en el baño electrolítico.	66

ÍNDICE DE TABLAS

	pág.
1 Tabla de Equivalente electroquímico de los metales.	15
2 <i>Tabla de potencial</i> de hidrogeno (Potencial de Referencia).	18
3 Tabla muestra La masa real y teórica de los experimentos de electrodepósito de latón.	64

GLOSARIO

Agente oxidante: o comburente es un compuesto químico que oxida a otra sustancia en reacciones electroquímicas o de reducción-oxidación. En estas reacciones, el compuesto oxidante se reduce.

Agente reductor: Un agente reductor es aquel que cede electrones a un agente oxidante. Existe una reacción química conocida como reacción de reducción-oxidación, en la que se da una transferencia de electrones. Una reacción de reducción-oxidación consiste en dos semireacciones: una semireacción implica la pérdida de electrones de un compuesto, en este caso el compuesto se oxida; mientras que en la otra semireacción el compuesto se reduce, es decir gana los electrones. Uno actúa como oxidante y el otro como reductor. Como ejemplos tenemos:

Amper (A). Es la corriente que, se mantiene en dos conductores paralelos rectos de longitud infinita y de sección transversal insignificante, colocado a 1 m de distancia en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-2} N / m (definición SI). Prácticamente, la corriente que depositará plata a la velocidad de 0.0011180 g / s, o la corriente que fluye a la velocidad de 1 C / s.

Ánodo: el ánodo es un electrodo en el que se produce una reacción de oxidación, mediante la cual el material, al perder electrones, incrementa su estado de oxidación.

Cátodo: Un cátodo es un electrodo en el que se genera una reacción de reducción mediante la cual un material reduce su estado de oxidación al aportarle electrones.

Celda electrolítica: son los dispositivos experimentales que producen corriente eléctrica a partir de reacciones químicas.

Conductividad equivalente: En un electrolito, la conductividad de la solución se divide por el número equivalente de soluto conductor por unidad de volumen; es decir, la conductividad dividida por la normalidad de la solución.

Conductividad: Es la capacidad de un material de conducir la corriente eléctrica.

Densidad de corriente: se define como una magnitud vectorial que tiene unidades de corriente eléctrica por unidad de superficie, es decir, intensidad por unidad de área

Diferencia de potencial: Es el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas.

Electrolito: Es cualquier sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico. Debido a que generalmente consisten en iones en solución, los electrolitos también son conocidos como soluciones iónicas.

Ion: Es una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutra.

Ionización: Conceptualmente esto se puede entender como que, a partir de un estado neutro de un átomo o partícula, se han ganado o perdido electrones: este fenómeno se conoce como ionización.

Límite de la densidad de corriente anódica: La densidad de corriente máxima a la cual el ánodo se comporta normalmente, sin excesiva polarización.

Límite de la densidad de corriente catódica: La densidad de corriente máxima a la que se pueden obtener depósitos satisfactorios.

Metal base: Un metal que se oxida o se disuelve fácilmente para formar iones. Lo opuesto al metal noble

Metal noble: Un metal que no presta para suministrar iones fácilmente y, por lo tanto, no se disuelve en forma constante ni entra fácilmente en reacciones tales como oxidaciones. El opuesto del metal base.

pH: Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias.

Potencial de electrodo: La diferencia de potencial entre un electrodo y el electrolito de ajuste inmediato hace referencia a un potencial de electrodo estándar como cero.

Propiedades coligativas: En química se llaman propiedades coligativas a aquellas propiedades de una disolución que dependen únicamente de la concentración. Generalmente expresada como concentración equivalente, es decir, de la cantidad de partículas de soluto por partículas totales, y no de la composición química del soluto y del solvente diluido en agua.



Reacción de óxido-reducción: comúnmente conocida como reacción redox, es toda reacción química en la que uno o más electrones se transfieren entre los reactivos, provocando un cambio en sus estados de oxidación. O simplemente reacción redox, es toda reacción química en la que uno o más electrones se transfieren entre los reactivos, provocando un cambio en sus estados de oxidación.

Voltaje: El voltaje, tensión o diferencia de potencial es la presión que ejerce una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza electromotriz (FEM) sobre las cargas eléctricas o electrones en un circuito eléctrico cerrado, para que se establezca el flujo de una corriente eléctrica.

AGRADECIMIENTOS



Agradecimiento al programa nacional de posgrados de calidad con la Industria, PNPC del Conacyt, por la confianza depositada en mi persona, otorgando me la beca para obtener el grado de maestro en manufactura avanzada.



Agradezco al Centro de Tecnología Avanzada, por la oportunidad que me otorga de cursar el programa de Maestría en Manufactura Avanzada, con la acreditación del PNPC de CONACYT en la modalidad Posgrados con la Industria.



Agradezco a la universidad Autónoma del estado de Hidalgo, al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, en especial al laboratorio de procesos Electroquímicos por la oportunidad de realizar la investigación en la planta piloto de galvanoplastia.

AGRADECIMIENTOS

A Jehová: Por brindarme la oportunidad de existir, por guiarme aun a pesar de mis constantes fallas. Por permitirme ser parte de su pueblo y por ser mi Dios el que me enseña para mi beneficio, mi Dios que me hace pisar en el camino que debo andar (Isaías 48:17). “Él que Causa Que Llegue a Ser”, Gracias

A mis padres: Faustino Valdez y María de Jesús. Por ese amor desinteresado por iniciar y alentar el terreno que define parte importante de mi vida, y sin duda la mejor de las experiencias.

A mis hermanos: Tino, Ly, Chayito, Chaparrita, Fini, Chuy, Maiza, Micos, Babis, Nia. Que juntos compartimos esta hermosa familia divertida y tragona. Son y serán mis amigos compañeros de vida, Por ser testigos de mis decisiones e indecisiones. Por apoyarme y alentarme. Por el gran cariño que nos une.

Anexos: Israel Corona y Diana Olivares, aun cuando son harina de otro costal, bien venidos a nuestras vidas.

A mis hermosos sobrinos: Fer, Nicol, Iris, Nanda, Mia, Matías, Romina, Por su cariño, sonrisas, abrazos. Por ser la sal que sazona nuestras vidas.

A los doctores, Víctor E, Reyes Y Dra. Aurora veloz: Por la oportunidad y confianza para realizar esta investigación. Por convertir la investigación en expresión, y la expresión en Título. Por brindarme su apreciable amistad durante estos 10 años. Por el apoyo y las grandes oportunidades inmerecidas, Pero sobre todo por ser el fundamento sólido de conocimiento y experiencia que con generosidad comparten. Jehová les bendiga siempre. Gracias.

A Dr. Gustavo Urbano: Por el excelente ser humano, y por su enorme contribución para avanzar en los trámites de este proyecto,

A los doctores y amigos: Dr. Raúl Barrientos, Dr. Martin reyes, Dr. Felipe Legorreta, Dr. Cardoso, al Dr. José Ángel Cobos, Ing. Martin Alamilla. Por compartir su conocimiento, su amistad y su confianza.

A mis amigos de toda una vida: Martha y Alma Sanjuanero, Blanca G. Beltrán, Luz María Flores, Miriam Hamparzumíán, Pedro A. Ortega Y Laura G. Hernández. Gracias por llegar y nunca marcharse. Gracias brindarme su amistad. Por su gran calidad humana. Por las buenas y malas experiencias. Por la lealtad he integridad y la buena educación, que les caracteriza. Pero sobre todo, por esos locos y divertidos momentos, llamados Felicidad.

A mis catedráticos: Por compartir su conocimiento y experiencias. Gracias

A mis compañeros de clases: Con los que compartí pasillos, salones, catedráticos, discusiones, y algunas cervezas, es tiempo de tomar rumbos diferentes. Que la vida les brinde amigos verdaderos y muchos años de vida.

A Doña Lucha: Por aguantarme en estos años. Por tomarme parte de su familia. Por compartir conmigo ese viejo sillón al final del día. Por ese rico café acompañado de pláticas interminables.

A mis compañeros de trabajo: Piedad, Martita y Jesús, admiro su profesionalismo. Gracias, por compartir las mejores experiencias en el trabajo, y los mejores chismes del día.

A CIATEQ: Por la confianza y la oportunidad de subir un escalón más.

A TODOS USTEDES GRACIAS, POR LA OPORTUNIDAD QUE ME DAN Y ME DIERON DE CONOCERLES, ASI COMO DE DISFRUTAR DE SU AMISTAD.

FAMARI

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El área de investigación de ciencias de la tierra y materiales de la universidad autónoma del estado de Hidalgo tiene como propósito el acondicionar e instrumentar una planta piloto de galvanoplastia que tenga como finalidad operar un proceso de electrodeposición que reproduzca a menor escala los procesos industriales de galvanoplastia. Pretendiendo predecir el comportamiento de las variables del proceso electrolítico y permitiendo desarrollar un control de ellas para la solución de los problemas que se presentan a nivel industrial.

Una planta piloto es una planta de proceso a escala diseñada con la finalidad de obtener información sobre el proceso a escala, es técnica y económicamente viable, establece los parámetros de operación óptimos de los procesos electrolíticos. Con el objeto de estudiar su actividad y selectividad, y de optimizar las variables de proceso.

Esta institución basándose en los conocimientos adquiridos tanto en el aula como en la realización de prácticas realizadas por los alumnos, ofrece una oportunidad más de obtener nuevas experiencias que le permitan emplearse en diferentes ramos de la industria dedicada a la galvanoplastia. Al respecto conviene decir que la implementación de una planta piloto modelo de electrodepósitos, es una oportunidad en el área de investigación, brindando herramientas necesarias tanto para docentes como para alumnos.

En el presente trabajo se muestra la investigación para la instalación de una línea a nivel escala piloto, su verificación y control de parámetros. Adicionalmente tiene la finalidad de mantener las condiciones adecuadas en la planta piloto de la Universidad Autónoma de Estado de Hidalgo, para la realización de docencia, investigación y servicios externos. Encontrar las condiciones para el control del potencial o corriente impuesta, activación de motores para recirculación y agitación; además de monitorear las variables de las soluciones electrolíticas como pH, concentración de la especie a depositar, entre otros.

La finalidad de utilizar una planta piloto en la enseñanza, es llevar a cabo prácticas que ayuden a la interacción de los alumnos y profesores con el proceso de electrodeposición. El manejo del equipo, la manipulación de variables, la comprensión del proceso y resolución de problemas relacionados con situaciones reales en una planta de galvanoplastia.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente se cuenta con un sistema electrolítico para llevar a cabo procesos de galvanoplastia a nivel de planta piloto en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, el cual no se utiliza satisfactoriamente para realizar prácticas de docencia. Aunado a esto, dichas instalaciones no se usan actualmente para realizar investigación, analizando y controlando las variables para mejorar los procesos de electrodeposiciones. En este sentido la planta piloto de procesos de galvanoplastia, no está enfocada a la realización de prácticas de docencia que permita al alumno desarrollar cualidades de respuesta ante una situación real. Por otro lado, existen empresas que requiere de estudios externos para evaluar sus procesos y/o productos de galvanoplastia, así como y capacitación de su personal.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En este trabajo se desarrolló un estudio para evaluar el funcionamiento de la planta piloto de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y su puesta en marcha, enfocándola a la docencia, investigación, así como a dar servicio externo. La planta piloto de galvanoplastia permitirá el desarrollo de prácticas para la enseñanza de las ingenierías, investigación experimental y llevar a cabo el análisis de variables de un proceso real de la industria. La comprensión de estas variables permitirá al alumno desarrollar habilidades, como la toma de decisiones, el trabajo en equipo, y el manejo e interacción con los procesos de electrodeposición.

Además, la planta piloto permite simular las condiciones reales de una planta industrial, discerniendo los cambios de las variables importantes de operación. Mejorar la Comprensión en la docencia, y por consiguiente dar pasó a la investigación de los fenómenos que originan cambios directamente relacionados con la respuesta y rendimiento del proceso. Nos permitirá manejar las variables más importantes del proceso, para dar soluciones en procesos a escala industrial.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Acondicionar, determinar y controlar los parámetros en una celda electrolítica de la planta piloto de galvanoplastia de la universidad Autónoma del Estado de Hidalgo que permita el depósito adecuado de un recubrimiento de latonado.

1.4.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS:

1. Preparar y acondicionar la celda electrolítica de la planta piloto de galvanoplastia que se utilizará para experimentar y obtener parámetros de las variables del proceso.
2. Experimentar y obtener los parámetros de las principales variables del proceso para llevar a cabo un electrodepósito de latonado.

1.5 HIPÓTESIS

Es posible acondicionar una celda electrolítica de la planta piloto de galvanoplastia de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo que permita determinar y controlar los parámetros de las principales variables de un proceso de latonado.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. PRINCIPIOS DE ELECTROLISIS PARA EL PROCESO DE LATONADO

2.1.1 Electrólisis

El proceso de los recubrimientos metálicos electrolíticos se basa en el principio fundamental de la electrolisis. La electrolisis transforma la energía eléctrica en energía química, es decir, una sustancia o un cuerpo inmersos en una disolución se descomponen por la acción de la una corriente eléctrica continua, (Calderón, 2005).

Durante el proceso electroquímico, hay desplazamiento de iones en direcciones opuestas. Esta acción es producida por la aplicación de una corriente eléctrica externa, lo cual produce el movimiento en función de la diferencia de potencial aplicada a los electrodos. Lo que hace que los aniones se trasladen hacia el ánodo para neutralizar su carga y a la vez, los cationes se trasladan hacia al cátodo.

Generalmente la corriente aplicada a los electrodos es suministrada por una fuente de corriente continua o un rectificador. La diferencia de potencial sobre los electrodos del baño o voltaje, es expresado en Voltios (V), y se considera como la cantidad necesaria de electricidad para producir en el electrolito una circulación de corriente, y está expresada en amperios (A).

2.1.2 Galvanoplastia

La galvanoplastia se define como la electrodeposición de un revestimiento metálico adherente sobre un electrodo con el fin de asegurar una superficie con propiedades o dimensiones diferentes de las del metal base. La electrodeposición es un proceso electroquímico que se define como el arte de depositar metales mediante el uso de la corriente eléctrica. Esto involucra la reducción de un compuesto metálico disuelto en agua, y el depósito del metal resultante sobre una superficie conductora químicamente limpia, este mecanismo es explicado por la teoría de la disociación iónica y electrolisis. El proceso de electrodeposición dentro de la de galvanoplastia se define como

adherente. En las otras palabras el depósito debe adherirse de manera suficientemente al cátodo para que no se desprenda durante la operación o uso, (Suarez, 2014).

2.1.3 Electroquímica y celda electrolítica

Electroquímica es una rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química. En otras palabras, las reacciones químicas que se dan en la interface de un conductor eléctrico (llamado electrodo, que puede ser un metal o un semiconductor) y un conductor iónico (el electrolito) pudiendo ser una disolución y en algunos casos especiales, un sólido.

Las celdas electrolíticas están constituidas por un recipiente que no reacciona y no influye en el proceso de electrodeposición; el cual contiene al electrolito que está constituido principalmente por sales de los metales que van a ser depositados y ácidos o bases por lo general inorgánicos, (Graham, 1974).

2. 2. SOLUCIONES ELECTROLÍTICAS INDUSTRIALES

Se llaman soluciones electrolíticas a todas aquellas en las que el soluto se encuentra disuelto en el solvente formando iones. Los iones, que están ya preformados en una sal, aun en su forma cristalina, se disocian al entrar en solución, siempre y cuando haya alguna fuerza que pueda romper sus enlaces. Faraday llamo aniones, a los iones que se mueven hacia el ánodo, y cationes a los que se mueven hacia el cátodo, y a las sustancias que conducen la corriente electrolitos.

Las soluciones de electrolitos tienen propiedades coligativas con valores mayores que los correspondientes a su concentración molar. Los electrolitos son sustancias que en solución acuosa o como sales fundidas conducen la corriente eléctrica. Los electrolitos en solución, se dividen en iones de signo contrario, la carga de cada ion es igual a su valencia y el número total de cargas positivas y negativas en la solución son iguales. En

los compuestos iónicos los iones existen en todo momento, aun en estado sólido, por eso, cuando se funden los cristales iónicos, los iones también quedan libres para conducir la corriente.

Cuando existe una diferencia de potencial eléctrico, los cationes positivos se mueven hacia el cátodo (electrodo negativo) y los aniones negativos hacia el ánodo (electrodo positivo) Al llegar a los electrodos los iones reaccionan cediendo electrones (los aniones) o ganándolos (los cationes) para de esta manera conducir la electricidad.

2.2.1 pH de la solución electrolítica

El pH de la solución electrolítica influye en muchos factores importantes del proceso para llevar a cabo satisfactoriamente la operación de un recubrimiento electrolítico, (Álzate, 2009).

Influye en el potencial de descarga de hidrógeno y determina si las inclusiones básicas se precipitarán. Controla la composición del complejo que contiene el metal de depósito, la adsorción de agentes de adición y las eficiencias del cátodo y el ánodo. La mayoría de estos factores son impredecibles, y el mejor rango de pH debe determinarse experimentalmente. Se sabe que el pH afecta el esfuerzo y la dureza de algunos depósitos y este efecto es probablemente un resultado indirecto de las inclusiones en el depósito. El pH puede ser un factor en el equilibrio entre los diversos complejos posibles, por ejemplo. En los baños de cianuro de zinc que están presentes iones de hidroxozincato y cianozincato, y el equilibrio entre los dos dependen el pH.

El pH influye y se ve influido por la eficacia de la disolución o deposición del metal en los electrodos. En los ánodos insolubles, el baño se agota en metal, que debe reemplazarse químicamente, y también se vuelve más ácido (pH más bajo) porque la reacción del ánodo es generalmente el ácido, (Álzate, 2009).

El resultado ácido (protón de hidrógeno) puede neutralizarse y el baño puede reponerse simultáneamente si se dispone de un compuesto metálico que sea soluble al pH del baño y no agregue al mismo tiempo aniones no deseados.

La misma situación existe si los ánodos se están disolviendo a menos del 100 por ciento, donde la eficiencia dependerá también de la agitación de la solución, pero en menor grado.

2.2.2 Disociación iónica y concentración iónica

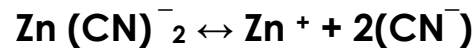
La disociación iónica tiene una relación directa con la electrodeposición, ya que la conductividad de una solución depende de la concentración de iones presentes. El grado de ionización se incrementa con una mayor dilución y manteniendo inactivas las moléculas no disociadas.

Los iones pueden constituirse en átomos como en el caso del Zn (Zn^{2+}) o como radicales en el caso del cianuro (CN^-). Estos iones transportan una pequeña carga eléctrica. Los radicales están cargados negativamente o dicho de otra forma, cargan uno o varios electrones de más, (Huaman, 2012).

La concentración real de un ion determinado es función de un sinnúmero de factores, tales como la concentración molar, el grado de ionización, la temperatura, la presencia de sales con un ion común y la formación de complejos químicos. Si formamos un complejo del ion considerado, conseguiremos un mayor efecto en dos fases. Por ejemplo, si el ion Zn^{2+} se encuentra en estado de cianuro doble ($Zn(CN)_2$), el resultado será la unión del cianuro alcalino con el del zinc y la ionización del mismo, (Calderón, 2005).



Posteriormente el ion complejo se disocia dando iones de zinc, aunque en cantidad pequeña:



La concentración del ion metálico baja como resultado de la ionización secundaria, pero el ion complejo de la primaria sirve como un proveedor de iones de Zn^{+} , que suministra a medida que estos quedan enlazados en la red cristalina. Los baños formados por cianuros dobles son útiles para la galvanotecnia del cobre, plata, cadmio, zinc y latón. Otros complejos son igualmente utilizados para la preparación de baños. La reducción de la concentración iónica por dilución del baño no tiene ningún efecto beneficioso, debido a que se reducen los iones presentes. Además, al paso de la corriente la concentración baja en la proximidad del cátodo, por lo que el potencial catódico se elevara demasiado y los depósitos resultantes serán esponjosos o "quemados".

2.2.3 Densidad de corriente

La corriente total que fluye a través de la celda permite el cálculo del producto bruto, pero en la galvanoplastia no nos interesa tanto el peso total del metal depositado. Pero sí su espesor. Tanto el espesor promedio como la distribución del depósito en el cátodo. El espesor promedio dependerá tanto de la cantidad total de metal depositado como del área sobre la cual se extiende el depósito. Su distribución dependerá de cuál uniformemente sea el depósito que cubra el cátodo. Por lo tanto, es importante en la galvanoplastia considerar la variable llamada densidad de corriente, definida como corriente en amperios por unidad de área del electrodo. Las unidades usuales para este factor son: A/m^2 , A / dm^2 y A/in^2 .

La densidad de corriente es una variable muy importante en todas las operaciones de galvanoplastia. El carácter del depósito, su distribución, la eficiencia de la corriente y, quizás, incluso si un depósito se forma puede depender de la densidad de corriente empleada en el cátodo. Sin embargo, la densidad de corriente del ánodo también es importante. Aunque la densidad de corriente se ha definido como la corriente por unidad de área, generalmente no conocemos el área real de un electrodo a menos

que sea perfectamente liso y se pueda medir geoméricamente. Para la mayoría de las situaciones, es suficiente equiparar el área aparente al área real. Las excepciones incluyen algunas consideraciones teóricas y situaciones en las que el electrodo es tan áspero que la diferencia es altamente significativa, (Safranek, 1974).

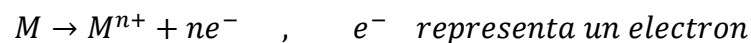
2.2.4 Distribución de corriente

La corriente dividida por el área aparente arroja una cifra promedio. Excepto por las geometrías más simples de una celda, como cuando el ánodo y el cátodo están en concordancia, la corriente no es uniforme sobre la superficie de un electrodo. De hecho, la forma en que la corriente se distribuye sobre sí misma y la superficie de los electrodos es bastante complicada. Generalmente para ser calculada simplemente a partir de la geometría, tenderá a concentrarse en los bordes y puntos. Y a menos que la resistencia de la solución sea extremadamente baja, fluirá más fácilmente a partes cercanas al electrodo opuesto que a partes más distantes. Por lo tanto, a excepción de las partes más simples sujetas a galvanoplastia, el espesor del depósito depende de la densidad de corriente y no será uniforme en la superficie como se desea.

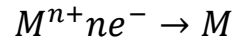
Por lo tanto, la electrodeposición se esfuerza por colocar los cátodos a fin de disminuir la diferencia entre las áreas de alta y baja densidad de corriente, diseñando partes más dóciles para un recubrimiento uniforme. Se puede definir como la mejora en la distribución del metal en un aspecto que se esperaría de una consideración puramente geométrica, (Langford, 2017).

2.2.5 Potencial de electrodo

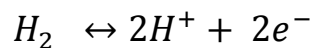
Cuando un electrodo metálico se sumerge en una solución que contiene iones de ese metal, se establece un equilibrio entre la tendencia del metal a ingresar a la solución como iones



Y la tendencia opuesta de los iones a perder su carga y depositarse en, el metal



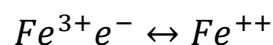
En ausencia de un voltaje externo éste intercambio es dinámico. Inicialmente, una de estas reacciones puede ocurrir más rápidamente que la otra, pero esto aumentará la calificación de la reacción de reserva y dará como resultado un equilibrio. Los iones metálicos entrarán en solución a la misma velocidad en que se descargan los iones. Esto ocurrirá mucho antes de que se pueda detectar cualquier cambio de concentración mediante análisis. Pero antes de que se establezca este equilibrio, se producirá una separación de carga si la ionización es inicialmente más rápida y el metal se cargará negativamente con respecto a la solución, (Santillán, 2013). Si la deposición es más rápida, el metal se cargará positivamente con respecto a la solución. El potencial resultante entre el metal y la solución se llama potencial del electrodo-Tal potencial puede establecerse en sistemas distintos a los que involucran metales. Por ejemplo, si los iones hidrogeno, el potencial depende del equilibrio:



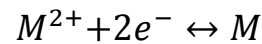
Este potencial (el electrodo de hidrógeno) es el punto de referencia desde el cual se miden otros. Se establece un potencial similar entre el gas oxígeno y una solución de iones hidroxilo:



Y si un metal puede existir en dos formas iónicas diferentes, como hierro (III) y hierro (II), el equilibrio es:



La ecuación anterior describe lo que se conoce como potencial redox (oxidación-reducción u ORP), aunque no hay diferencia fundamental entre las demás reacciones:



También es una reducción de la oxidación. La magnitud del potencial entre un metal y una solución de sus iones está dada por la ecuación siguiente ecuación.

$$E_x = \frac{RT}{zF} n l \frac{[X]_2}{[X]_1}$$

Donde:

E = Diferencia de potencial en el equilibrio

R= constante de los gases

T= temperatura

Z= carga eléctrica del ion considerado

F= constante de Faraday

X₁ y X₂ = concentraciones iónicas

2.2.6 Relación del potencial

Una cantidad dada de electricidad produce una cantidad definida y al menos teóricamente predecible de cambios químicos. Esta corriente, a su vez, es conducida a través del medio conductor, electrolítico o metálico y por diferencia de potencial o voltaje. El voltaje necesario para forzar una corriente dada a través de un conductor viene dado por la ley de Ohm, (Durst, 2017).

Donde E = voltios, I = amperios, y R = ohm.

Dado que las resistencias electrolíticas son generalmente mucho mayores que las resistencias metálicas. Las resistencias de una solución de cloruro de sodio al 1 por ciento son aproximadamente 50 millones de veces más que una sección igual de cobre, al

considerar procesos electrolíticos. Generalmente podemos descuidar la resistencia de las partes metálicas del circuito y mantener atención focalizada solo en el sistema electrolítico. Según Apez (2010), En otras palabras, dado el cobre o un conductor similar (barras colectoras) de capacidad suficiente para la parte externa del circuito. Nuestra única preocupación serán las relaciones de voltaje-corriente en el propio electrolito y en las interfaces entre él y los dos electrodos

Sin embargo, la relación potencial con el electrolito y las interfaces electrolito-electrodo no es tan directa como las sobretensiones,

2.3 PROCESO ELECTROLÍTICO DE LATONADO

2.3.1 Soluciones electrolíticas para el proceso de latonado

El proceso galvánico de latonado corresponden a uno de los más importantes recubrimientos de las aleaciones metálicas. Los potenciales de depósito en solución de los iones más simples del cobre y zinc están demasiado lejanos para permitir un recubrimiento satisfactorio. Los potenciales normales del cobre y zinc. Reportan, (Cottrell, 2002; Calderón, 2005), son respectivamente -0.33 V y -0.763 V , una diferencia de un poco más de un volt. Sin embargo, los potenciales para el depósito de estos metales cuando se usan algunos complejos como en las soluciones de cianuro, son mucho más cercanos para que ocurra un recubrimiento satisfactorio. Por lo que, los baños de latón consisten básicamente en soluciones de cianuros de cobre y cianuros de zinc, donde el cobre y el zinc están presentes en el baño en forma de algunos complejos cianurados: $\text{Na}_2\text{Cu}(\text{CN})_3$ y $\text{Na}_2\text{Zn}(\text{CN})_4$.

El contenido de cianuro libre en un baño de latón se define con base en la composición de los complejos de cobre y de zinc presentes. Un pequeño contenido de cianuro libre es necesario para evitar la precipitación de cianuros insolubles de cobre y zinc y ayuda en la corrosión de los ánodos. Un gran exceso de cianuro libre causa una reducción en la eficiencia de la corriente catódica.

2.3.2 Agitación de la solución

Generalmente no se puede describir el grado de agitación que una solución electrolítica requiere de manera absoluta, más bien, el grado de agitación de una solución o es adecuado o es inadecuado. Pero adecuado solo puede ser interpretado de acuerdo a las necesidades del proceso, (Calderón, 2005; y CIU, 2005). Lo que se busca en un sistema de agitación es que el proceso asegure la uniformidad general de la solución y que a su vez provea la suficiente turbulencia para prevenir el agotamiento excesivo de los iones o la acumulación de gas en las superficies anódicas y catódicas.

2.3.3 Efecto de la temperatura

La temperatura hace más conductoras las soluciones y permite emplear una densidad de corriente superior a la ordinaria, y esta es la razón de que, en caliente, se originen depósitos de granos más finos, a pesar de que un aumento de temperatura origina cristales mayores; la densidad de corriente, contrarresta el efecto de la temperatura. No obstante, con la temperatura aumenta en general, la disociación de las sales, disminuye la viscosidad de las soluciones y aumenta a la vez la conductividad de la película líquida junto al cátodo. Además, la temperatura permite más fácilmente eliminar los gases en el cátodo disminuyendo su absorción que produciría depósitos frágiles con tendencia a desquebrajarse como sucede con el hierro, níquel y cobalto, (Físico, 2006).

2.4 LEY DE FARADAY

En 1834, Faraday determinó las relaciones cuantitativas entre la cantidad de corriente eléctrica que se usa y la masa de las sustancias producidas por las reacciones de oxidación y reducción provocadas por la corriente eléctrica. La conclusión a la que llegó

Faraday se la conoce como la ley de la electrolisis o ley de Faraday, (Calderón, 2005) y (Bard, 1980).

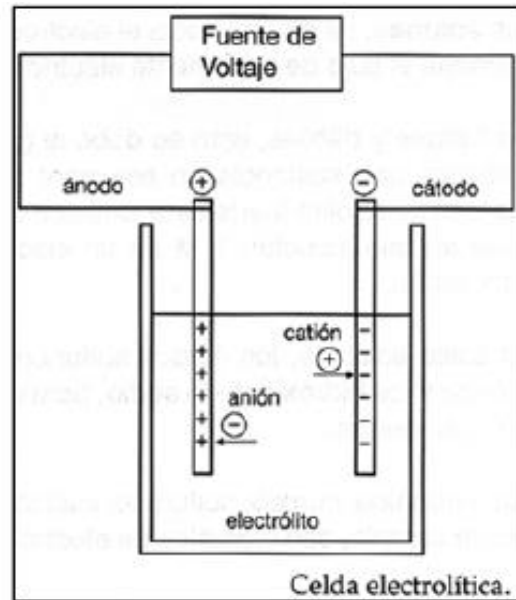


Figura 1 Fuente: <http://celdaelectrolitica.blogspot.com/>

La masa de un elemento depositado en una celda electroquímica depende de la cantidad total de electricidad que circule por ella y es proporcional a esta:

$$M = e_q * C$$

Donde:

E_q = es una constante para cada elemento conocida como equivalente electroquímico (tabla 2) y representa la masa del elemento depositado por unidad de electricidad, o masa depositada por el paso de un coulomb. El equivalente electroquímico de una sustancia es la masa de la misma sustancia en (g/A*h) que se deposita sobre la superficie del metal durante el proceso.

C = es la cantidad de electricidad en coulombs. (A*h)

m = masa teórica de electrodeposición.

Tabla 1. Tabla Equivalente electroquímico de los metales, (Armendáriz, 2009).

Equivalenti elettrochimiei.								
Elemento	Simbolo	Peso atomico (A)	Peso specifico (d)	Valenza (z)	Bagno galvanico	Equivalente elettrochimico in g/Ah		Rendimento di corrente (%) riferito al bagno
						teorico (Eq)	pratico (eq)	
Antimonio	Sb	121,75	6,7	5	Bagno di solfoantimoniato	0,909		
				3		1,514		
Argento ..	Ag	107,87	10,5	1	Tutti i bagni di argento	4,025	3,99	0,99
Arsenico .	As	74,92	5,7	5	Bagni di arsenico comuni	0,932	0,84	0,90
				3		1,993		
Cadmio ..	Cd	112,40	8,6	2	Bagni acidi e al cianuro	2,097	2,00	0,95
Cobalto...	Co	58,933	8,5	2	Bagni di cobalto	1,100	0,99	0,90
Cromo....	Cr	51,996	6,5	6	Bagni acidi di cromo	0,323	0,032	~0,10
				3	(Soluzione di sale cromico)	0,647		~0,10
Ferro	Fe	55,84	7,8	3		0,694		
				2	Bagno di acciaiatura	1,042	0,7-1,0	0,70-0,98
Idrogeno .	H	1,0079		1		0,03762		
Nichel ...	Ni	58,71	8,8	2	Bagni di nichel	1,095	1,04	0,95
Oro	Au	196,96	19,5	3	Bagni al ferrocianuro	2,452	2,20	0,90
				1	Bagni al cianuro	7,357	4,75	0,65
Ossigeno .	O	16,00		2		0,2985		
Palladio ..	Pd	106,4	11,5	4	Bagno al cloruro di palladio ...	0,995		
				2	Bagno al cloruro di ammonio e Pd	1,990	0,766	0,38
Piombo...	Pb	207,19	11,34	2	Bagni di piombo	3,865	3,865	1
				4		1,932		
Platino ..	Pt	195,09	21,4	4	Bagno al cloruro di platino	1,821	0,139	0,077
Rame	Cu	63,54	8,9	2	Bagni acidi	1,186	1,186	1
				1	Bagni al cianuro	2,372	1,780	0,75

Si la corriente es de intensidad constante, se tiene la ley de Faraday que expresa matemáticamente con la siguiente relación:

$$C = i * t$$

Donde:

t= es el tiempo en horas.

i= se mide en amperios (A).

Para obtener el rendimiento del baño donde la cantidad de metal depositado en gramos es menor o inferior a la masa teórica.

Para realizar el cálculo del rendimiento o eficiencia del baño, podemos determinar el valor de la masa real y el valor de la masa teórica, utilizando las leyes de Faraday que describen la electrolisis. Donde el cambio químico producido en la electrolisis y es proporcional a la carga de electricidad que pasa por la celda.

La carga requerida para depositar o liberar una masa se precisan 96500 coulombs.

$$m = \frac{(PM * i * t)}{nF}$$

Donde:

Q = carga eléctrica total que paso por la solución en coulombs C.

F= constante de Faraday 96500 C/mol.

n= número de electrones transferidos.

m= a la masa de la sustancia producida en el electrodo g.

PM = peso atómico del metal g/mol.

Cuando se sumerge un metal en una solución que contiene sales de este mismo metal, se establece una diferencia de potencial conocida como "potencial de solución" del metal, el mismo que al ser medido con respecto al potencial de hidrogeno (Potencial de Referencia), nos da un valor de 0. Los diferentes potenciales de los metales utilizados en los recubrimientos pueden ser verificados en de la Tabla 3, donde muestra los potenciales normales o estándar, comúnmente denominado serie electroquímica o serie electromotriz, (Sard , 1957).

Se puede comprobar que, el potencial de los electrodos varía a medida que avanza la electrolisis, ya que el potencial del ánodo se vuelve más positivo, y el cátodo se vuelve más negativo, (Leidheiser, 1975). Estos cambios se deben a la polarización de los electrodos, es decir, en el ánodo se disuelven iones metálicos, haciendo a la solución más concentrada en sus proximidades. Por el contrario, en el cátodo los iones se depositan en el baño electrolítico, provocando que la solución pierda concentración.

Este fenómeno produce un aumento en la diferencia de potencial aplicada a los electrodos con el generador de corriente. Dicho aumento en la diferencia de potencial se denomina fuerza electromotriz de polarización.

Tabla 2 Tabla de potencial de hidrogeno (Potencial de Referencia)

	$Li^+ + e^- \rightleftharpoons Li$	-3,05	
	$K^+ + e^- \rightleftharpoons K$	-2,93	
	$Ca^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Ca$	-2,87	
	$Na^+ + e^- \rightleftharpoons Na$	-2,71	
	$Mg^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Mg$	-2,37	
	$Al^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons Al$	-1,66	
	$2H_2O + 2e^- \rightleftharpoons H_2 + OH^-$	-0,83	
	$Zn^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Zn$	-0,76	
	$Cr^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons Cr$	-0,74	
	$Fe^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Fe$	-0,44	R
O	$Ni^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Ni$	-0,25	E
X	$Sn^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Sn$	-0,14	D
I	$Pb^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Pb$	-0,13	U
D	$2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2$	0	C
A	$CrO_4 + 4H_2O + 3e^- \rightleftharpoons Cr(OH)_3 + 5OH^-$	+0,13	T
N	$Cu^{2+} + e^- \rightleftharpoons Cu^+$	+0,15	O
T	$SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- \rightleftharpoons SO_2 + 2H_2O$	+0,20	R
E	$Cu^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Cu$	+0,34	E
S	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightleftharpoons 4 OH^-$	+0,40	S
	$I_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2 I^-$	+0,54	
	$MnO_4^- + 2H_2O + 3e^- \rightleftharpoons MnO_2 + 4 OH^-$	+0,59	
	$O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2O_2$	+0,68	
	$Fe^{3+} + e^- \rightleftharpoons Fe^{2+}$	+0,77	
	$Ag^+ + e^- \rightleftharpoons Ag_{(s)}$	+0,80	
	$NO_3^- + 2H^+ + e^- \rightleftharpoons NO_2 + H_2O$	+0,80	
	$NO_3^- + 4H^+ + 3e^- \rightleftharpoons NO + 2H_2O$	+0,96	
	$Br_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Br^-$	+1,09	
	$2IO_3^- + 12H^+ + 10e^- \rightleftharpoons I_2 + 6H_2O$	+1,20	
	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2H_2O$	+1,23	
	$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7H_2O$	+1,33	
	$Cl_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Cl^-$	+1,36	
	$ClO_3^- + 6H^+ + 6e^- \rightleftharpoons Cl^- + 3H_2O$	+1,45	
	$Au^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons Au$	+1,50	
	$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$	+1,51	
	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons 2H_2O$	+1,78	
	$F_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2F^-$	+2,87	

La corriente que circula en el baño electrolítico, se expresa con la siguiente relación

$$i = \frac{V - V'}{R}$$

Donde:

i = Corriente

V = diferencia de potencial aplicada a los electrodos.

V' = Fuerza contra electromotriz de polarización.

R = Resistencia que presenta el Baño

Para realizar los cálculos es de gran importancia la densidad en amperes o densidad de corriente. La cual podemos obtener con la fórmula:

$$D = \frac{i}{S}$$

Donde:

S = área de la superficie total a recubrir de la pieza.

D = Densidad de corriente dada en A/dm²

La intensidad de corriente (i), está dada en amperios y es un factor importante para poder obtener los espesores deseados, para lograr los valores de corriente óptimos, en el proceso a utilizar:

$$i = \frac{*d * s * 10}{Eq * t * n}$$

Donde:

d = Peso específico del depósito.

t = tiempo en minutos.

i = Corriente, se mide en (A).

2.5 INVESTIGACIONES MÁS RECIENTES

Hurtado (2014). Menciona los beneficios de implementar los procesos de depósitos a nivel escala en una planta piloto de galvanoplastia, que permita contar con una operación segura, cómoda, eficiente en monitoreo de variables. Como el nivel de soluciones de depósitos, la temperatura de las soluciones a utilizar, alguna condición de operación no establecida y la intención de utilizar la automatización para hacer más fácil el proceso de galvanoplastia de la planta, reduciendo los tiempos de operación. Para esto se elegirá el equipo adecuado a las necesidades de trabajo que exige el proceso, implicando gastos económicos que se justifican con la mejora de la operación, una manera dinámica de estudiar y ejecutar el proceso de galvanoplastia, aunado a ellos el cuidado y la integridad de los operarios. El estudiar el comportamiento de plantas industriales ya construidas, en donde la planta piloto es una réplica y estará sujeta a condiciones de operación previstas para la planta industrial. En este caso la planta piloto se le llama modelo y tiene como función principal mostrar los efectos de los cambios en las condiciones de operación de manera más rápida y económica que si se realizan en la planta original.

La finalidad de utilizar una planta piloto en la enseñanza, es llevar a cabo prácticas que ayuden a la interacción de los alumnos y profesores con el proceso. Las simulaciones de trabajo permiten desarrollar habilidades como la toma de decisiones, el manejo y la manipulación de variables, resolución de problemas, creatividad y la comprensión del proceso,

el tratar de integrar los conocimientos a veces resulta muy complicado en las ciencias experimentales. Sin embargo, la industria de la galvanotecnia nos brinda una gran oportunidad porque permite integrar los conocimientos de la electroquímica con los de la química analítica, mediante la utilización de instrumentos de variada sofisticación para evaluar los electrolitos en los baños de electrolisis, (Lagos, 2016). Determinaron utilizar sensores colorimétricos en una planta de galvanoplastia, para cuantificar el grado de electrodeposición del metal del electrolito coloreado en baños de níquel. El uso del sensor colorimétrico permite realizar un análisis cuantitativo de la cantidad exacta

desales de níquel, logrando así determinar el grado de agotamiento del electrolito. Concluyeron que, al entender el funcionamiento básico de un sensor, el estudiante se capacita para entender y aplicar configuraciones similares. En suma la practica propuesta por, (Lagos, 2016). Permite realizar posteriores ejercicios experimentales para obtener mayor número de datos y validar el uso de sensores en los procesos electrolíticos. Un sistema electrónico de medidas electroquímicas, basado en las técnicas del proceso y controlado por un software que monitorea a través de un circuito electrónico.

Caceres et al, (2014), determinaron que el uso de la química, la electrónica y el desarrollo de la tecnología informática han contribuido a la aparición de nuevos sensores, materiales e instrumentos de medición, que utilizan interesantes técnicas de control y monitoreo. Para la utilización de las diferentes técnicas electroquímicas, es indispensable contar con un sistema electrónico capaz de generar las señales de voltaje y aplicarlas a la celda electroquímica,

El control de los baños representa una gran área de oportunidad menciona (Rodríguez, 2015) es posible detectar que se gastan más los baños de lo que realmente se requiere, generando con esto costos de producción mayor a lo necesario, si bien se logran mejoras considerables en la industria, quedan muchos puntos que se pueden trabajar, como realizar pruebas periódicas para monitorear las soluciones, con el fin de evitar re trabajos de piezas resultado de problemas con la solución. Esto supone una gran área de estudio, en la cual se pueden trabajar diversos aspectos, destacando la reducción de contaminantes emitidos y el control químico de los procesos llevados a cabo. Los tratamientos de superficie son para mejorar ciertas propiedades en el material base, por ejemplo, la resistencia a la corrosión o la conductividad eléctrica. En general, estos tratamientos no afectan al conjunto de las propiedades mecánicas. Los tratamientos de superficies pueden aplicarse al final del proceso de los componentes y son, en todos los aspectos, procedimientos de acabado.

De esta forma, el gasto extra que supone fabricar aleaciones raras pueden eliminarse y dirigir la economía de modo más satisfactorio en el sentido deseado; por tanto, un metal o una aleación barata, como un acero de bajo carbono SAE 1018, puede emplearse

para que proporcione las propiedades metálicas al conjunto, mientras que aleaciones de cobre o estaño, puede emplearse para mejorar las propiedades. El modo de protección de un sustrato metálico por medio de un recubrimiento metálico depende de la naturaleza del par galvánico que hay entre ellos, es decir si el recubrimiento es electropositivo o electronegativo con respecto al metal base, el acero puede protegerse satisfactoriamente. Los recubrimientos metálicos se obtienen por una variedad de técnicas, muchas de las cuales se aplican también a los no metales, la electrodeposición está muy por encima de las demás aunque técnicas más sofisticadas se han desarrollado para unas finalidades específicas, en donde el costo o la calidad tienen más importancia que la propia cantidad.

CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

3.1 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

En la Figura 2, se muestra de manera esquemática la metodología seguida durante este trabajo.

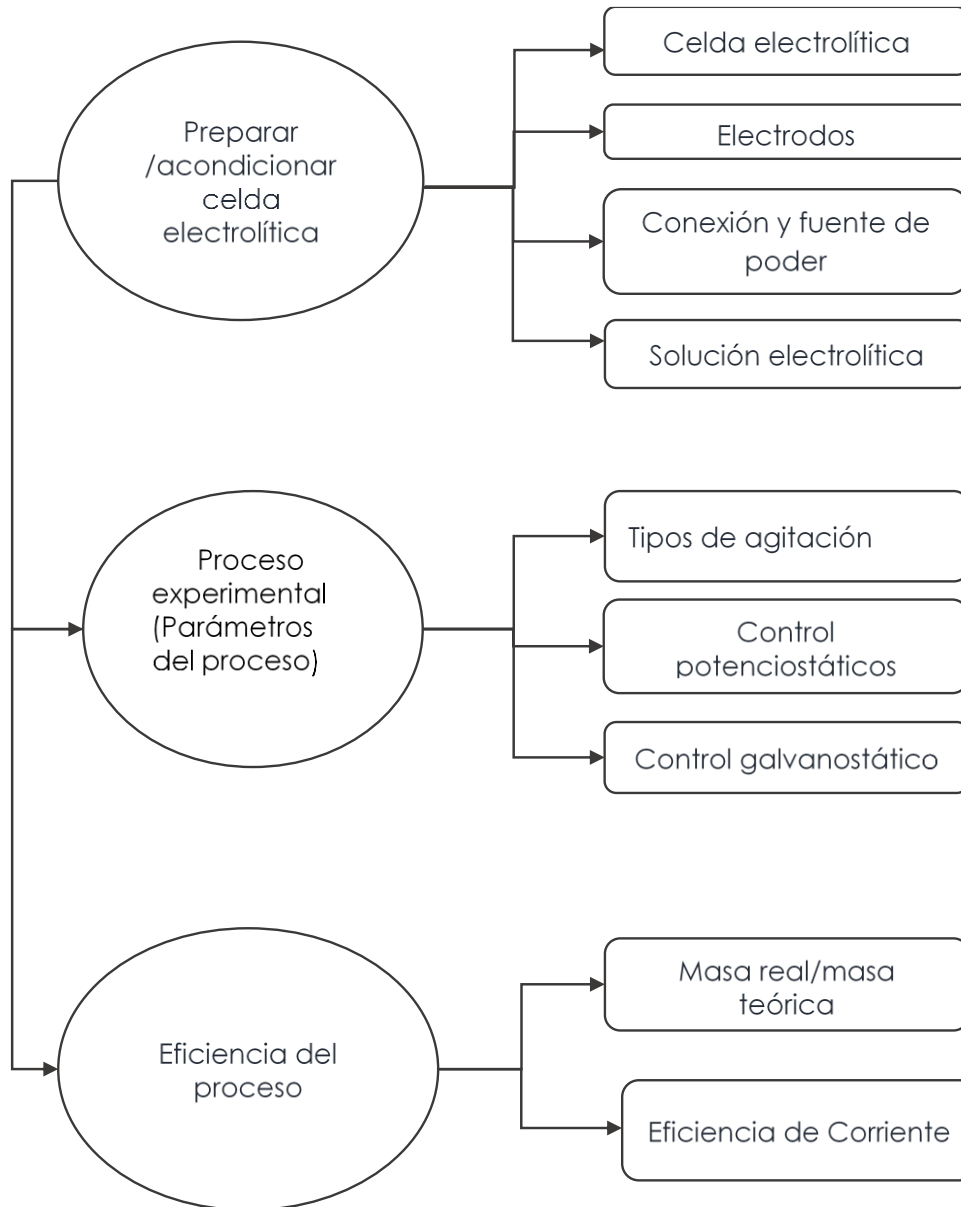


Figura 2 Diagrama de flujo de la metodología desarrollada.

3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.2.1 Celda electrolítica

La celda electrolítica consta de una cuba de nylamid con medidas 40 cm X 40 cm X 50 cm y una capacidad de 70 L (Fig. 3). El nylamid es un material con la característica de ser ligero, resistente al desgaste y a la corrosión (oxidación), a las reacciones químicas, a la temperatura, presenta cierta rigidez y es dieléctrico. La celda electrolítica consta de tres electrodos, dos ánodos conectados en serie y un cátodo conectado en paralelo, utilizando una conexión de tubo de cobre de ½ pulgada de diámetro.

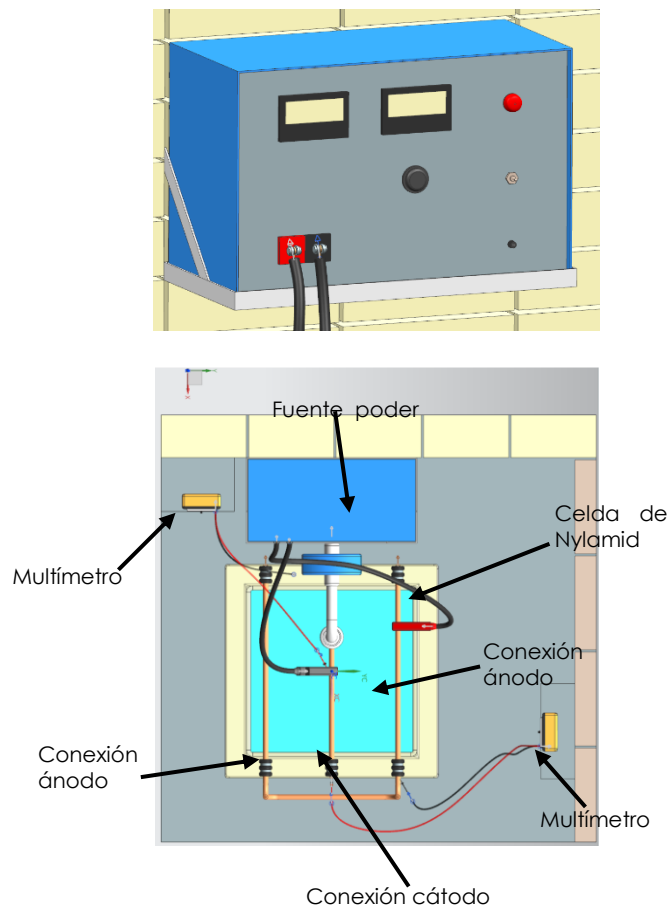


Figura 3. Esquema de la celda electrolítica y las conexiones del arreglo electroquímico.

Los dos ánodos constan de dos barras de latón 70/30, con 30 cm de largo y 2.5 cm ancho. El cátodo utilizado consiste en una lámina de acero inoxidable 304, de 16.5 cm X15 cm con 1 mm de espesor. La energía de la celda fue suministrada por una fuente poder con capacidad de 15 V y 50 A, mientras que para censar el valor del potencial y la corriente, se utilizaron dos multímetros conectados en el sistema.

3.2.2 Solución electrolítica

Las soluciones electrolíticas a base cianuros han sido ampliamente utilizadas para llevar a cabo recubrimientos metálicos, tanto para acabados decorativos como de ingeniería. Este tipo de soluciones se han utilizado para recubrir una amplia variedad de metales como sustrato, incluyendo al hierro, acero, aleaciones con una base inicial de cobre como aleaciones de magnesio o aleaciones de níquel. Una importante propiedad del cobre en los sistemas de soluciones electrolíticas basados en cianuros, es la habilidad para adherirse muy bien a las superficies metálicas. Este tipo de baños, a pesar de los peligros que representa en su manejo y en la operación en línea, aún sigue siendo en algunos casos una opción insustituible, (Calderón, 2005; Álzate, 2009),

Por lo tanto, es recomendable hacer la distinción entre el cianuro total y el cianuro libre durante el manejo de la química de estos baños. Para un proceso de latonado el cianuro de cobre y zinc es acomplejado, ya sea por el cianuro de sodio o el cianuro de potasio para formar compuestos soluble de cobre zinc en solución acuosa. Se considera que el principal complejo formado es el cianuro de cobre y sodio $K_2 Cu (CN)_3$ o el cianuro de cobre y potasio, $Na_2 Cu (CN)_3$ según sea el caso. La suma de lo que se requiere para el acomplejamiento del cianuro de cobre zinc más la cantidad del cianuro libre requerido para el propio funcionamiento del baño (cianuro libre) es el cianuro total.

El mantenimiento y control de la soluciones debe de realizarse periódicamente mediante un análisis de los resultados obtenidos mediante corregimiento de prueba con celda Hull.

Los ánodos para los baños deben de ser de una aleación de cobre de alta pureza para no contaminar las soluciones. Además, la relación de superficie ánodo-cátodo debe ser 1:1 como mínimo y 2:1 como máximo.

3.2.3 Agitación de la solución electrolítica

3.2.3.1 Agitación con flujo de aire

Otro factor importante que se consideró durante el recubrimiento electrolítico de la pieza fue la agitación de la solución electrolítica, (Huamán, 2012). En este trabajo de investigación se utilizaron tres formas diferentes de agitación: una agitación mediante un flujo de aire proporcionado por un compresor, mediante una conexión de tubo de PVC de 2 pulgadas de diámetro. Conectado de tal manera que la solución se agite mediante el burbujeo con aire, desde el fondo de la celda electrolítica y permitiendo de este modo el transporte de masa a los electrodos. La velocidad y control del burbujeo se realizó de manera manual disminuyendo la presión del flujo de aire mediante una válvula.

3.2.3.2 Agitación con propela

Se realiza mediante una propela de teflón, que se mueve por un motor caframo el cual permite variar la velocidad en rpm, comenzando con 400 rpm, disminuyendo las mismas hasta mejorar la calidad del electrodeposición. El motor caframo fue colocado a un costado de la celda electrolítica entre los dos electrodos de latón con el propósito para mantener o mejorar las condiciones hidrodinámicas adecuadas de transferencia de masa.

3.2.3.3 Agitación con propela y ondas de vibración

Posteriormente se realizó la combinación de la agitación de la solución electrolítica con una propela a 350 rpm y ondas de vibración suministradas por un equipo de ultrasonido (sonda de ultrasonido). La vibración ultrasónica se suministró durante un minuto en intervalos de cinco minutos.

3.3. PROCESO PREPARACIÓN DE LA PIEZA A RECUBRIR

En este estudio, para aplicar el recubrimiento electrolítico se utilizó una lámina de acero inoxidable 304. La superficie de la pieza se preparó en un primer paso realizando una limpieza con un desengrasante en polvo a base de hidróxido de sodio, retirando todo tipo de impurezas ajenas como grasas, polvo, y algunas otras impurezas contaminantes que afecten el proceso de depósito.

Posteriormente se realizó un enjuague con abundante agua de la llave y se continuó con un pulido manual utilizando lijas de grano fino (800, 1200 y 2000). El pulido se realizó con movimientos verticales en una sola dirección, bajo chorro de agua para lograr un acabado superficial liso y brillante. Este paso es de gran importancia antes de realizar el proceso de electrodeposición debido a que de ello depende la calidad de la adherencia del recubrimiento, posteriormente se realizó un enjuague con agua de la llave.

A continuación, se realiza un enjuague sencillo, que consistió en sumergir la pieza en agua desionizada con movimientos uniformes durante un minuto, se retiró la pieza del agua y se sacudió para retirar el agua uniformemente.

Para la preparación final de la pieza se aplicó un decapado utilizando una solución de ácido clorhídrico al 10% con agua desionizada, se sumergió la lámina durante 10 segundos con movimientos circulares sujetando la pieza con unas pinzas. Posteriormente se retiró la lámina y se realizó un enjuague en agua limpia desionizada durante dos

minutos para evitar que se contamine la solución electrolítica donde se llevará a cabo el electrodeposición.

3.3.1 Proceso de electrodeposición y parámetros del proceso

El recubrimiento electrolítico de la pieza se produce por inmersión en el baño de latón y es indispensable operar con una densidad de corriente controlada dentro de cierto límite, debido a que al incrementar la densidad de corriente da lugar al desprendimiento de hidrógeno que puede afectar la calidad del depósito, determinaron, (Graham, 1974; y Álzate, 2009). En este estudio se utilizó una celda electrolítica con una capacidad de 70 L. El electrodo que se utilizó como cátodo consistió de la lámina de acero inoxidable 304 (preparada previamente) que se colocó en medio de los ánodos (placas de latón). Los electrodos de la celda se conectaron mediante una conexión de cobre a una fuente de poder para imponer una corriente dentro de un intervalo cerrado, mismo que se controló por medio de un multímetro con una capacidad de corriente de 10 A. Esto permitió medir la variación de la corriente para controlarla de manera manual directamente en la fuente de poder. En cada experimento del proceso de deposición se trabajó con agitación continua durante 30 minutos, registrando el valor del potencial a una corriente impuesta, así como la calidad del depósito. Una vez concluido el tiempo del depósito se retira la lámina y se realiza un enjuague sencillo durante un minuto para retirar restos de la solución electrolítica.

3.3.2 Control potencioestáticos

Una vez determinadas las condiciones hidrodinámicas de transferencia de masa del electrolito, se realizaron varios experimentos para determinar el intervalo del potencial que evite la evolución de hidrógeno y oxígeno, así como determinar el rango donde se lleva a cabo solo el depósito Cu-Zn. En cada experimento se monitorea el valor de la corriente, visualizado este valor en el multímetro. Se realizaron una serie de experimentos hasta obtener un depósito homogéneo característico del latonado, para obtener así un valor del potencial idóneo para controlar el proceso.

Al variar el valor del potencial se pudo determinar el comportamiento de la corriente, así como el valor del potencial donde se deposita solo iones de cobre. Posteriormente se determinan los intervalos de potencial en los cuales se presenta un cambio significativo en las condiciones hidrodinámicas de la solución electrolítica. También se consideró la influencia de los métodos de agitación impuestos como las ondas de vibración antes mencionados y la agitación de la solución por medio de una propela, la cual impulsada por un motor caframo a 350 rpm.

3.3.3 Control galvanostatico

Una vez determinado el intervalo de potencial donde el depósito de latonado es más brillante y homogéneo, se realizó una serie de experimentos fijando el valor de la corriente obtenida en los experimentos anteriores. Variando de los intervalos de corriente mínima donde se presenta el depósito de Cu, hasta el valor más alto de la corriente que determina un depósito homogéneo y brillante, considerando el efecto del tipo de agitación.

Al mantener fijo el valor de la corriente se puede determinar el comportamiento de la variación del valor del potencial, así como el valor de la corriente donde se depositó solo iones Cu-Zn.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1 PREPARACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LA CELDA ELECTROLÍTICA

Para el estudio de los parámetros de la solución electrolítica de latonado se utilizó una celda de nylamid de 70 litros. De capacidad y un sistema de tres electrodos, dos lingotes de latón como ánodos y como electrodo de trabajo una lámina de acero inoxidable. La solución electrolítica es característica de los procesos industriales, la fuente de energía es estándar con capacidad de 15 V y 50 A, para censar en potencial y la corriente del proceso se utilizan dos multímetros digitales (figura 4).



Figura 4 Imagen de la celda electrolítica conectada a la fuente de poder y los multímetros para censa el potencial y la corriente.

4.2 PREPARACIÓN DE LA PIEZA A RECUBRIR

La apariencia y aceptación del recubrimiento electrolítico depende principalmente de una firme adherencia del depósito, lo cual se logra sobre una superficie completamente limpia libre de grasa, residuos o impurezas.

4.2.1 Limpieza e la pieza a recubrir

La presencia de grasa o residuos químicos sobre la pieza a recubrir evitan una buena adherencia del recubrimiento, lo cual disminuye la calidad. La limpieza de la pieza se realizó con un jabón a base de hidróxidos con la finalidad de obtener una superficie completamente limpia libre de grasa, residuos o impurezas (Fig. 5). Es importante eliminar residuos de grasa o impurezas sobre la superficie de la pieza antes del lijado, debido a que la limadura que surge con la acción del lijado se mezcla formando una aglomeración con partículas, lo que puede provocar ralladuras profundas sobre la superficie a recubrir.



Figura 5 Preparación de la pieza a recubrir: lavado inicial de la pieza con jabón a base de hidróxidos.

4.2.2 Pulido de la pieza

Después del desengrase y limpieza se realizó un enjuague con abundante agua de la llave y se continuó con pulido manual utilizando lijas de grano fino (800, 1200 y 2000) con movimientos verticales en una sola dirección (Fig.6). El lijado se lleva a cabo bajo chorro de agua para lograr un acabado superficial liso y brillante. Este paso es de gran importancia antes de realizar el proceso de electrodeposición debido a que de ello depende la calidad de la adherencia del recubrimiento. Posteriormente se realizó un enjuague con agua de la llave.

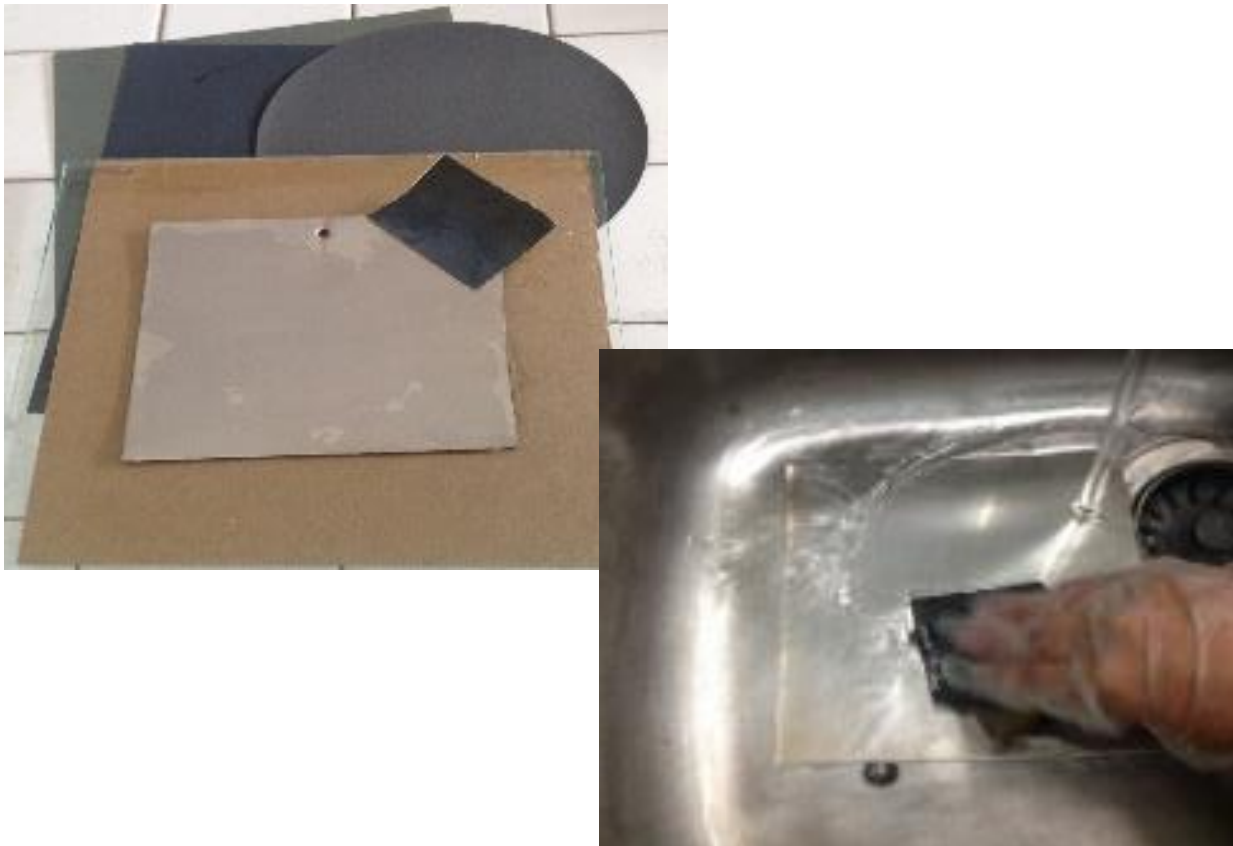


Figura 6 de la preparación de la pieza, pulido de la superficie bajo chorro de agua de una llave,

4.2.3 Desengrasante

Después del pulido de la pieza se procedió a lavar la pieza nuevamente con un jabón a base de hidróxidos para retirar los residuos del pulido así como la grasa que pudiese depositarse en la superficie de la lámina (Fig.7). Con la finalidad de retirar por completo algún restante sobre la superficie, esto es debido a que se observó que al no realizar una limpieza con jabón el depósito fue deficiente mostrando un color oscuro.



Figura 7 lavado de la pieza, después del pulido de la superficie bajo chorro del agua de la llave,

4.2.4 Decapado

Para asegurar una buena adherencia del depósito electrolítico, se aplicó un decapado químico, con la finalidad de retirar algún residuo de óxidos o alguna especie química que pueda estar adherida a la superficie de la pieza. Para llevar a cabo el decapado se utilizó una solución de ácido clorhídrico al 10%, sumergiendo la lámina durante 30 segundos y deslizándola de forma suave para eliminar por completo algún residuo presente en la superficie (Fig.8) Con este decapado se logra que la solución de ácido penetre en la rugosidad de la superficie de la lámina de acero inoxidable que servirá como cátodo, garantizando una buena adherencia. Cabe mencionar que después de 10 segundos deslizando la lámina en el ácido se forma una capa de color gris oscuro sobre la superficie debido al decapado.



Figura 8 decapado químico con una solución de ácido clorhídrico al 10%, por alrededor de 30 segundos.

4.2.4 Enjuague

Posteriormente la superficie de la pieza fue sumergida en agua desionizada para retirar el exceso de ácido (Fig.9). Finalmente se realizó un último enjuague con agua desionizada utilizando una pizeta para evitar que algún residuo de ácido contamine la solución electrolítica. Es importante mencionar que no se empleó fluxes para evitar la oxidación y estabilizar la superficie, debido a que la pieza preparada fue utilizada inmediatamente para llevar a cabo el electrodeposición. Sin embargo, a partir de este instante la pieza ya no debe ser tocada o manipulada directamente con las manos.



Figura 9 imagen del último enjuague con agua desionizada utilizando una pizeta

4.3 ELECTRODEPÓSITO Y TIPOS DE AGITACIÓN (PARÁMETROS DEL PROCESO)

Una vez realizada la limpieza y decapado de la pieza para obtener una superficie preparada para el recubrimiento electrolítico, la lámina de acero inoxidable 304 se coloca en la celda electrolítica y se sumerge en el baño electrolítico de latón conectando a la terminal negativa de la fuente poder (Fig. 4). Se instalaron 2 multímetros para sensor la corriente (multímetro 1) y el voltaje (multímetro 2), lo cual permite visualizar el comportamiento de ambas variables y controlar en la fuente de poder el flujo de la corriente.

Datos reportados en la literatura, (Cottrell, 2002). Indican que los potenciales normales del Cu y el Zn para su depósito se encuentran en 0.337 V y -0.763 V, respectivamente. Una diferencia de casi 1 voltio en el depósito entre ambos metales. Sin embargo, también se ha reportado que los potenciales de los electrodepositos de los metales son mucho más cercanos cuando se usan las soluciones de cianuro y puede ocurrir un codepósito satisfactorio, (Calderón, 2005). Durante la serie de experimentos preliminares en dicho intervalo de potenciales, se determinó que era más complicado controlar los potenciales y las corrientes en el sistema (celda electrolítica) dentro de un rango estable, además de que no se observó depósito alguno. Por lo tanto, se optó por controlar la corriente manteniendo valores de potencial dentro el rango recomendado. Por lo tanto, a través de una serie experimentos se determinó que a valores de corriente entre 0.33 A y 0.37 A, se observa un codepósito de Cu-Zn, mientras que por arriba de este rango (0.37 A) la evolución de hidrógeno comienza sobre el cátodo, interfiriendo en el depósito Cu-Zn.

Por el contrario, por debajo de este valor (0.33 A) se observa que solo se lleva a cabo el depósito del Cu. Sin embargo, también se observó que la corriente disminuía de manera importante con el paso del tiempo. Esto indicaba que la cantidad de depósito también era menor con el tiempo, atribuido a una disminución de la concentración de los iones en la interface del electrodo catódico. Debido a esto se decidió experimentar con algunos tipos de agitación que permitieran transportar los iones desde el ánodo hacia el

cátodo para reponer su concentración en la interface y así obtener un depósito más homogéneo.

4.3.1 Agitación con flujo de aire

La agitación de la solución produce suministro de iones metálicos a la interface del cátodo facilitando el depósito sobre la superficie, (Brett, 1993). Se utilizó primeramente una agitación regulando el flujo de aire dentro de la celda electrolítica durante el tiempo que duró el experimento de la deposición electrolítica, El experimento duró 30 minutos, logrando observar que se generaban demasiadas burbujas de aire sobre el ánodo y cátodo, generando un oscurecimiento de la superficie de los electrodos y obteniendo un depósito deficiente (Fig. 10a y 10b, respectivamente). Además, se observó que la corriente disminuye drásticamente con el paso del tiempo (ver gráfica de la Fig. 11). Mientras el potencial presenta un comportamiento más catódico debido a la modificación de la superficie durante el depósito (ver gráfica de la Fig. 12), lo que afectó en la calidad del depósito obtenido (ver Fig. 10b). De acuerdo a esto, se determinó que las moléculas de oxígeno proporcionadas por las burbujas de aire generan oxidación de la superficie de los ánodos que provocan su pasivación. Este hecho evita que la concentración de iones en la superficie del cátodo se reestablezca para seguir llevando a cabo el depósito. Se intentó disminuir la intensidad del flujo de aire, lo que disminuyó la agitación, y esto dio como resultado que la migración de átomos de Zn fuera más lenta, al observarse solo un depósito no homogéneo de Cu.

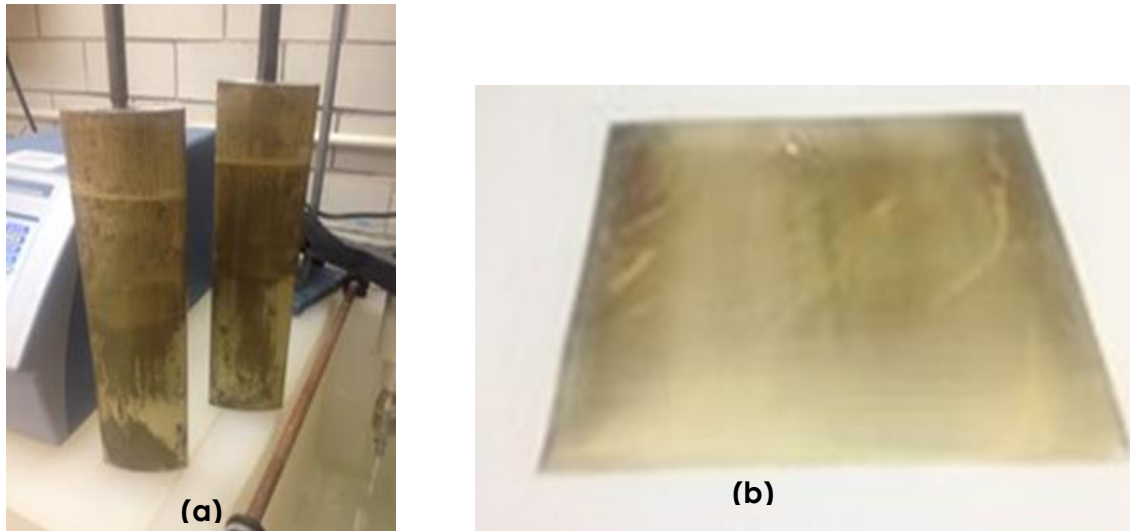


Figura 10. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de depositación electrolítica, aplicando agitación con flujo de aire.

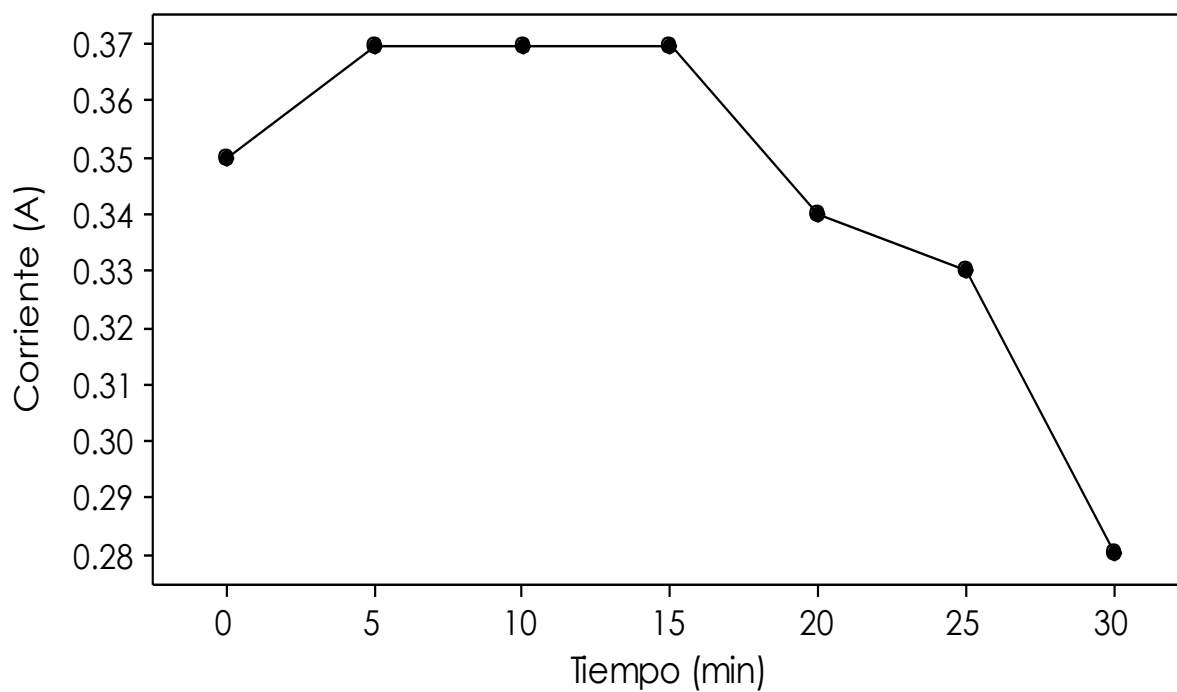


Figura 11. Gráfica de la variación de la corriente durante el tiempo del electrodepósito, aplicando agitación con flujo de aire a una corriente fija de 0.35A.

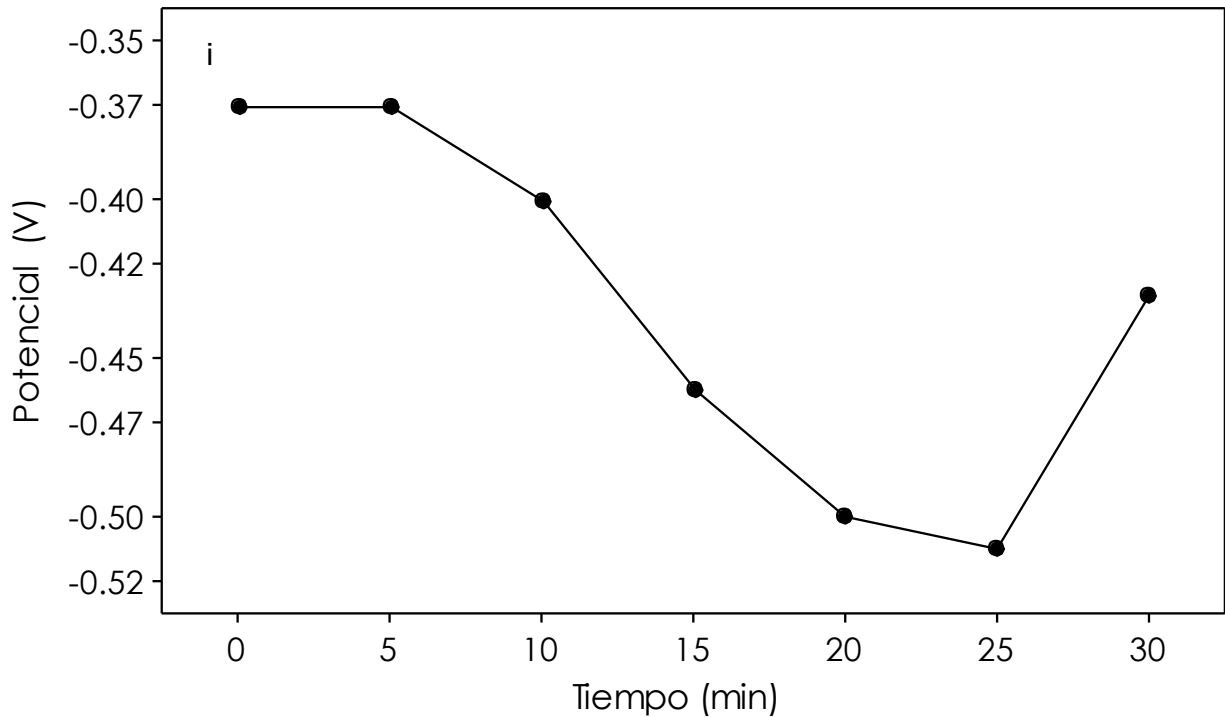


Figura 12. Gráfica de la variación del potencial, durante el tiempo del electrodepósito, aplicando agitación con flujo de aire

4.3.2 Agitación con propela

Debido a los inconvenientes observados en el primer caso, se procedió a realiza agitación con una propela que giraba a 350 rpm, aplicando un intervalo de corriente de 0.33 A a 0.37 A, durante 30 minutos. Se observó que aunque el potencial se hace más catódico (ver gráfica de la Fig. 13), su comportamiento es un poco más estable en un intervalo más cerrado que para la agitación con flujo aire. Mientras que la corriente se mantiene estable hasta el minuto 15 y después aumenta catodicamente (ver gráfica de la Fig. 14). Este incremento en la corriente generó un desprendimiento de hidrógeno en la superficie del cátodo, mientras que en el ánodo se generó la evolución de oxígeno ocasionando que las superficies de los ánodos se obscurecieran y pasivaran nuevamente (ver Fig. 15a), afectando la calidad del depósito (ver Fig. 15b). Aunque visiblemente el depósito se presenta un poco más homogéneo todavía es deficiente,

esto debido a que también comenzó a llevarse a cabo la pasivación de los ánodos y de la evolución de hidrógeno.

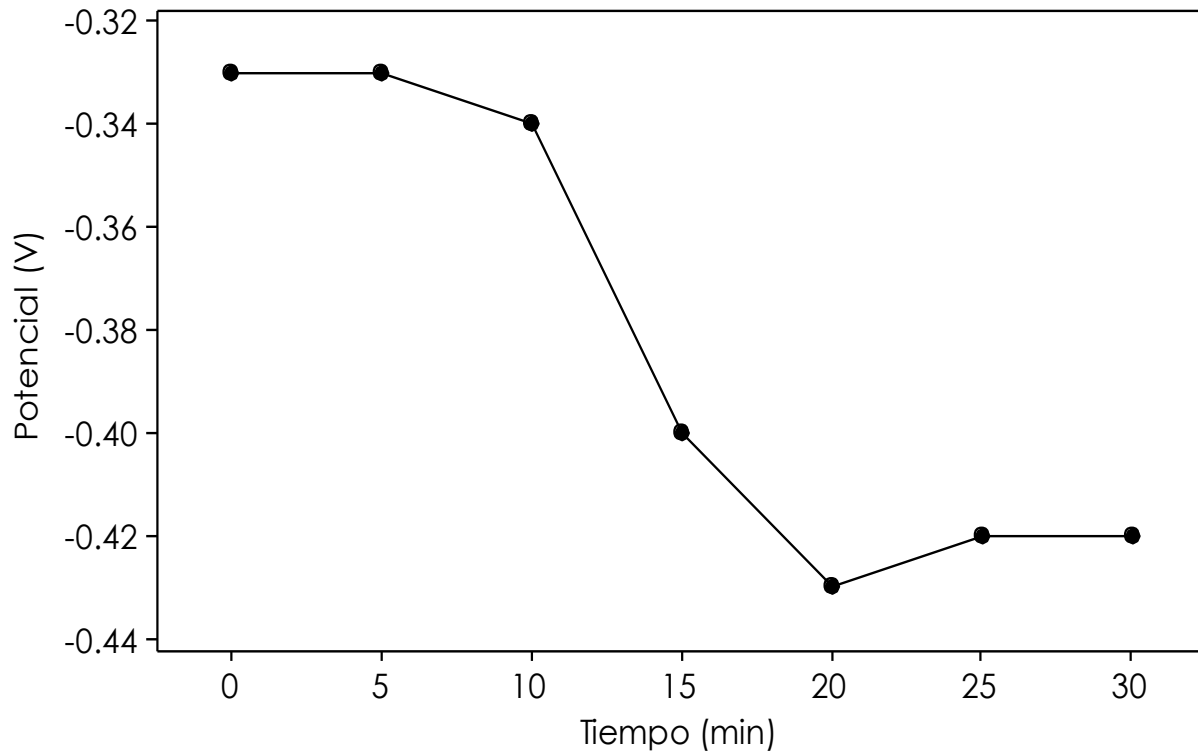


Figura 13 Gráfica de la variación del potencial, durante el tiempo del electrodeposición, aplicando agitación con propela a 350 rpm.

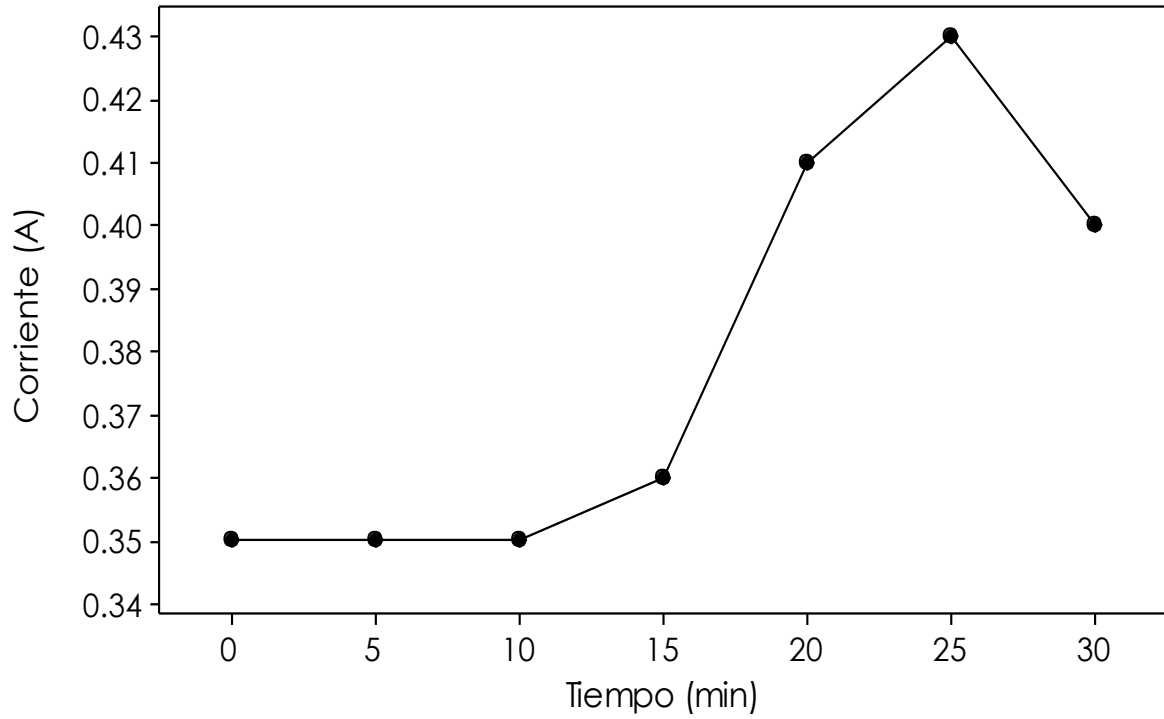


Figura 14. Gráfica de la variación de la corriente, durante el tiempo del electrodeposición, aplicando agitación con propela a 350 rpm.

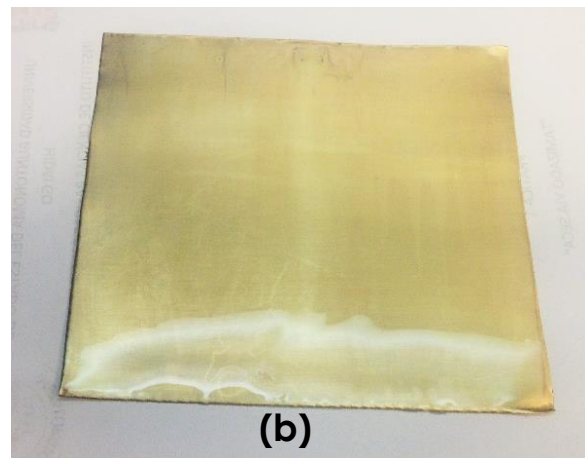


Figura 15. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, aplicando agitación con propela a 350 rpm.

4.3.3 Agitación con propela y ondas de vibración

Por último, se aplicó ondas de vibración al electrolito durante un minuto en intervalos de 5 minutos, con la finalidad de promover una mejor difusión de los iones de Cu^{2+} y Zn^{2+} hacia el cátodo. Cabe mencionar que la agitación de la solución con la propela a 350 rpm se mantuvo durante los 30 minutos que duró el experimento. Los resultados mostraron que el potencial comienza a hacerse más catódico, manteniéndose en un intervalo entre aproximadamente -0.3 V a -0.42 V (ver gráfica de la Fig. 16). Mientras que la corriente presentó un comportamiento más constante dentro de un intervalo de 0.33 a 0.37 A durante todo el tiempo que duró el experimento (ver gráfica de la Fig. 17). Además, cabe mencionar que no se observó el desprendimiento de hidrógeno sobre la superficie del cátodo (pieza a recubrir) o de oxígeno en los cátodos.

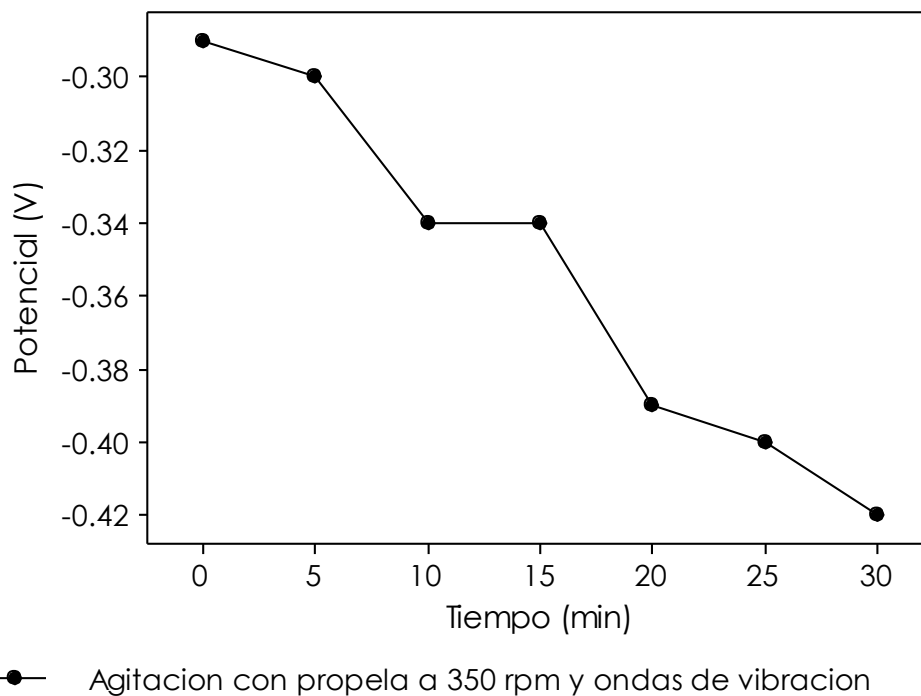


Figura 16. Gráfica de la variación del potencial, durante el tiempo del electrodeposición, aplicando agitación con propela a 350 rpm y ondas de vibración.

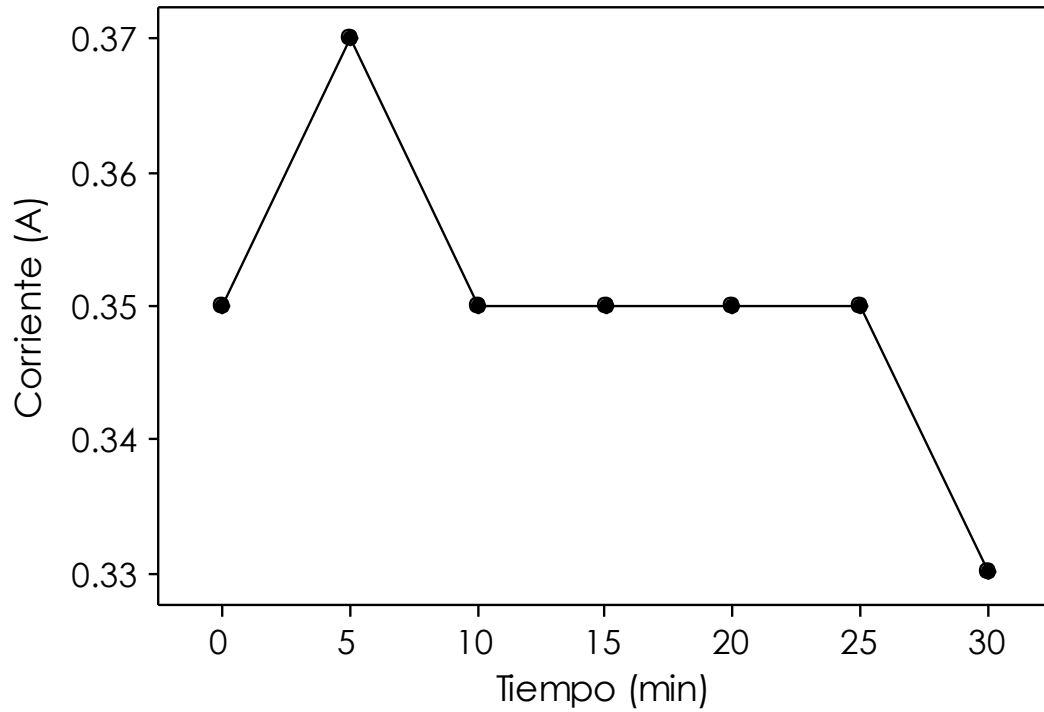


Figura 17. Gráfica de la variación de la corriente, durante el tiempo del electrodepósito, aplicando agitación con propela a 350 rpm y ondas de vibración.

Los resultados muestran que en este caso los ánodos no presentan oxidación, al no observarse un obscurecimiento de la superficie (ver Fig. 18a), lo cual mejoró visiblemente la calidad del depósito (ver Fig. 18b).

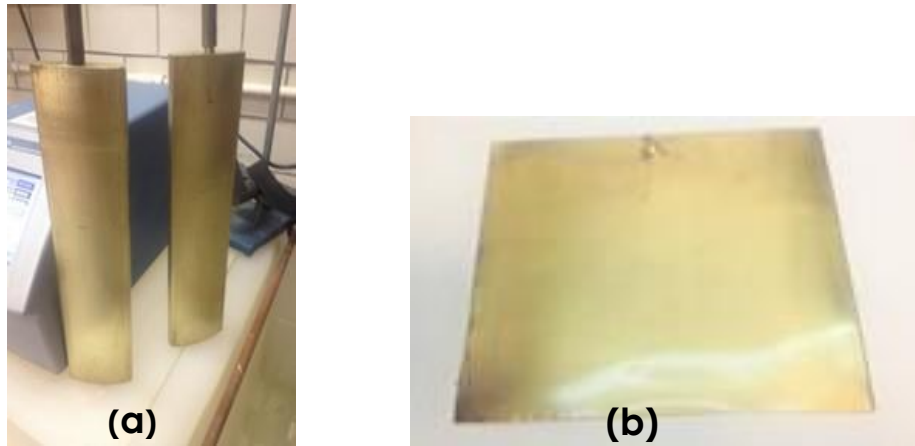


Figura 18. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, aplicando agitación con propela a 350 rpm y ondas vibración.

4.3.4 Interacción de corriente y potencial

Es importante mencionar que durante los experimentos desarrollados se optó por imponer corriente para tener un mejor control del potencial, debido a que cuando se impone potencial existe una mayor variación de la corriente. Además, los resultados permitieron determinar que la corriente debe ser controlada dentro de un valor de 0.35 A a 0.40 A, debido a que por debajo de 0.35A ocurre solamente el depósito Cu y por arriba de 0.4 A se produce la evolución de hidrógeno. Así mismo, el potencial debe permanecer dentro de un intervalo cercano entre a 0.35V a 0.45 V. Por lo tanto, podemos establecer que al utilizar una agitación con propela y ondas de vibración, se obtiene un mejor control de la corriente y el potencial, lo que permite obtener una mayor calidad de los depósitos (Fig. 18b). A así también se evitó el obscurecimiento y pasivación de los electrodos (ánodos) por la formación de óxidos, (Cortes, 2017). Una vez que se determinó el valor mínimo de la corriente de 0.35 A, donde se observó que, por debajo de este valor, existe depósito de cobre, se procedió a realizar una serie de experimentos fijando el valor del potencial con la finalidad de determinar las condiciones y los parámetros a un bajo potencial, así como observando la pasivación de los electrodos y evolución de hidrogeno.

4.4 CONTROL POTENCIOSTÁTICO

4.4.1 Control de potencial en -0.35V y -0.40V .

Partiendo de un valor de 0.35V , y debido a la baja densidad de corriente, no se presentó la pasivación de los ánodos (ver Fig. 19a) pero solo un depósito de cobre fue observado (ver fig. 19b). Esto debido a la dificultad de la transferencia de iones de Zn que se pierden durante la transferencia de masa, atribuido a que la corriente comenzó a hacerse más catódica a partir del minuto 10 (ver grafica de la Fig. 20, curva i) .

Posteriormente cuando se fijó un valor de potencial de -0.40V , se observó la pasivación en ambos electrodos (ver Fig. 21a). Obteniendo un depósito opaco de cobre (ver Fig. 21b). Por otro lado, cuando el potencial fue controlando en -0.40V , los resultados muestran que la corriente sigue teniendo un comportamiento catódico (ver grafica de la Fig. 20, curva ii)). Por lo que se procedió a realizar una serie de experimentos a valores de potencial más altos.

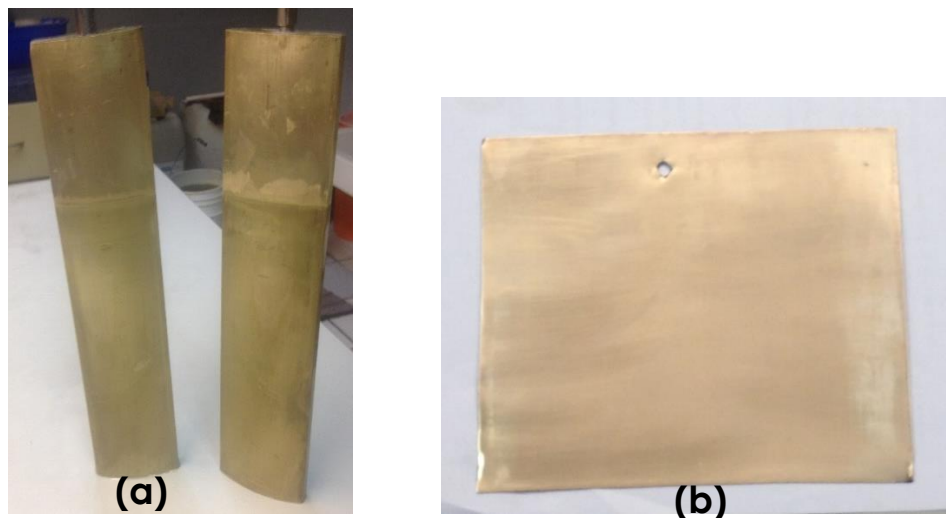


Figura 19. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, aplicando un potencial fijo de -0.35V .

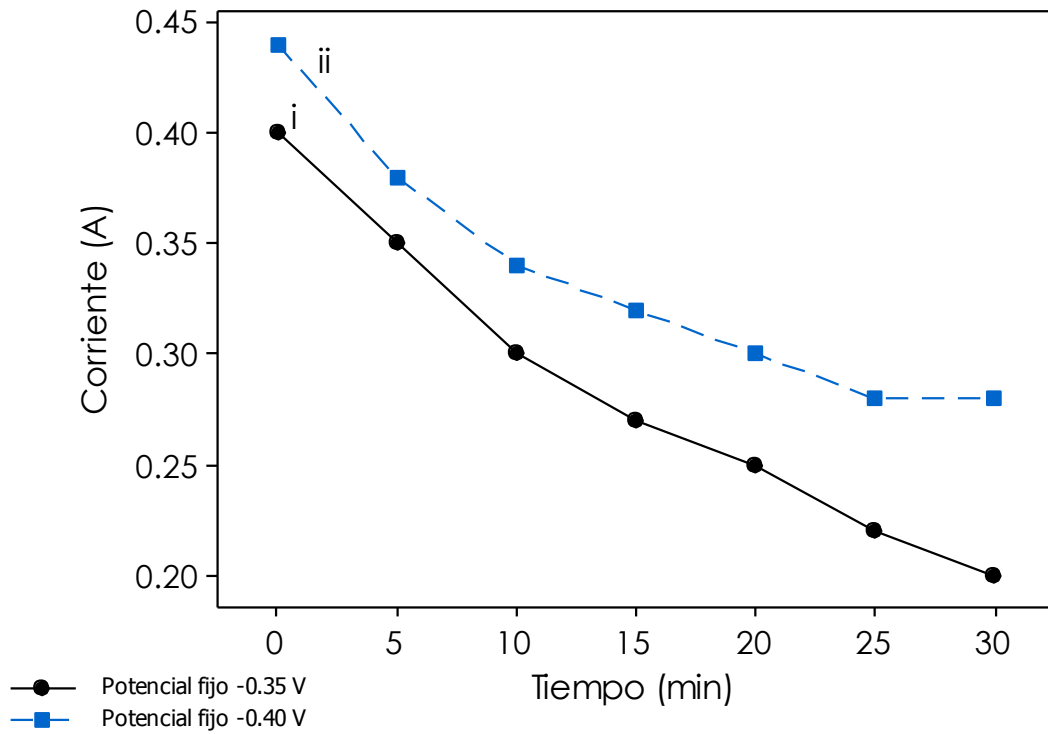


Figura 20. Grafica de la variación de: corriente, durante el tiempo del electrodepósito, aplicando un potencial fijo de -0.35V y -0.40 V.

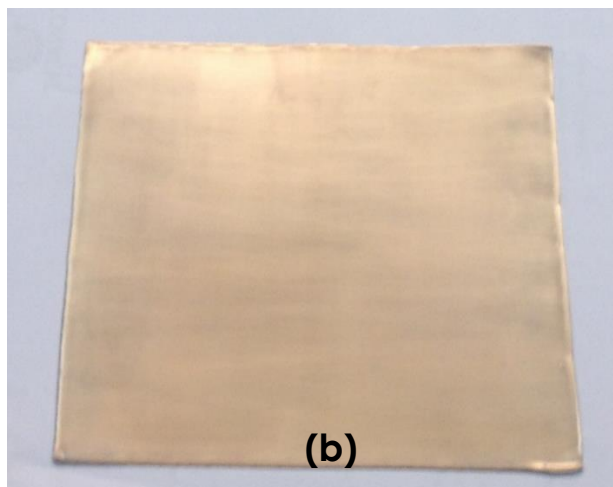
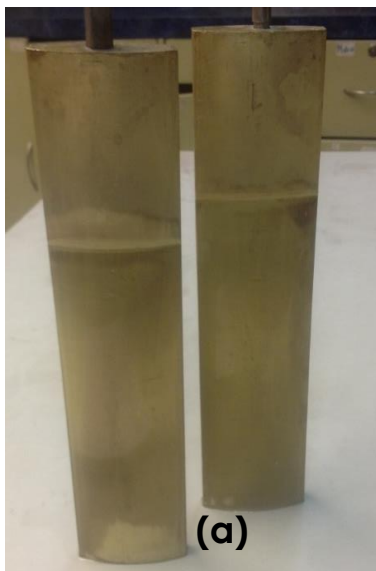


Figura 21. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodepósito, aplicando un potencial fijo de -0.40V.

4.4.2 Control de potencial en $-0.42V$ y $-0.45V$.

Al imponer un potencial fijo de $-0.42V$, se observó que durante los primeros cinco minutos del experimento comenzó la evolución de hidrogeno en el cátodo. Pero también de forma inmediata se observó la primera capa del depósito de latonado, ayudando a disminuir la evolución de hidrogeno. Sin embargo, la corriente comenzó a disminuir gradualmente hasta $0.32 A$ (ver la gráfica de la Figura 22 curva i), dando paso posteriormente a solo depósito de iones de cobre y la pasivación de los ánodos (ver fig. 23 a). Posteriormente se realizó una serie de experimentos fijando el valor del potencial en $-0.45V$, donde se observó que al inicio del proceso el valor de la corriente aumenta hasta $0.80 A$ (ver gráfica de la Figura 22 curva ii). De la misma forma, se generó evolución de hidrogeno en los primeros minutos misma que se disipó con los primeros depósitos de latón y ondas vibración con el ultra sonido. Cabe mencionar que al minuto 10 el valor de la corriente gradualmente es más catódica (ver gráfica de la Fig. 22, curva ii) y se observó el comienzo de una capa de óxidos pasivando a los ánodos (ver fig. 24a). Se observó un depósito de latón más homogéneo y menos opaco (ver Fig. 24b).

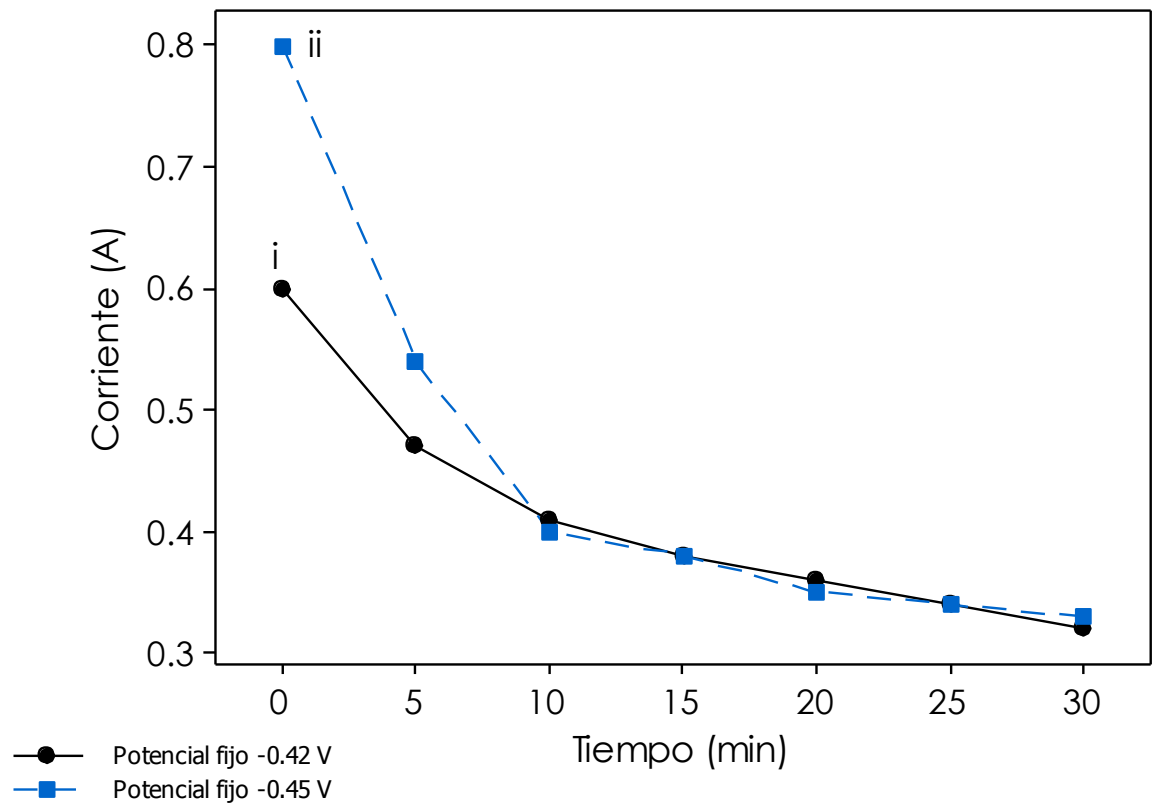


Figura 22. Grafica de la variación de: corriente, durante el tiempo del electrodeposición, aplicando un potencial fijo de -0.42V y -0.45 V.

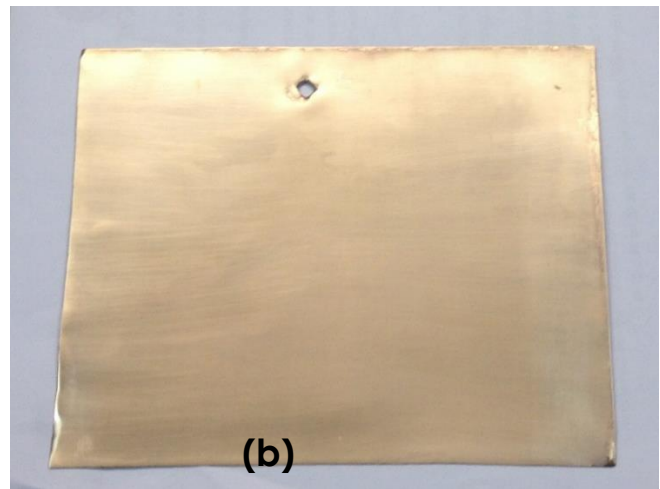


Figura 23. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor del potencial a -0.42 V.

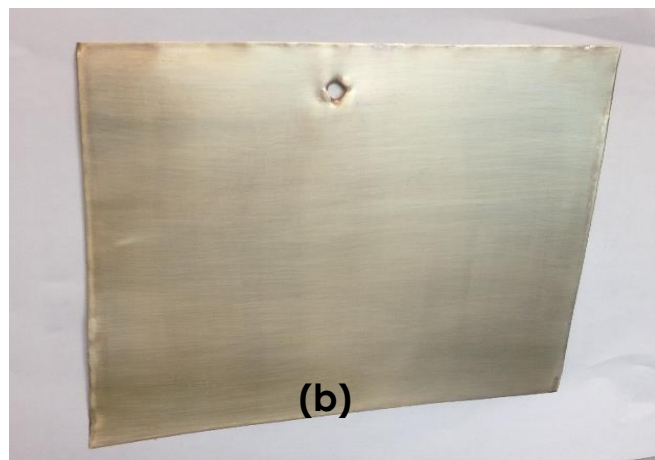
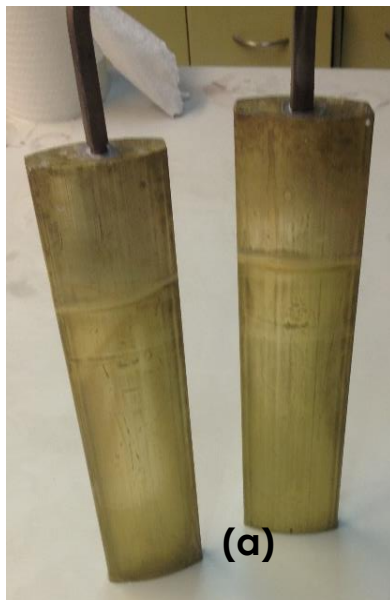


Figura 24. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el electrodeposición, imponiendo el valor del potencial a -0.45 V.

4.4.3 Control de potencial en -0.48V y -0.55V.

Debido a que a mayor potencial se observó una mejor estabilidad de la corriente durante el proceso, se continuó realizando una serie de experimentos con valores de potencial de -0.48V y posteriormente de -0.55V, monitoreando el valor de la corriente. Al imponer el potencial de -0.48V comenzó la evolución de hidrogeno en los primeros 3 minutos y posteriormente se observa el depósito de una capa inicial de latón, lo que disminuyó dicha evolución. Se observa también una menor pasivación de los cátodos (Fig. 25a) y se obtiene un depósito de latonado más homogéneo y menos opaco (Fig. 25b) alrededor del minuto 8 hasta los 20 minutos. Cabe mencionar que al iniciar las ondas de vibración en la solución esta influye en la densidad de corriente, al no observarse ninguna variación en los multímetros. Continuando con la imposición de un potencial de -0.55V, se observó el inicio de la evolución de hidrogeno misma que disminuyo en el primer minuto. Esto debido que el depósito de latón comenzó casi inmediatamente, obteniendo un depósito más brillante sobre el cátodo y menos opaco (ver figura 26b). También se observó que la presencia de cobre desapareció por completo, así como mínima pasivación de la superficie de los ánodos (Fig. 26a). También se observó que la corriente presento un comportamiento más estable tanto a -0.48 V, pero mucho mejor a -0.55 V (gráfica de la Fig. 27, curva i y ii, respectivamente).

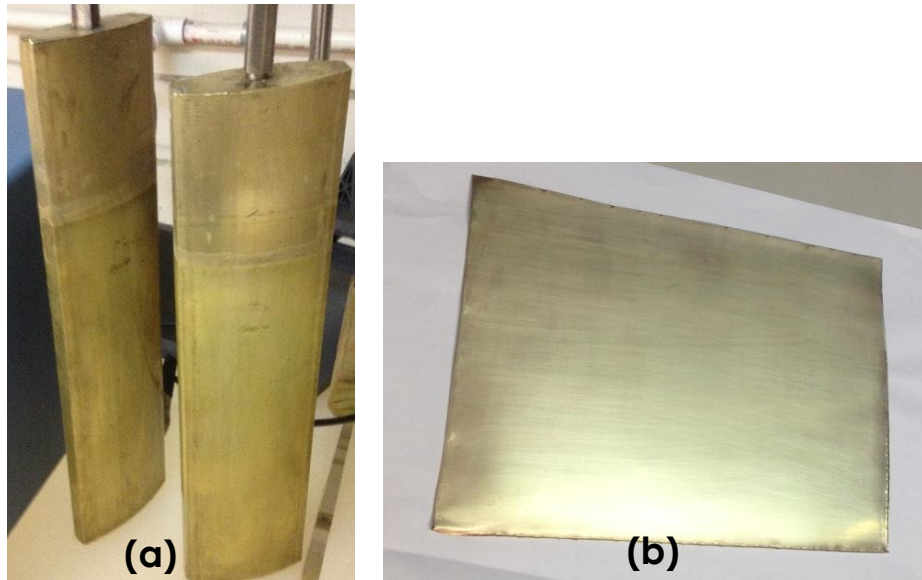


Figura 25. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor del potencial a -0.48 V .

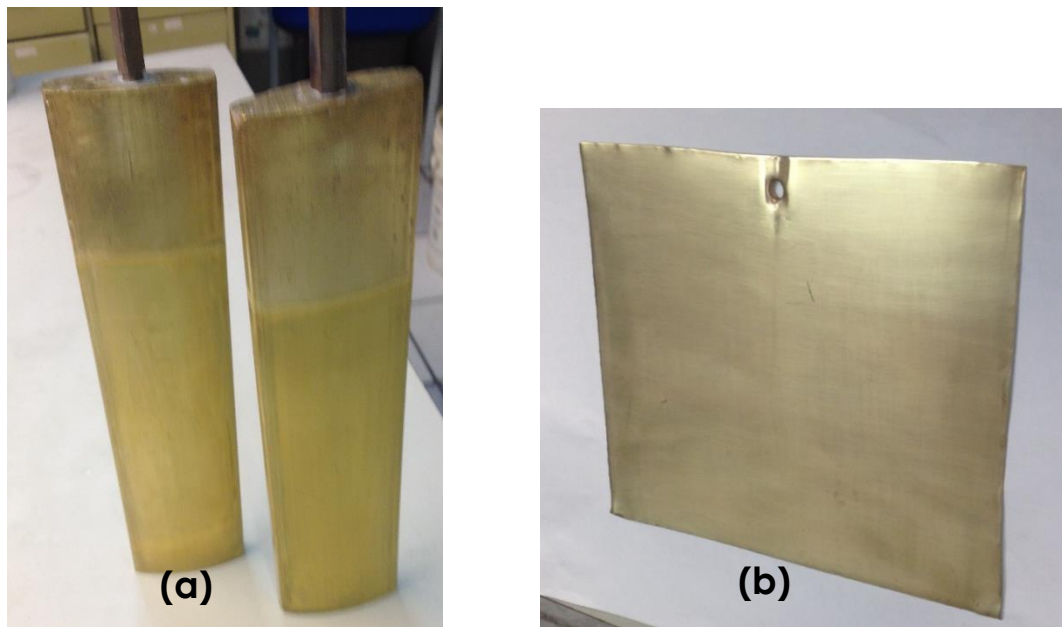


Figura 26. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la potencial a -0.55 V .

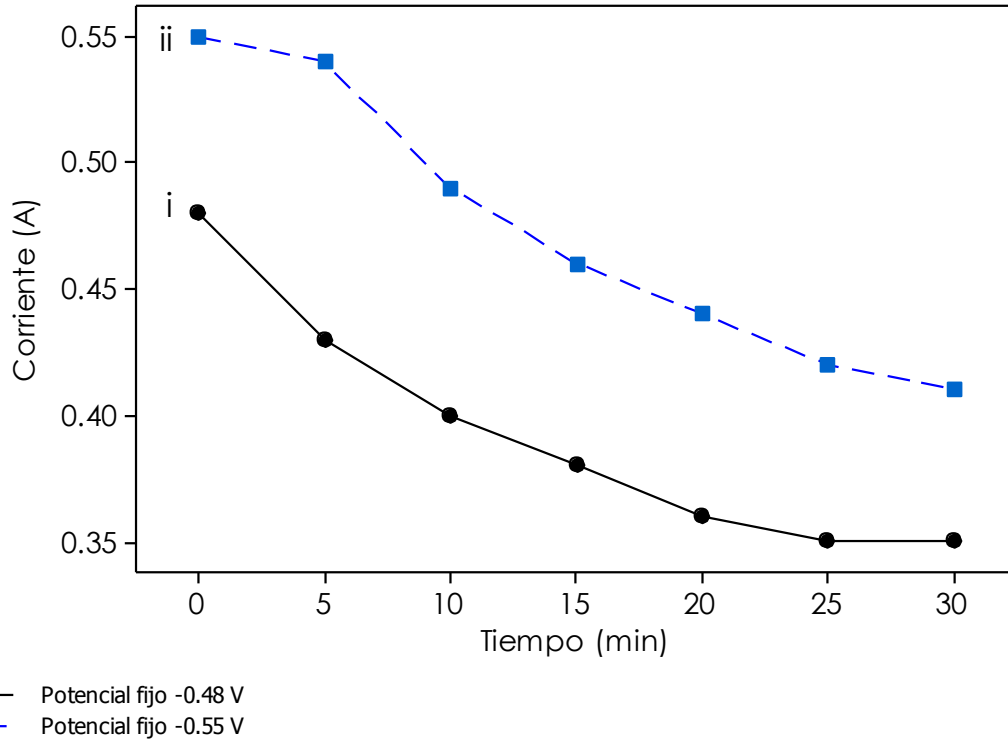


Figura27. Gráfica de la variación de: corriente, durante el tiempo del electrodepósito, aplicando un potencial fijo de -0.48 V y -0.55 V,

4.4.4 Intervalo de Potencial de -0.60V, -0.65V.

En los siguientes experimentos se aplicó un potencial de -0.60V, donde se logra observar que al inicio del proceso el valor de la corriente aumenta considerablemente generando evolución de hidrogeno, mismo que disminuyó en el primer minuto (Fig. 28, curva i). Se observó una mínima pasivación de los ánodos (Fig. 29a), así como un depósito de latón más limpio, homogéneo y brillante (Fig. 29 b). Sin embargo, cuando se aumentó el valor del potencial a -0.65V, el valor de la corriente aumenta por arriba de 1.2 A, lo genera demasiada evolución de hidrogeno sobre la superficie de la placa metálica, y como resultado la evolución de hidrogeno en el cátodo se presentó durante todo el proceso de latonado generando que el valor de la corriente se mantuviera por arriba de los 0.65 A, (Fig. 28, curva ii). Además, se observó que al minuto 20 comenzó la pasivación de los

ánodos (Fig. 30a), así como un depósito más opaco en el cátodo, lo que generó que se perdiera el brillo del depósito (Fig. 30b).

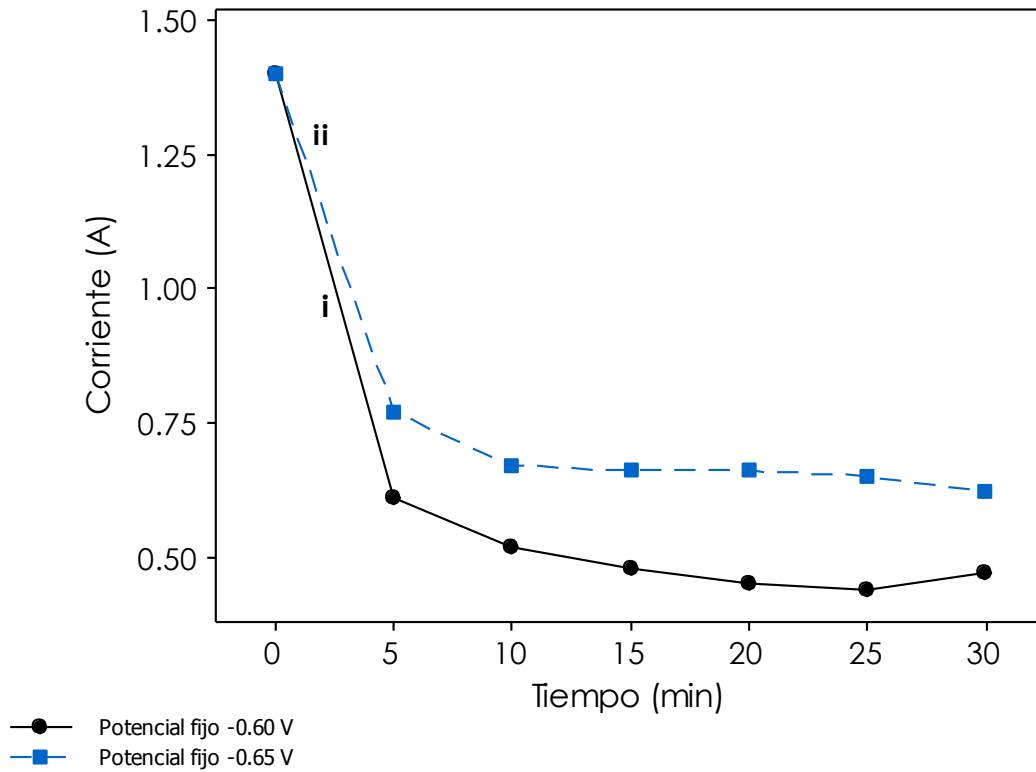


Figura 28. Gráfica de la variación de: corriente, durante el tiempo del electrodeposición, aplicando un potencial fijo de -0.60 V y -0.65 V.

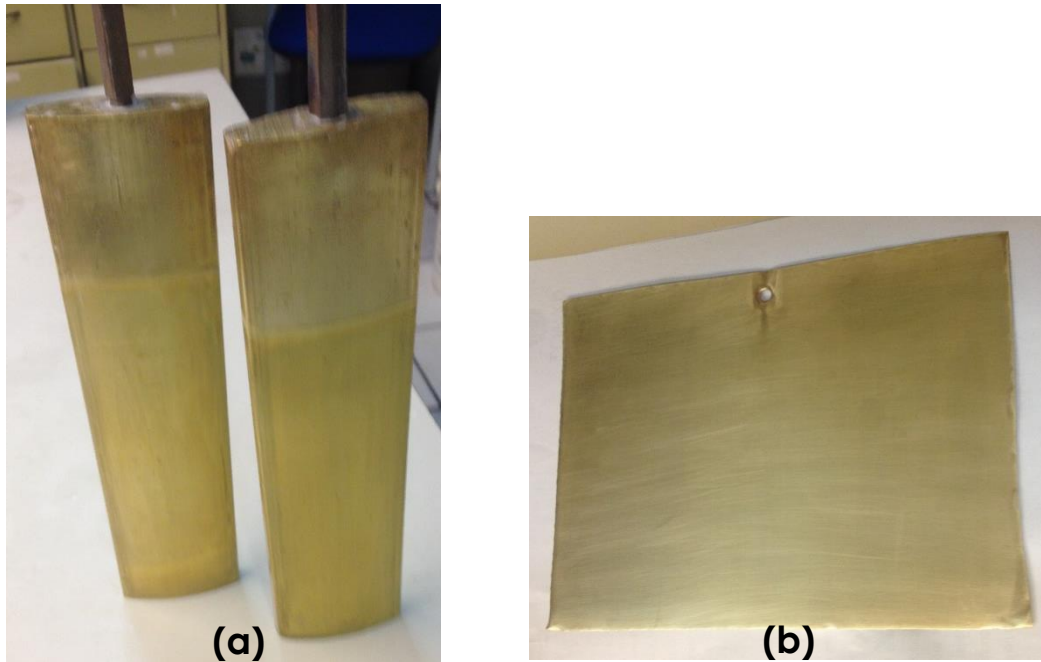


Figura 29. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición imponiendo el valor del potencial a -0.60 V .

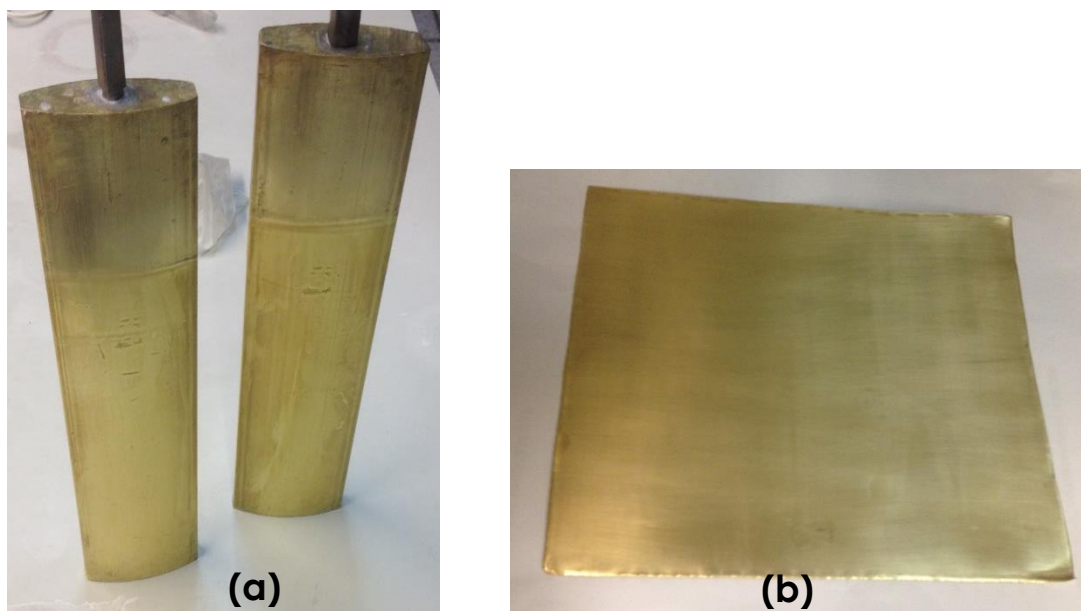


Figura 30. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la potencial a -0.65 V .

4.5 CONTROL GALVANOSTÁTICO

Una vez que se determinó el intervalo de potenciales donde se observó un depósito de latonado más brillante, limpio y homogéneo, se realizó una serie de experimentos fijando intervalos de corriente. Es decir, con el fin de conocer la influencia de la corriente aplicada sobre los depósitos generados, fueron llevadas a cabo experimentos aplicando una corriente y observando su influencia sobre la transferencia de masa en los depósitos obtenidos.

4.5.1 Corriente controlada a 0.33 A y 0.35 A.

Para el primer experimento se aplicó un valor de corriente de 0.33 A, obteniendo como resultado el comienzo del depósito de cobre hasta el minuto 10 y posteriormente comienza el depósito de latón debido a que el valor de potencial fue más alto (ver gráfica de la Fig. 31, curva i). Así mismo se observó la pasivación de los ánodos a partir del minuto 15 (ver Fig. 32a), interfiriendo en la calidad del depósito y obteniendo un depósito más opaco (ver Fig. 32b). Posteriormente se realizaron más depósitos controlando la corriente a un valor fijo de 0.35 A, tomando nota de la respuesta del potencial y del depósito. Se obtuvo como resultado que el valor inicial del potencial fue bajo pero mayor al correspondiente a 0.33 A (ver Fig. 31, curva ii), lo que originó la pasivación de los ánodos (ver Fig. 33a) y la formación de depósitos de cobre hasta el minuto 15. Posteriormente el potencial fue más catódico y un depósito de latón fue más evidente sobre la placa metálica, originando un depósito oscuro y opaco (ver Fig. 33b).

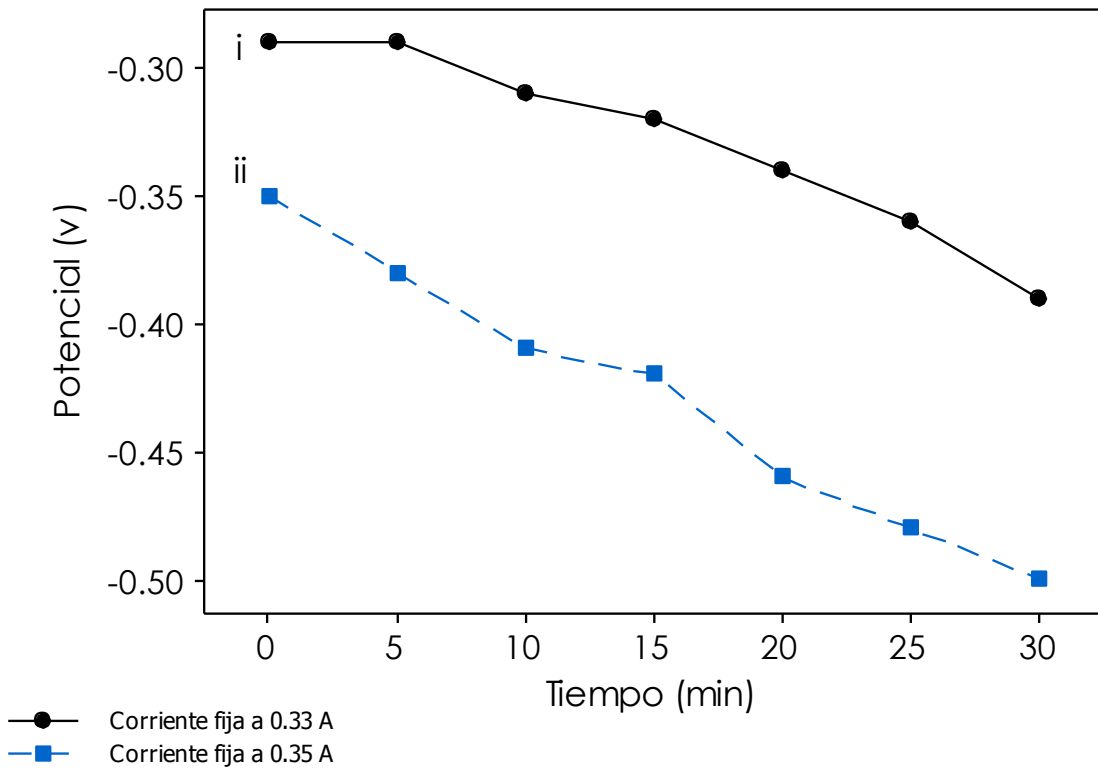


Figura 31. Gráfica de la interacción de: potencial durante el tiempo del electrodeposito, imponiendo un valor de corriente de 0.33 A y 0.35 A.

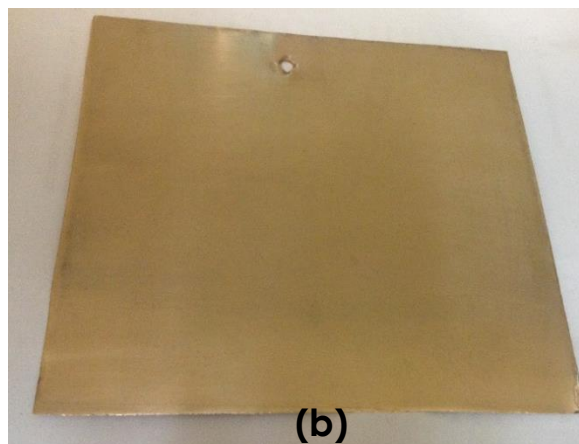
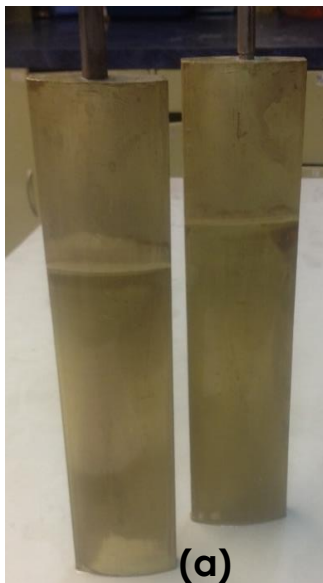


Figura 32. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.33 A.

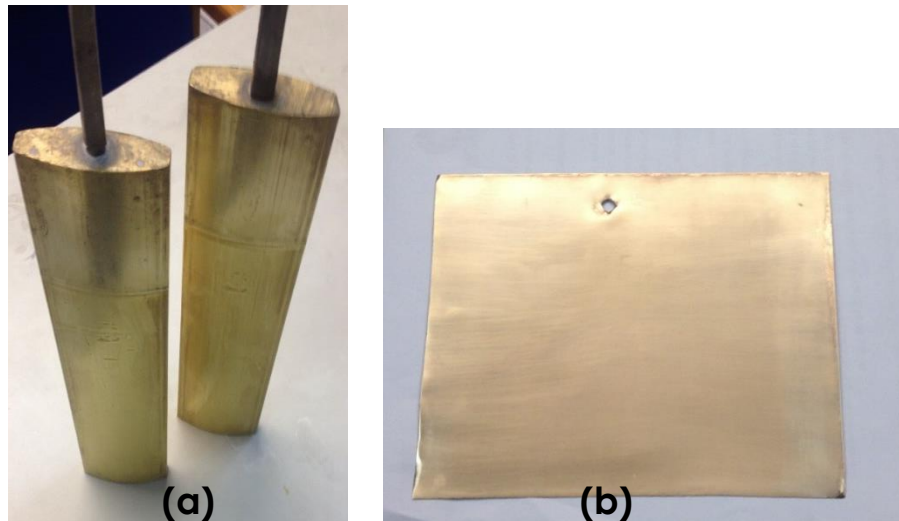


Figura 33. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.35 A.

4.5.2 Corriente controlada en 0.45 A y 0.48 A.

Al aplicar una corriente fija en 0.45 A, en los primeros cinco minutos el potencial decrece hasta -0.44 V (ver gráfica de la Fig. 34, curva i), dando oportunidad a la transferencia de iones Cu-Zn para que ocurra un depósito de latón. Cabe mencionar que al minuto 25 ya no se observó evolución de hidrógeno, lo que ayudo a minimizar la pasivación de los ánodos (ver Fig. 35a) y que el depósito se observara menos opaco y homogéneo (ver Fig. 35b). Posteriormente se realizaron más depósitos controlando la corriente con un valor fijo de 0.48 A. Se observa un depósito inicial de cobre que desaparece en los primeros 5 minutos, esto se atribuyó a que al iniciar el proceso el valor del potencial es por debajo de -0.42V, es decir menos catódico que a 0.44 A (ver gráfica de la Fig. 34, curva ii). Posteriormente el potencial tiende hacerse más catódico rápidamente, lo que

resulta en una menor evolución de hidrogeno durante el depósito. Así mismo se observó una menor pasivación de los ánodos (ver Fig. 36a) y Un incremento del depósito de iones Cu-Zn, resultando en un depósito de latón más homogéneo y más brillante (ver Fig. 36b).

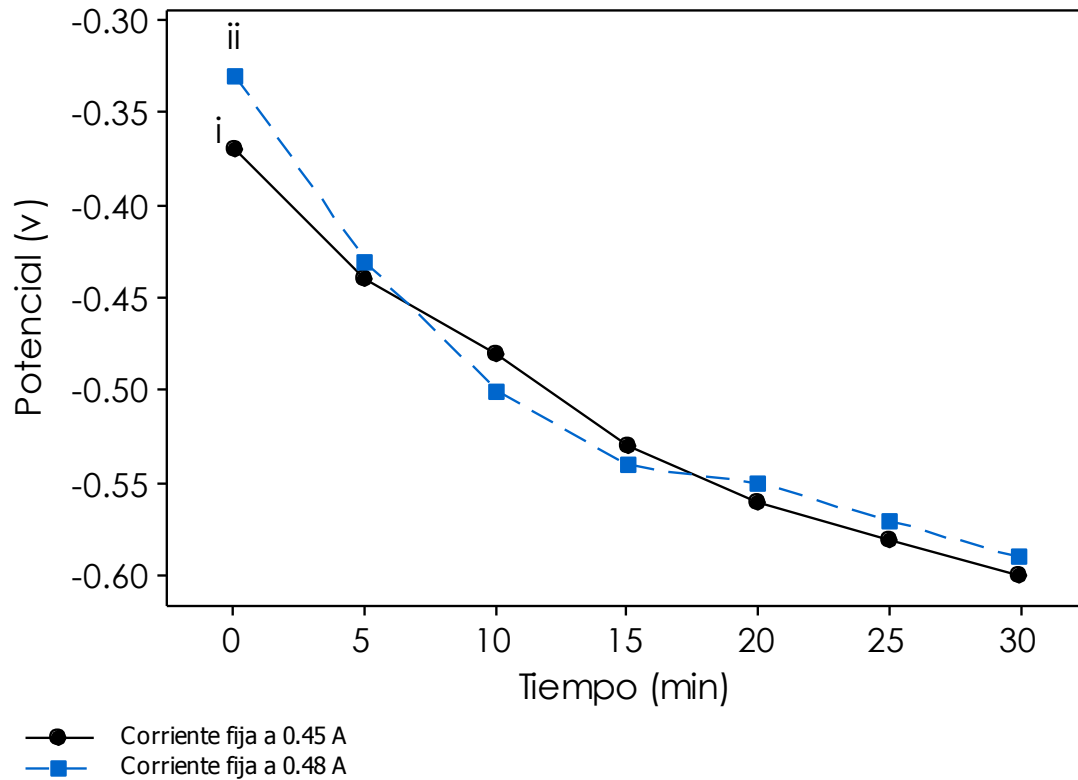


Figura 34. Gráfica de la variación de: potencial durante el tiempo del proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente a 0.45 A y 0.48 A.

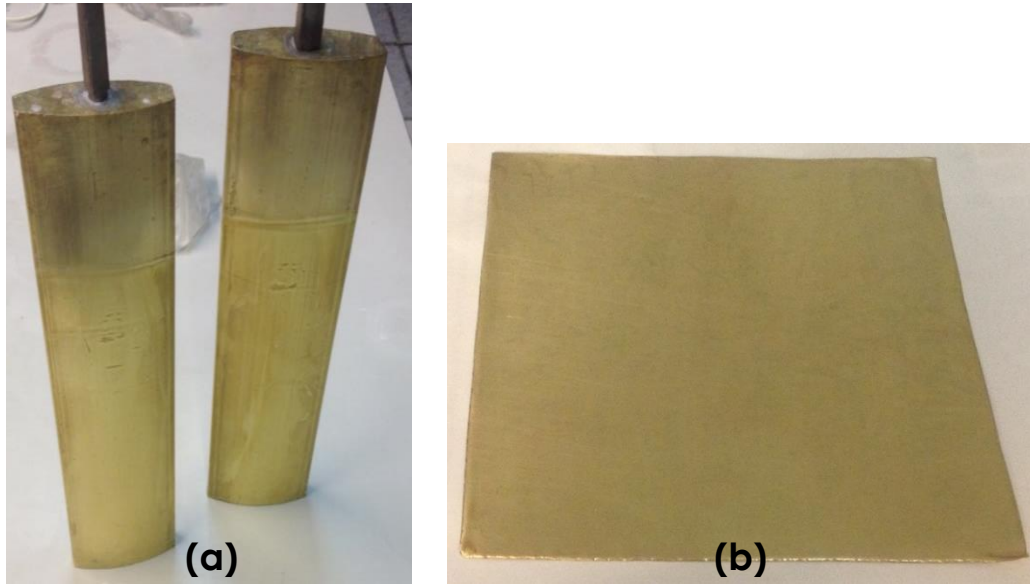


Figura 35. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodepósito, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.45 A.

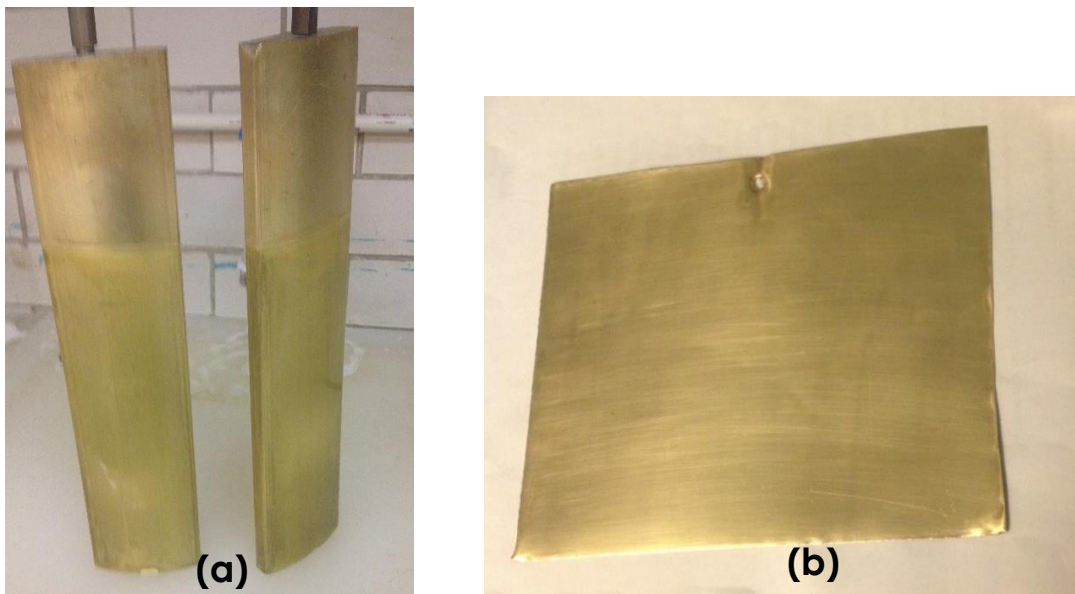


Figura 36. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodepósito, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.48 A.

4.5.3 Corriente controlada en 0.55 A y 0.60 A.

Finalmente, se realizó una serie de experimentos imponiendo un valor fijo de la corriente a 0.55 A y 0.60 A. Se realizaron varios experimentos controlando el valor de la corriente en 0.55 A, observando un depósito de latón en los primeros 5 minutos, con un valor de potencial entre -0.36V y -0.48 V (ver gráfica de la Fig. 37, curva i). Esto permitió que no se presentara evolución de hidrogeno en el cátodo y por lo tanto, las condiciones hidrodinámicas durante el depósito fueron más óptimas durante en los primeros 25 minutos y posteriormente comenzó a observarse una ligera pasivación en los ánodos (Fig. 38a). Cabe mencionar que el deposito final sobre la lámina de acero inoxidable se observó más homogéneo y más brillante (Fig. 38b). Finalmente, se realizaron experimentos a un valor de corriente de 0.60 A, observándose evolución de hidrogeno desde un inicio, aún y cuando el valor del potencial fue más catódico, mayor de - 0.44 V (ver gráfica de la Fig. 37, curva ii). Sin embargo, la evolución de hidrógeno origino que las condiciones hidrodinámicas durante el depósito se viesen afectadas, permitiendo la pasivación de los ánodos (Fig. 39a). Así mismo se observó que principalmente iones Cu fueran depositados en el cátodo, obteniendo un depósito más oscuro y menos brillante (Fig. 39b).

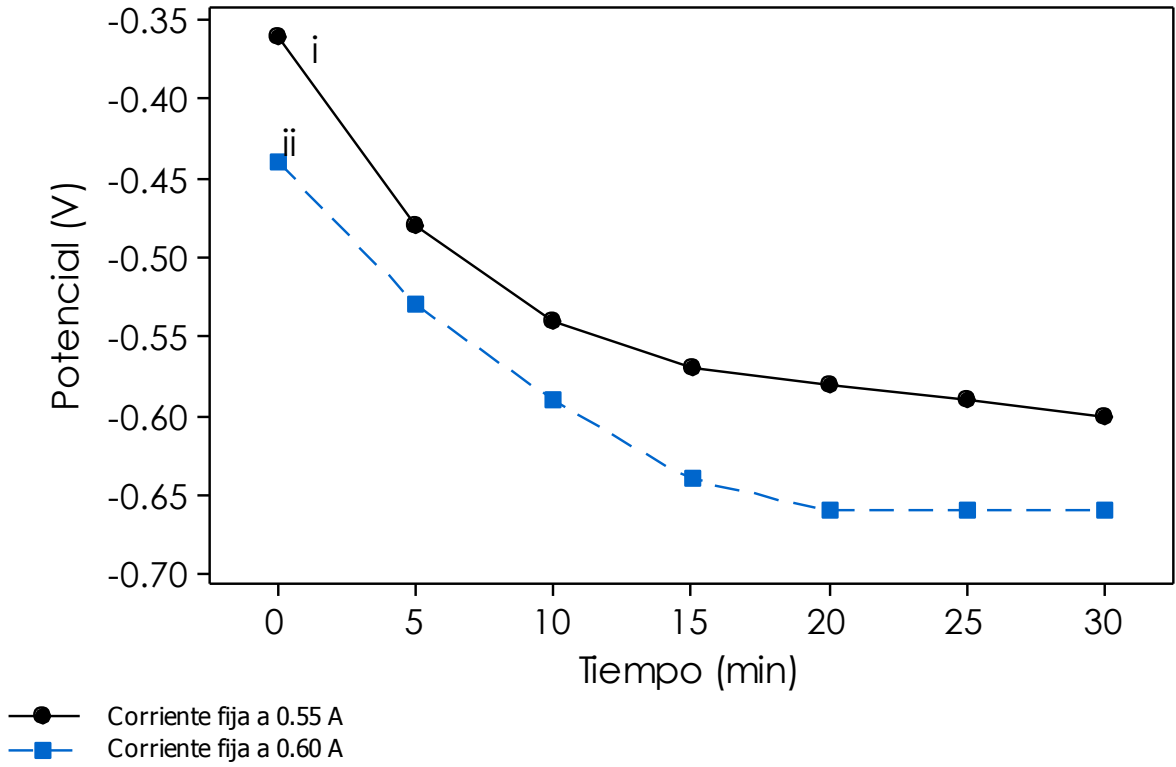


Figura 37. Gráfica de la variación de: potencial durante el tiempo del electrodepósito, imponiendo el valor de la corriente a 0.45 A y 0.48 A.

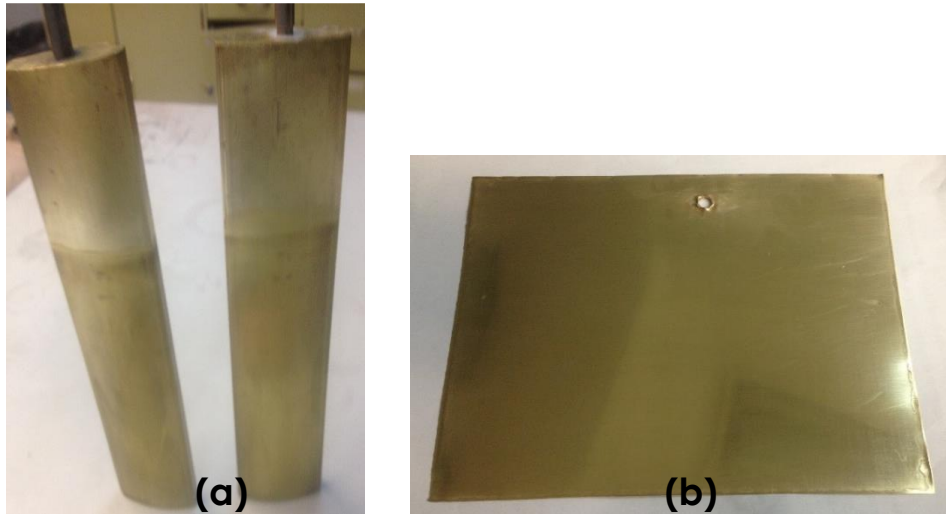


Figura 38. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.55 A.

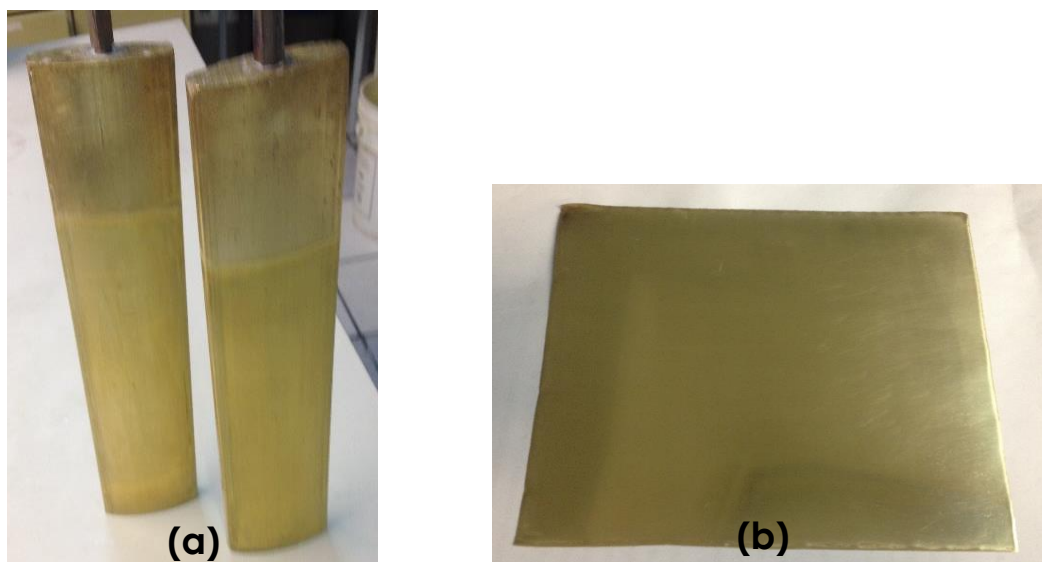


Figura 39. Imágenes de los electrodos: a) ánodos y b) cátodo después de realizar el proceso de electrodeposición, imponiendo el valor de la corriente fijándolo a 0.60 A.

4.6 EFICIENCIA DE CORRIENTE

Los resultados del estudio galvanostático y potenciostático mostraron algunos rangos de valores de corriente y potencial donde se observan los mejores depósitos de latonado. Esto como resultado a que se presentó una menor evolución de hidrógeno, menor pasivación de los ánodos y se evitó un depósito de solamente de cobre. Por lo tanto, se determinó que los parámetros donde se observan los mejores depósitos de latonado ocurren en un intervalo de potenciales fijos entre -0.48V y 0.6V y a valores de corriente fija de entre 0.45 A y 0.55 A . Cabe mencionar que es más complicado controlar la variación de la corriente cuando se impone un potencial fijo (ver gráfica de la Fig. 40), que la variación del potencial cuando se impone una corriente fija (ver gráfica de la Fig. 41). El comportamiento de esta variación fue más evidente después de los 5 minutos de haber iniciado el proceso.

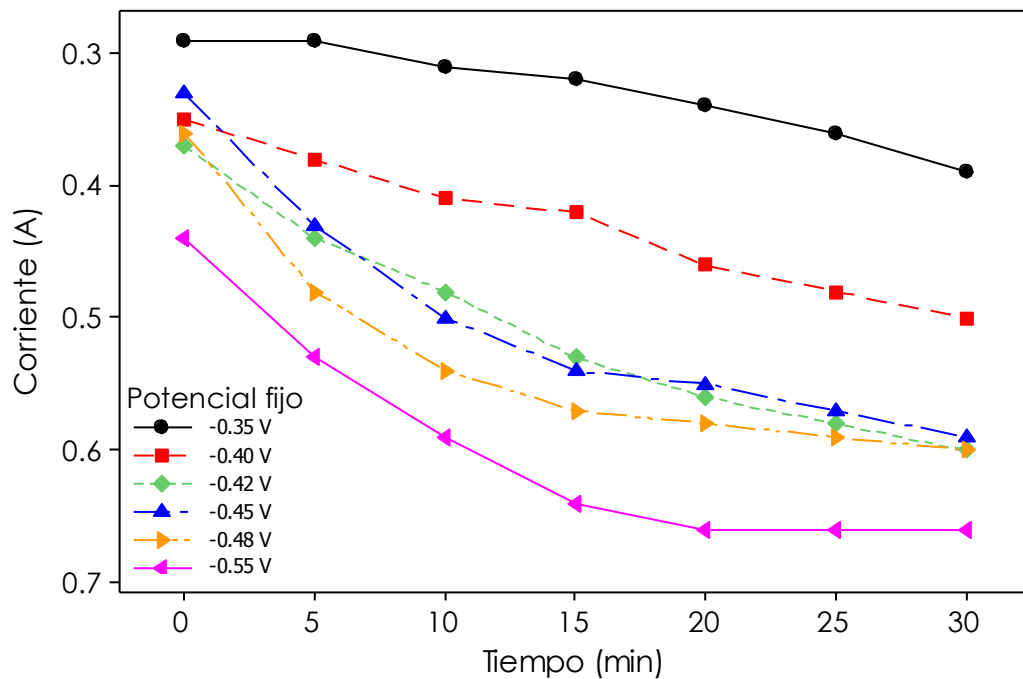


Figura 40. Gráfica de la variación de la corriente durante el tiempo del electrodeposición, imponiendo el valor del potencial fijo.

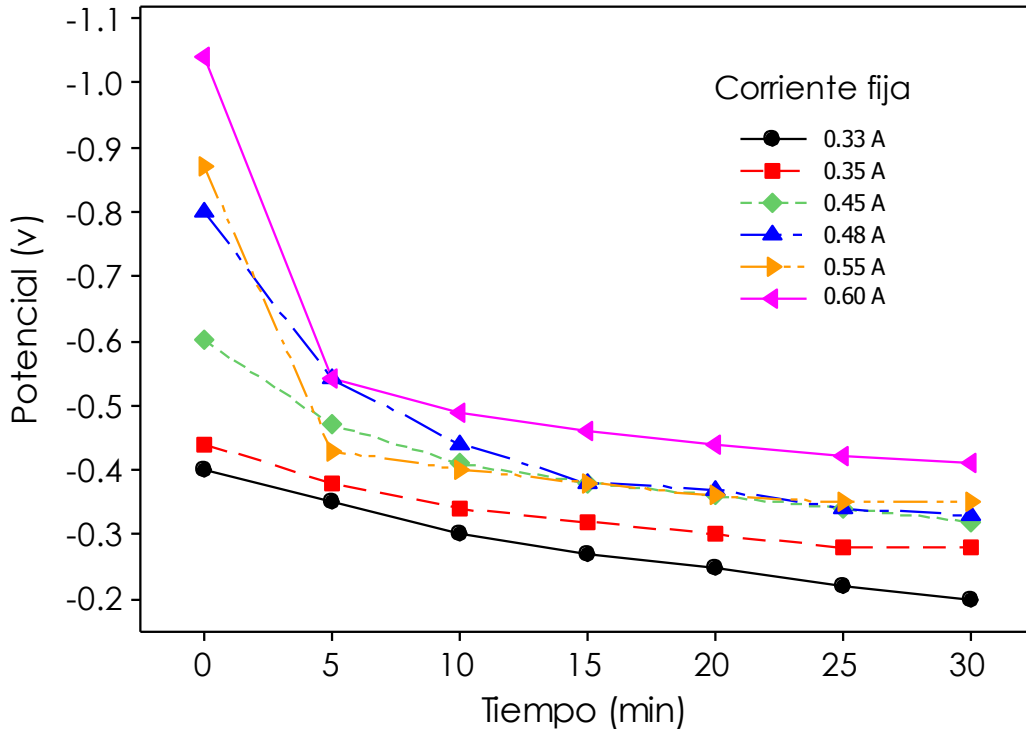


Figura 41. Gráfica de la variación del potencial durante el tiempo del electrodeposición, imponiendo una corriente fija.

CIIU (2005). Reportan que el potencial de los electrodos varía a medida que avanza la electrolisis, ya que el potencial del ánodo se vuelve más positivo y en el cátodo se vuelve más negativo, esto debido a que la interface del depósito cambia. Es decir, los cambios se deben a que en el ánodo se disuelven iones metálicos, haciendo la solución más concentrada en sus proximidades. Por el contrario, en el cátodo los iones se depositan en el baño electrolítico, provocando que la solución pierda concentración. Este fenómeno produce un aumento en la diferencia de potencial aplicada a los electrodos con el generador de la corriente. Dicho aumento en la diferencia de potencial se denomina Fuerza Electromotriz de polarización (Tabla 2).

Faraday determino la relación cuantitativa, entre la cantidad de corriente eléctrica que se usa y la masa de las sustancias producidas por las reacciones de oxidación y reducción (apartado 2.4). Por lo que podemos determinar la eficiencia de corriente del recubrimiento utilizando la masa teórica y la masa real de depósito. Mediante la fórmula:

$$\emptyset = \frac{m_{real}}{m_{teórica}} * 100$$

En la tabla 3, se muestra el valor de la masa teórica calculada con la ley de Faraday y la masa real obtenida gravimétricamente después del proceso de latonado al imponer una corriente constante en el intervalo de 0.33A a 0.6 A.

Tabla 3. Muestra la interacción del potencial imponiendo la corriente, así como, la masa real y teórica de los experimentos de electrodeposición de latón.

Corriente impuesta	Intervalo de potencial	Masa real	Masa teórica
0.33 A	-0.30V a -0.39V	0.1559 g	0.1978 g
0.35 A	-0.30V a -0.44V	0.1783 g	0.2097 g
0.45 A	-0.44V a -0.58V	0.2419 g	0.2697 g
0.48 A	-0.45V a -0.59V	0.2715 g	0.2877 g
0.55 A	-0.48V a -0.60V	0.3233 g	0.3296 g
0.60 A	-0.44V a -0.66V	0.3502 g	0.3596 g

En la tabla 3, se aprecia que al incrementar la corriente impuesta en el depósito de latón se incrementa la masa real y teórica. También se observa que conforme se incrementaba la corriente impuesta se incrementa el potencial en el proceso.

En la gráfica de la figura 42 se parecía que en el intervalo de 0.33 A a 0.55 A, conforme se incrementa la corriente impuesta se incrementa la eficiencia de corriente. Sin embargo esta disminuye por encima de los 0.55 A. La gráfica (Figura 42) también muestra que en el intervalo de corriente entre 0.45 A y 0.55 A, la eficiencia real de la corriente en el proceso de depósito está por arriba de 90%. Lo que también coincidió con una mínima

evolución de hidrógeno y menor pasivación de los ánodos, obteniendo depósito de latonado más selectivo y de mejor calidad.

Cabe mencionar que no se alcanzaron eficiencias del 100 %, lo cual es atribuido a que se está llevando a cabo una mínima evolución de hidrógeno sobre la superficie del cátodo que consume cierta cantidad de energía (corriente eléctrica).

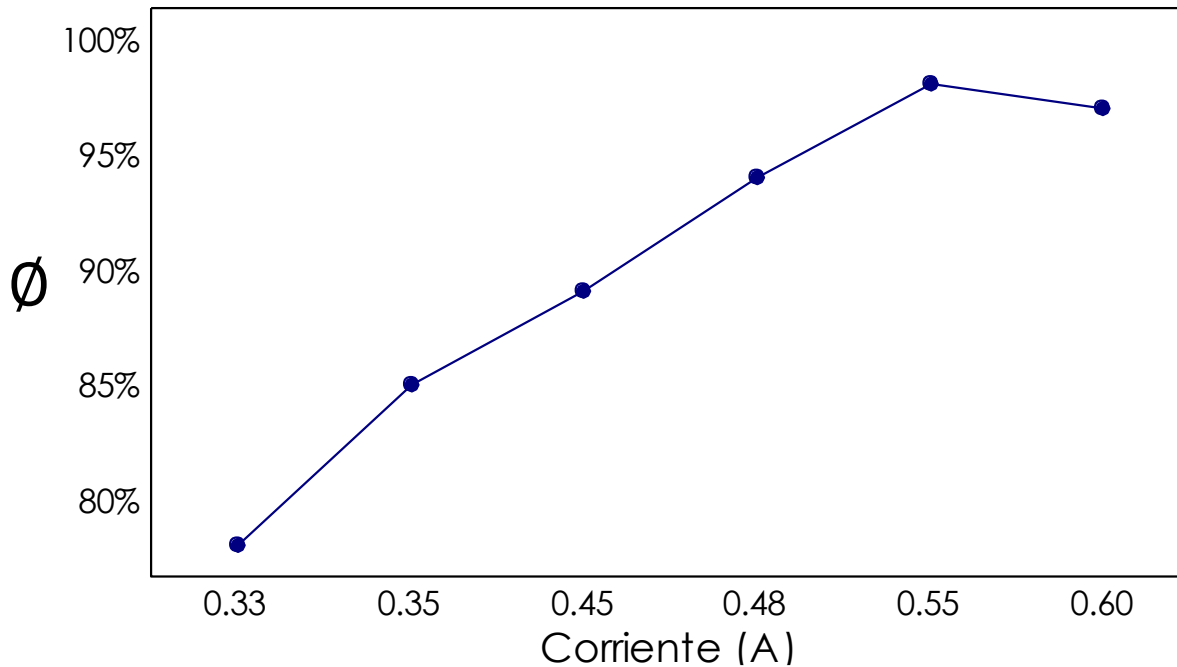


Figura 42. En la gráfica se muestra la eficiencia de la corriente impuesta para el proceso de depósito de Latón.

De esta manera, cuando se impone una corriente de 0.60 A la eficiencia corriente disminuye significativamente y el potencial aumenta a $-0.66V$ (ver tabla 3), debido a que parte de la corriente ahora se está utilizando en la reacción de evolución de hidrogeno. Por lo tanto, se puede determinar que la mejor eficiencia del proceso se encuentra en el intervalo de corriente de 0.48 A a 0.55 A se observó una eficiencia de corriente de hasta 95% o más, obteniendo un depósito de latonado de mejor calidad.

CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se acondiciono una celda electrolítica de una planta piloto de Galvanoplastia en la que fue posible realizar una serie de experimentos determinando los parámetros y el control de las variables para llevar a cabo el electrodepósitos de un proceso de latonado; obteniéndose las siguientes conclusiones:

- Los parámetros potencioestáticos y galvanostáticos determinaron que los mejores depósitos de latonado ocurren en un intervalo de potenciales entre -0.45 V y -0.60 V y una corriente directa de 0.48 A y 0.55 A .
- Se determinó también que por debajo de estos valores de potencial y de corriente se obtiene un depósito de latón deficiente, ya que se presenta la interferencia del depósito de cobre. En valores donde se mantiene la corriente y potencial constante de 0.33 A y 0.4 V se obtienen solo depósitos de cobre.
- Se determinó que la agitación con burbujas de aire produce un obscurecimiento y pasivación del ánodo por la formación de óxidos, lo que afecta a la calidad del depósito, debido a que limita la transferencia de masa de los iones hacia el cátodo, obteniendo depósitos deficientes.
- Además, se determinó que el uso de la agitación con propela disminuye la pasivación de los electrodos, pero no se logra un depósito óptimo. Mientras que, utilizando una agitación controlada con propela y ondas de vibración se obtiene una mejor calidad en los depósitos debido a que se evita una pasivación de la superficie de los ánodos por la formación de óxidos, que mejora las condiciones de transferencia de masa en el proceso.
- El estudio galvanostático y potencioestático demostró que aunque los mejores depósitos de latonado ocurren en un intervalo de potenciales fijos entre -0.48 V y

0.6V y a valores de corriente fija de entre 0.45 A y 0.55 A, es más complicado controlar la variación de la corriente cuando se impone un potencial fijo, que la variación del potencial cuando se impone una corriente fija.

- Por lo tanto, se determinó que cuando se impone una corriente fija en intervalo de corriente de 0.48 A a 0.55 A, se alcanza eficiencias de corriente por arriba de 95%, debido una mínima evolución de hidrógeno y baja pasivación de los ánodos, lo que permite una mejor calidad del depósito de latonado.

Finalmente, con los resultados obtenidos se pudo comprobar que es posible acondicionar una celda electrolítica de la planta piloto de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, que permite controlar los parámetros de las principales variables de un proceso de latonado.

APORTACIONES DE LA TESIS

Como resultado del desarrollo de este trabajo se obtuvieron las siguientes aportaciones:

- Se determinó que la utilización de aire comprimido para agitar la solución electrolítica en la celda, genera demasiada oxidación de los ánodos por lo que pasiva su superficie y esto limita el proceso de electrodeposición, obteniendo depósitos deficientes y de mala calidad.
- Se determinó que utilizando la sonda de ultrasonido junto con la propela como medio de agitación, proporciona las mejores condiciones hidrodinámicas de transferencia de masa para obtener un mejor control del proceso de electrodeposición.
- Se determinó que la generación de evolución de hidrógeno provoca también pasivación de los ánodos debido a la contra reacción que ocurre en la superficie de ellos (oxidación del H_2O), obteniendo depósitos deficientes y de mala calidad.
- Se comprobó que para tener un mejor control del proceso de latonado, es más fácil mediante el control de la corriente que mediante la imposición de un potencial fijo.
- Se determinó que en el intervalo de corriente entre 0.48 A a 0.55 A se alcanza eficiencias de corriente por arriba de 95%, debido a una baja evolución de hidrógeno y mínima pasivación de los ánodos, lo que permite una mejor calidad del depósito de latonado.

RECOMENDACIONES

Evitar demasiada turbulencia durante la agitación de la solución electrolítica al realizar el proceso de electrodeposición debido a que esto puede provocar demasiada oxidación de los ánodos.

Se recomienda realizar la limpieza de los ánodos después de cada corrida o proceso, ya que esto evita demasiada oxidación de los mismos.

Utilizar un tubo de vidrio con agua desionizada para colocar la sonda de ultrasonido dentro de la celda para evitar contaminación de la solución electrolítica.

Tener mucho cuidado en el manejo y limpieza de la pieza a recubrir, seguir estrictamente el proceso de limpieza y enjuague, sobre todo después del proceso de decapado, un mal enjuague adiciona ácido a la solución electrolítica disminuyendo el pH y limitando la vida útil del electrolito.

Se recomienda trabajar en el intervalo de corriente entre 0.48 A, a 0.55 A, para el proceso de latonado, controlando la corriente impuesta para obtener mejor control del proceso y una eficiencia por arriba del 90%; así como un depósito adecuado y de buena calidad.

Como recomendación final, se sugiere implementar un sistema controlado mediante un software que permita monitorear y hacer ajustes de la corriente impuesta, para obtener un mejor control del proceso y por lo tanto, resultados satisfactorios en los depósitos de latonado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Calderón, J, Y. y Ramírez, S, M, (Caracterización y mejoramiento del Proceso de electrodeposición de metales Usados en la empresa Fantaxia (Tesis). Santander, (2005).
- [2] Suarez Carbajal y L, E, El desempeño del sector automotriz en México en la era TLCA. (2014). Vol. 1, Un análisis a 20 años p. 15-40.
- [3] Graham, A. K.. "Modern Electroplating ", New York, 3d ed., John Wiley & Sons, Inc, (1974).
- [4] Álzate, A. "Guía de producción más limpia para el sector de recubrimientos electrolíticos. (2009). (Second, Ed.) EMPA, 1/28.
- [5] Huaman, A, y E. Navarrete., "Celda Galvánica" (2012), <http://www.slideshare.net/ELIASNAVARRETE/celda-galvnica/>.
- [6] Safranek, W. H. " The properties of Electrodeposited Metals and Alloys", American Elsevier, New York, (1974).
- [7] Langford K. E. and Parker, J.E. "Análisis of electroplating and related Solutions , " England. (2017), 14th ed. Robert Draper, Ltd ., Teddington, 197 p.
- [8] Durst, R.A. ion selective Electrodes. National Estandars special publication 314, convenment plating.(2017). Washinton D.C.
- [9] Santillán D, I, y Espinosa, O, Sandoval S, R, "CONSTRUCCION, IMPLEMENTACION Y PRUEBAS DE UNA PLANTA PILOTO DE COBREDO, NIQUELADO, CROMADO, GALVANIZADO" (tesis). Ecuador, (2013).
- [10] Apez G. A. y, Garcia Cruz J. T. "celda electrolitica", (2010), <http://celdaelectrolitica.blogspot.com/>.
- [11] Cottrell, A, H. "An Introduction to Metallurgy, " York, (1959).John Wiley & Sons, Inc., New.
- [12] CIU, Clasificación Industrial Internacional Uniforme. Ecuador, Ecuador: (2005), la Industria de Galvanoplastia (Vol. 32).

- [13] Físico, M. DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN EQUIPO DE GALVANOPLASTIA. COLOMBIA, COLOMBIA:(2006). Scientia et al. Technica. (Vol. 31).
- [14] Bard, A. y Faulkner, L. "Electrochemical Method" (1980).s, John Wiley & Sons.
- [15] Armendáriz, M. "Procesos Industriales, Riobamba: (2009), ESPOCH.
- [16] Sard, R.H. Leidheiser, Jr., and Ogburn, F. "Properties of electrodeposits, Their Measurement and Significance, ", Princeton, (1975), The Electrochemical Society, Inc.
- [17] Hurtado, R. Avalos, T. ", Propuesta de actualización de una planta piloto de galvanoplastia con un sistema automático", Salvador,(2014), No. P 380.
- [18] Iagos R. y Camus, J. "experimentos integrados: Mexico (2016), utilizacion de controladores en plantas de la galvanotecnia".
- [19] Rodríguez M.A. y López, M.I, "Mejora de procesos y Control de Calidad en una empresa de Galvanoplastia". Mayo 2015
- [20] Arrieta Almarino y Caceres. Tarazona J. J. Arrieta, "Sistema Multipotenciostato basado en instrumentación Virtual" (Tesis), (2014)..
- [21] Brett C. y Oliveira Brett, A. M., "Electrochemistry principles, methods and aplicaciones, OXFORD UNIVERSITY (1993).
- [22] Cortes, L. C. y Reyes C. V. E. "Electrochemical selective Learning and Deposition of Ag, Au and Pt from electronic waste" (Tesis).Mexico, 2017 100 p.