



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO



DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

**ELECTRODEPÓSITO DE PELÍCULAS DE ZnO PARA APLICACIÓN EN  
VÁLVULAS DE COBRE, COMO INHIBIDOR DE CORROSIÓN**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

JESÚS RAMÓN CANTARELL FERNÁNDEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. RAFAEL TORRES RICARDEZ

EN CODIRECCIÓN DE:

DR. BRAYAN LEONARDO PÉREZ ESCOBAR

CUNDUACAN, TABASCO, A JULIO 2025

## Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Cunduacán, el día 2 del mes de Julio del año 2025 el que suscribe Jesús Ramón Cantarell Fernández, alumno del Programa de Ingeniería Química con número de matrícula 182D22084, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del. Título de Ingeniero Químico y titulada Electrodeposito de películas de ZnO para aplicación en válvulas de cobre, como inhibidor de la corrosión.

### DECLARO QUE:

La tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente

Villahermosa, Tabasco a 2 de Julio 2025

Nombre y Firma:



Jesús Ramón Cantarell Fernández

# ELECTRODEPÓSITO DE PELÍCULAS DE ZnO PARA APLICACIÓN EN VÁLVULAS DE COBRE, COMO INHIBIDOR DE CORROSIÓN

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

ÍNDICE DE SIMILITUD

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Internet	97 palabras — 3%
2	<a href="http://www.repositorioinstitucional.uson.mx">www.repositorioinstitucional.uson.mx</a> Internet	51 palabras — 1%
3	<a href="http://rinfi.fi.mdp.edu.ar">rinfi.fi.mdp.edu.ar</a> Internet	42 palabras — 1%
4	<a href="http://www.nanoujat.org">www.nanoujat.org</a> Internet	40 palabras — 1%
5	<a href="http://repositorio.uam.es">repositorio.uam.es</a> Internet	22 palabras — 1%
6	<a href="http://revistas.uide.edu.ec">revistas.uide.edu.ec</a> Internet	22 palabras — 1%
7	<a href="http://upc.aws.openrepository.com">upc.aws.openrepository.com</a> Internet	22 palabras — 1%
8	<a href="http://grupomontevideo.org">grupomontevideo.org</a> Internet	12 palabras — 1%
9	<a href="http://repositorio.uta.edu.ec">repositorio.uta.edu.ec</a> Internet	12 palabras — < 1%
10		11 palabras — < 1%



COORDINACIÓN DE ESTUDIOS TERMINALES

*[Handwritten signature]*



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura**



**DIRECCIÓN**

**OFICIO:** DAIA/DIR/CD/0939/2025  
**FECHA:** 27 de junio de 2025.  
**ASUNTO:** Autorización de Impresión Definitiva.

**C. JESÚS RAMÓN CANTARELL FERNÁNDEZ**  
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN  
INGENIERÍA QUÍMICA  
P R E S E N T E.

En virtud de haber elaborado el trabajo recepcional para obtener el Título de Licenciatura en INGENIERÍA QUÍMICA, bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido dirigido por el DR. RAFAEL TORRES RICARDEZ y el DR. BRAYAN LEONARDO PÉREZ ESCOBAR, titulado:

**"ELECTRODEPOSITO DE PELÍCULAS DE ZnO PARA APLICACIÓN EN VÁLVULAS DE COBRE, COMO INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN".**

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen profesional.

Asimismo, le informo que en el artículo 113, del Capítulo IV, de nuestro Reglamento de Titulación vigente, a la letra dice:

*"Una vez emitido el oficio de autorización de impresión del Trabajo Recepcional por la Dirección de la División Académica correspondiente, el egresado tendrá un plazo máximo de seis meses para efectos de presentar el Examen Profesional. En caso contrario, podrá optar por la misma u otra modalidad que señale el presente Reglamento, llevando a cabo los trámites correspondientes".*

Sin otro particular por el momento, me despido deseándole éxito en su carrera profesional.

**ATENTAMENTE**

**DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
DIRECTORA



**DIRECCIÓN**

C.c.p. Archivo-INGENIERÍA QUÍMICA-329  
DRA' DMFM/M' LHC



Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda  
C.P.86690 Cunduacán, Tabasco  
Tel. (993) 358 75 00 Ext. 6752  
direccion.daia@ujat.mx

www.ujat.mx



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



2025  
AÑO DE LA  
Mujer  
Indígena

## DIRECCIÓN

## MEMORANDO

**PARA:** DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ  
DIRECTORA DE LA DAIA.  
**DE:** COMISIÓN REVISORA DE TRABAJO RECEPCIONAL  
**FECHA:** 11 DE JUNIO DE 2025  
**ASUNTO:** ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEFINITIVA DE TRABAJO RECEPCIONAL  
**CCP:** ARCHIVO.  
**MEM/CET/329/ID329/2025**

PRESENTE.

En cumplimiento a lo estipulado en el Art. 112 del Reglamento de Titulación aplicable, y después de revisar el Trabajo Recepcional denominado:

**"ELECTRODEPOSITO DE PELÍCULAS DE ZnO PARA APLICACIÓN EN VÁLVULAS DE COBRE, COMO INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN"**

Desarrollado por el C. JESÚS RAMÓN CANTARELL FERNÁNDEZ de la Licenciatura en INGENIERÍA QUÍMICA bajo la modalidad de "Tesis", le comunicamos que aceptamos la impresión final de dicho trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN REVISORA

**DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERÁZ**

Revisor

**DR. ERIK RAMÍREZ MORALES**

Revisor

**DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ**

Revisor

**DRA. MARÍA FERNANDA GARCÍA MENDOZA**

Revisor

**M.C. YURIDIA EVELÍN HERNÁNDEZ**

**CARDEÑO**

Revisor

**DR. RAFAEL TORRES RICARDEZ**

Director de Trabajo Recepcional

**DR. BRAYAN LEONARDO PÉREZ ESCOBAR**

Co-Director de Trabajo Recepcional

## Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 2 de Julio del 2025.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada: Electrodeposición de películas de ZnO para aplicación en válvulas de cobre, como inhibidor de la corrosión.

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100 % la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos; por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la universidad.

### COLABORADORES



Jesús Ramón Cantarell Fernández

### EGRESADO



Dr. Rafael Torres Ricárdez

### TESTIGOS



Dr. Brayan Leonardo Pérez Escobar

## Dedicatoria

A mis padres, cuya constancia, sacrificio y amor han sido faro en medio de la incertidumbre. A ustedes, papá y mamá, les debo no solo la vida, sino también el temple con el que he afrontado sus desafíos. Sus desvelos y esfuerzos no pasaron desapercibidos; fueron el cimiento sobre el cual se levantó este logro. Sin ustedes, nada de esto habría sido posible. Mis hermanos, compañeros de vida y testigos de mi camino. En sus palabras, en sus silencios y en su compañía encontré refugio, estímulo y equilibrio.

A mis tías, que sin buscar reconocimientos han estado ahí, firme, constante, con ese afecto que no exige, pero acompaña. Para mis abuelas, Genoveva y Raquel. A ti, abuela Genoveva, mi respeto y cariño por tu presencia serena. En especial, abuela Raquel, que ya no estás en este mundo, mi memoria te honra. Tu ausencia no borra tu influencia, pues quien vivió con virtud trasciende el tiempo.

Tony, doña Diana y don Gustavo, gracias por abrirme las puertas de su hogar, por ofrecerme descanso, alimento y afecto sincero. Su hospitalidad fue más que un acto amable: fue un gesto de nobleza que no olvido. De igual forma mis amigos Víctor, Jorge, Remedios, Melani, Lorenzo, Lilia, German, gracias por acompañarme en este largo viaje de estudio por estar siempre presentes en las buenas y en las no tan buenas que tuvimos durante este proceso. Y los demás amigos que hice en el camino que no alcanzo a mencionar.

También para la maestra Jessica de Dios Suarez gracias por ayudarme en la terminación de este trabajo, por transmitirme su sabiduría y su paciencia fueron virtudes claves que me apoyaron en terminar todo este proceso por el cual le estaré muy agradecido.

Y por último y no menos importante para mi mascota rocky que quiero y aprecio mucho a todos ustedes, les dedico este trabajo. No como una recompensa, sino como un reconocimiento a la virtud, al deber cumplido, y al valor de caminar juntos en la adversidad. De todo corazón, gracias.

## **Agradecimientos.**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, por darme la oportunidad de formarme académicamente en sus aulas. Esta institución no solo me brindó conocimientos, sino que también me permitió crecer personalmente, desafiándome a dar lo mejor de mí. Al Dr. Germán por su ayuda y consejos durante la elaboración de mi trabajo. Para el Dr. Rafael por abrirme las puertas del laboratorio y poder realizar la investigación presente de igual forma; al Dr. Brayan y mis compañeros de laboratorio por su ayuda en la elaboración de este presente proyecto.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Índice

Capítulo I. Introducción.....	1
1.1 Marco teórico.....	2
1.2 Justificación.....	5
1.3 Preguntas de investigación.....	5
1.4 Hipótesis.....	6
1.5 Objetivos generales.....	6
1.6 Objetivos específicos.....	6
1.7 Metodología.....	7
1.8 Cronograma de actividades.....	9
Capítulo II. Artículo científico.....	11
Referencias.....	15
Recomendaciones.....	17

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Relación de compuesto y tiempo en la limpieza de las muestras en un baño ultrasónico</i> .....	8
<b>Tabla 2</b> <i>Cronograma de actividades a realizar durante el proyecto</i> .....	10

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Capítulo I. Introducción.

Cuando un metal pierde electrones, generalmente experimenta un proceso de degradación, ya que dichos electrones se desprenden del átomo, lo que conduce a la formación de cationes o iones con carga positiva. No obstante, en una reacción electroquímica se establece un equilibrio, lo que implica que siempre habrá una reacción que compense a la otra (Ortiz et al., 2009).

De conformidad con lo expuesto, el óxido de zinc (ZnO) se considera un semiconductor ampliamente utilizado en dispositivos electrónicos, celdas solares y diodos emisores de luz (LED), debido a que presenta un ancho de banda de 3.2 eV a temperatura ambiente, característica que lo clasifica como un semiconductor de banda ancha (Tena, 2004).

De manera similar, es posible producir películas delgadas de ZnO mediante diversos métodos, como la electrodeposición electroquímica, los procesos *sol-gel*, la oxidación anódica, entre otros. El interés en este material radica en sus propiedades semiconductoras, ópticas y eléctricas, las cuales lo hacen atractivo para múltiples aplicaciones en campos como la optoelectrónica, la fotocatalisis, el tratamiento de aguas y las energías renovables, entre otros. Estas aplicaciones se fundamentan principalmente en la energía de banda prohibida del óxido de zinc y en su elevada energía de enlace de excitación.

Por esta razón, la mayoría de los semiconductores pertenecientes a los compuestos binarios del grupo II-VI cristalizan en una estructura hexagonal, en la cual cada anión está rodeado por cationes, o viceversa. El óxido de zinc puede presentar diversas estructuras cristalinas, entre las que se destacan la wurtzita (B4), la blenda de zinc (B3) y la sal de roca (B1). Al respecto, es importante destacar que la estructura de wurtzita es la fase termodinámicamente estable en condiciones ambientales. De tal modo, la estructura de blenda de zinc se estabiliza únicamente en crecimientos de estructuras cúbicas, mientras que la estructura de sal de roca se puede obtener a altas presiones (Nagar y Chakrabarti, 2017).

En ese sentido, es de suma importancia el estudio del compuesto de ZnO en forma de películas por medio de electrodeposición, con el fin de comprobar su factibilidad de obtención y, además, medir sus características anticorrosivas. Por lo tanto, se buscó evaluar las propiedades y aplicaciones de estas películas delgadas en la protección contra la corrosión.

### 1.1 Marco teórico

En este sentido, es importante señalar que el término "película fina" hace referencia, de manera general, a aquellas películas cuyo espesor oscila entre 0,1  $\mu\text{m}$  y aproximadamente 300  $\mu\text{m}$ , aunque esta definición no es estrictamente precisa. Esta denominación no suele aplicarse a recubrimientos más gruesos, como pinturas o barnices. Para que una película sea funcional, debe poseer ciertas propiedades, entre ellas: estabilidad química en el entorno de aplicación, buena adherencia al sustrato, espesor uniforme y baja densidad de imperfecciones (Elliott, 2005).

De tal manera, las técnicas de electrodeposición o deposición electroquímica se han estudiado ampliamente y consisten básicamente en sumergir dos electrodos en un baño químico que contiene iones. A través de este, se hace pasar una corriente eléctrica para entregar los iones del material deseado al objetivo de formar una película delgada uniforme. Mediante esta técnica, las variables controladas constituyen el tiempo de deposición, el voltaje (o corriente) y la concentración de la solución (Rodríguez et al., 2007).

De igual forma, se han investigado las propiedades termoluminiscentes (TL) de las formas dopadas y no dopadas de ZnO. Al respecto, cabe mencionar que el ZnO es muy sensible a los iones dopantes. Además, se observa que el dopaje con FTO en ZnO aumenta la estabilidad de conducción en las cargas atrapadas a temperaturas bajas. Por ende, estos estudios resaltan la importancia de la dopación en la manipulación y mejora de las propiedades de ZnO para aplicaciones potenciales en diversos campos tecnológicos (Ortiz et al., 2021).

Por ello cuando se menciona sobre la corrosión hablamos de un proceso que suele ser espontáneo el deterioro de materiales metálicos, inducido principalmente por reacciones electroquímicas con el medio circundante. En particular, el cobre, a pesar de su relativa nobleza, puede sufrir procesos corrosivos en ambientes agresivos que contienen cloruros, humedad o contaminantes industriales. Dichos procesos deterioran la integridad estructural, reducen su vida útil y comprometen su funcionalidad, especialmente en componentes industriales como las válvulas, que están en contacto constante con fluidos y agentes corrosivos. (Vázquez, 2003).

Para contrarrestar estos efectos, se han desarrollado múltiples estrategias de protección superficial, entre las que destacan los recubrimientos inorgánicos. Entre estos, los óxidos metálicos han demostrado ser materiales prometedores debido a su estabilidad química, adherencia, propiedades barreras y, en algunos casos, su capacidad para actuar como semiconductores, lo que amplía sus aplicaciones a sensores, fotocatalisis y optoelectrónica (Fontana, 1987).

El óxido de zinc (ZnO) es un material inorgánico tipo n con una amplia variedad de aplicaciones tecnológicas. Su estructura cristalina wurtzita, presenta propiedades ópticas, electrónicas y físico-químicas atractivas. Es un material termodinámicamente estable, no tóxico y con buena compatibilidad ambiental. Estas características lo convierten en una opción viable como recubrimiento protector contra la corrosión (Grinblat, 2015).

En el contexto de la protección metálica, el ZnO funciona como una barrera física que minimiza la interacción entre el metal y el medio ambiente, además de poder modificar la respuesta electroquímica del sustrato.

La formación controlada de películas de ZnO puede bloquear los sitios activos de corrosión, dificultar la migración de iones corrosivos y reducir la tasa general de degradación del material metálico subyacente.

Cuando se hable de electrodeposición se refiere a una técnica electroquímica ampliamente empleada para la fabricación de películas delgadas de materiales metálicos e inorgánicos sobre sustratos conductores. Se basa en la aplicación de una diferencia de potencial entre dos electrodos sumergidos en una solución electrolítica que contiene los iones metálicos a depositar.

En este proceso, los iones presentes en el electrolito se reducen y se adhieren a la superficie del cátodo, formando una capa sólida y homogénea. (Paunovic y Schlesinger, 2006).

En el caso específico del ZnO, la electrodeposición se lleva a cabo mediante la reducción catódica de especies precursoras, como el nitrato de zinc, en condiciones controladas de temperatura. Una ventaja importante de esta técnica es la posibilidad de controlar con precisión el espesor, la morfología y la orientación cristalina del recubrimiento mediante la variación de parámetros como el voltaje, el tiempo de deposición y la composición del electrolito.

La voltametría cíclica es una técnica fundamental en el estudio de procesos redox y de nucleación de películas delgadas. Consiste en aplicar una barrida lineal de potencial al sistema electroquímico y registrar la corriente generada. Esta técnica permite identificar las reacciones de reducción y oxidación, determinar la estabilidad del sistema y seleccionar el potencial óptimo para la electrodeposición. Por otro lado, la cronoamperometría consiste en aplicar un potencial constante durante un tiempo determinado y registrar la evolución de la corriente. Esta técnica permite estudiar la cinética del crecimiento de las películas y evaluar mecanismos de nucleación instantánea o progresiva (Bard & Faulkner, 2001).

Para evaluar la calidad y características de las películas depositadas, se emplearon diversas técnicas de caracterización estructural y superficial. Entre ellas; Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) esta técnica permite obtener imágenes topográficas de alta resolución a escala nanométrica. Se basa en la interacción entre una punta extremadamente fina y la superficie de la muestra. (Binnig et al., 1986).

Difracción de Rayos X (XRD) es una técnica analítica utilizada para identificar fases cristalinas y calcular parámetros estructurales como el tamaño de cristalita mediante la ecuación de Scherrer, nos ayuda a estudiar los minerales, compuestos y materiales presentes en muestras. (Aparicio Ceja & Carbajal Arizaga, 2010).

La eficiencia de una película protectora no depende únicamente de su composición química, sino también de su microestructura, espesor y adherencia al sustrato. Películas homogéneas, densas y con orientación cristalina preferencial presentan mayor resistencia a la penetración de agentes corrosivos. En este sentido, una adecuada combinación de condiciones de electrodeposición y parámetros experimentales permite optimizar estas características.

## 1.2 Justificación

Dada la importancia de proteger diversos materiales que presentan una amplia aplicación en distintos sectores, el cobre desempeña un papel crucial en múltiples áreas de la industria. En este contexto, la corrosión, si no es debidamente atendida, puede generar consecuencias tanto técnicas como económicas significativas.

Por esta razón, el uso de películas semiconductoras como inhibidores de corrosión representa una alternativa altamente prometedora, debido a sus propiedades anticorrosivas, así como a la relativa facilidad y bajo costo de su producción. Estas características podrían facilitar su implementación a gran escala.

En ese orden de ideas, la presente investigación contribuirá al conocimiento sobre la síntesis y caracterización de películas de ZnO, así como sobre su eficacia en la protección de materiales frente a procesos corrosivos.

## 1.3 Preguntas de investigación

- ° ¿Es posible obtener películas delgadas de ZnO mediante electrodeposición?
- ° ¿Qué propiedades estructurales y morfológicas presenta la película de ZnO obtenidas?
- ° ¿Cómo afecta la aplicación de películas de ZnO a la velocidad de corrosión de las válvulas de cobre?

## 1.4 Hipótesis

La inclusión de películas de óxido de zinc como recubrimiento, puede prolongar la vida útil de válvulas de cobre al prevenir o mitigar el deterioro causado por la corrosión.

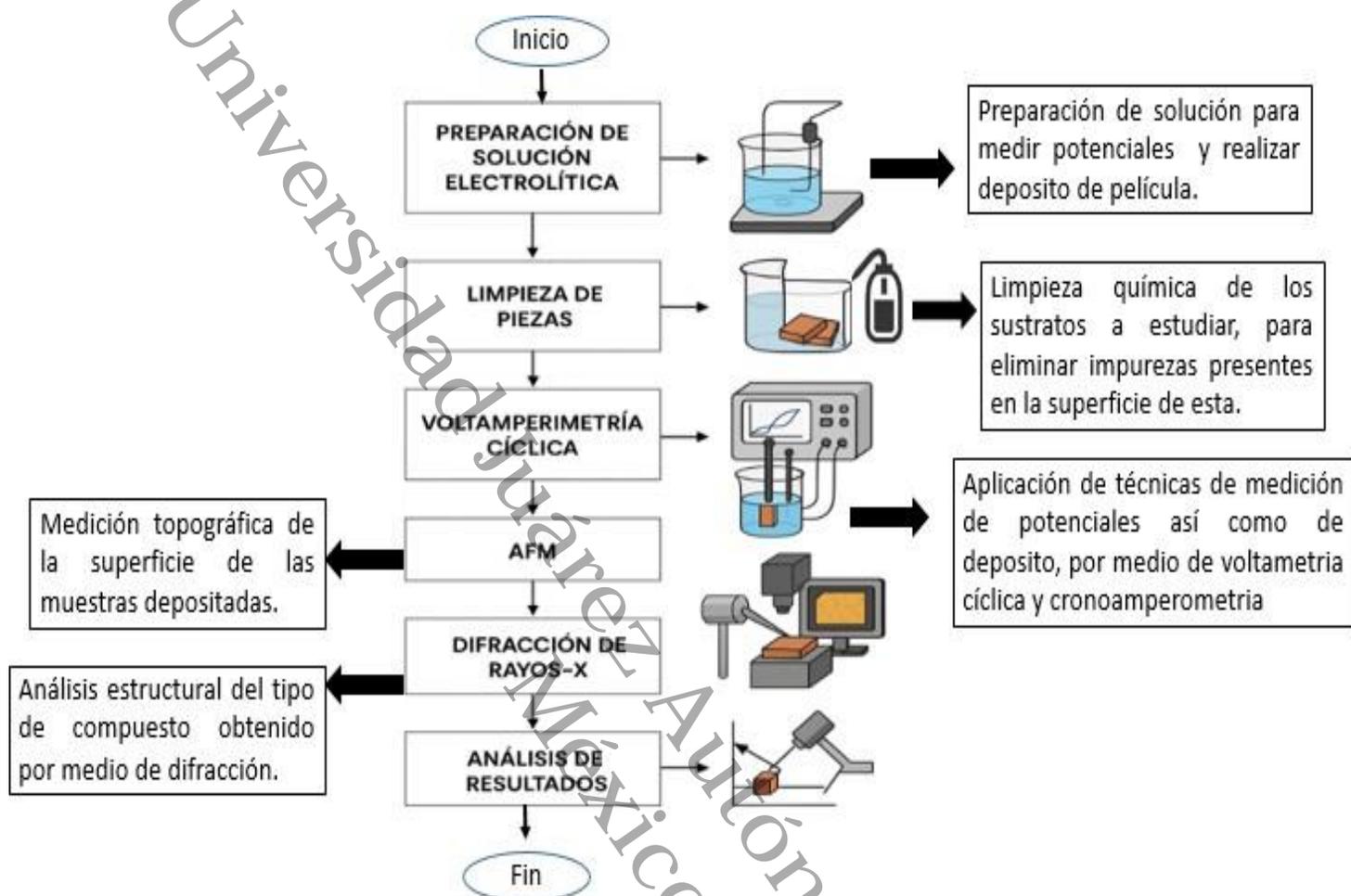
## 1.5 Objetivos generales

Evaluar el efecto anticorrosivo de las películas depositadas por cronoamperometría, con la finalidad de proteger las válvulas de cobre de la corrosión, aplicando métodos de medición de corrosión como lo es la polarización lineal y caracterización usando el AFM (Microscopio de fuerza atómica) así como difracción de rayos-X.

## 1.6 Objetivos específicos

- Determinar los potenciales de reducción de las especies químicas del ZnO mediante voltametría cíclica para depósito de este material en película delgada sobre sustratos de cobre comercial.
- Evaluar la velocidad de corrosión del ZnO sobre sustratos de cobre mediante resistencia de polarización para determinar los parámetros de corrosivos.
- Caracterizar las películas delgadas de ZnO obtenidas mediante pruebas estructurales, morfológicos y eléctricos para determinar el comportamiento del material en diferentes potenciales los cuales se le aplicarán al sistema.

## 1.7 Metodología



### Preparación de soluciones

Se realizó una solución de cloruro de sodio 0.1 M, citrato de sodio 0.25 M y acetato de zinc 0.05 M para una solución de 100 ml. Posteriormente, se midió el pH de la solución para usar un potencióstato- galvanostato de la marca Autolab modelo PGSTAT128N. Usando la técnica de caracterización de voltametría cíclica, se llevó a cabo la técnica de cronoamperometría con los valores ya encontrados en la voltametría cíclica para depositar (Díaz, 2018).

### Preparación de las muestras

Aunado a esto, se efectuó un tratamiento a las muestras con baños químicos, usando un baño ultrasónico de la marca Bran Sonic, modelo 2510, con una duración de 10 minutos en cada corrida con diferentes compuestos, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Relación de compuesto y tiempo en la limpieza de las muestras en un baño ultrasónico.*

<b>Compuesto</b>	<b>Tiempo (min)</b>
Acido clorhídrico.	10
Acetona	10
Alcohol isopropílico	10
Metanol	10

*Nota:* Todas las piezas fueron lavadas por separadas con cada compuesto.

Depósito de películas delgadas.

Una vez realizada la electrodeposición sobre el material de estudio, ya sea cobre o vidrio dopado, el sustrato se introdujo en un horno. En efecto, esta etapa tuvo como finalidad mejorar las propiedades del recubrimiento y eliminar posibles compuestos no deseados que puedan haberse generado durante el proceso de electrodeposición.

Tiempo: 60 Min Temperatura: 450 °C

Rampa de calentamiento: 9.4 °C/min

Se determinó la morfología de las muestras mediante dos técnicas de caracterización. La primera fue la microscopía de fuerza atómica (AFM), que permitió realizar un mapeo de la superficie del sustrato en estudio, generando una

imagen tridimensional de la muestra. La segunda técnica correspondió a la difracción de rayos X, la cual consistió en hacer incidir rayos X sobre la muestra experimental. Dependiendo de la interacción de los rayos con los átomos presentes, se obtuvo un patrón de difracción que permitió inferir la disposición atómica del material (Martínez et al., 2005).

Estudio de la corrosión electroquímica utilizando la resistencia de polarización, para estudiar la corrosión electroquímica de las muestras de cobre, se empleó la técnica de resistencia a la polarización (RP). Esta técnica permitió determinar la relación entre el potencial y la densidad de corriente en estado estacionario, mediante la aplicación de señales de corriente continua al sistema. A partir de las curvas de Tafel se determinó la velocidad de corrosión.

Las pruebas de RP se realizaron utilizando un sistema de tres electrodos. Asimismo, el electrodo de trabajo se compuso por las muestras de cobre. Un electrodo de referencia, que se utilizó el plata-cloruro de plata y un electrodo auxiliar de platino. Por otro lado, el sistema en general se controló mediante un Potenciostato/Galvanostato de la compañía Autolab, que utilizó el software Nova. Para determinar los parámetros de medición, se realizó un barrido de potencial en el rango de -1.1 V a -0.9 V con una velocidad de 1 mV/s.

Con esta medición, se determinó el potencial de corrosión del cobre, que posteriormente se utilizó para obtener las curvas de Tafel. Las curvas se generaron realizando un barrido de  $\pm 0.25$  V a partir de dicho potencial de corrosión, con el fin de determinar las pendientes de las curvas (Alfaro y Alfaro, 2017).

## **1.8 Cronograma de actividades**

El siguiente cronograma muestra las actividades realizadas y las próximas por realizar, con el objeto de cumplir en el tiempo estimado de 11 meses de actividad dentro del rango estipulado.

**Tabla 2**

*Cronograma de actividades a realizar durante el proyecto.*

Actividad	Me										
	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Revisión bibliográfica.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Determinación de los valores de reducción del vidrio de FTO por medio de la voltametría cíclica.		X	X	X	X		X	X			
Depósito de las películas de ZnO por medio de la cronoamperometría.				X	X	X	X	X		X	X
Caracterización de muestras por medio de microscopio de fuerza atómica (AFM).				X	X	X	X	X	X	X	X
Caracterización de muestras por medio de rayos-X.				X				X	X	X	X
Pruebas de polarización anódica								X	X	X	X

## Capítulo II. Artículo científico

### Anexo 5 Nombre del Artículo:

**Electrodeposición de películas de ZnO para aplicación en válvulas de cobre, como inhibidor de la corrosión.**

#### **Autores:**

Jesús Ramón Cantarell Fernández. Rafael Torres Ricárdez.

Brayan Leonardo Pérez Escobar.

**Resumen:** Películas de ZnO fueron depositadas mediante electrodeposición sobre sustratos metálicos de cobre para evaluar su potencial como inhibidores de corrosión. El estudio empleó técnicas electroquímicas tanto para el proceso de deposición como para el análisis de resistencia a la corrosión. Los ensayos se realizaron utilizando un potenciostato-galvanostato, complementado con equipos de caracterización morfológica como microscopía de fuerza atómica (AFM) así como los rayos-X que nos dan una imagen del compuesto obtenido como de su composición. Adicionalmente, se realizaron ensayos electroquímicos para cuantificar la resistencia a la corrosión de los recubrimientos, simulando condiciones ambientales adversas. Los resultados demostraron que las películas de ZnO actúan como una barrera efectiva contra la degradación del sustrato de cobre.

**Palabras Clave:** Voltamperograma, Celda Electroquímica, Voltametría cíclica.

#### **Institución de adscripción de cada autor:**

Universidad Juárez Autónoma De Tabasco.

**Por enviar en:** Revista- Divulgación de Ciencia y Educación.

**Nombre de la Editorial:** Redicye

**Fecha de envío o Fecha de publicación:** 10/03/2025

# ELECTRODEPOSITO DE ZnO SOBRE SUBSTRATOS DE COBRE, COMO INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN

Jesús Ramón Cantarell Fernández<sup>1</sup>, Rafael Torres-Ricardez<sup>1\*</sup>, Brayan Leonardo, Pérez -Escobar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km 1, Col. La Esmeralda CP. 86690 Cunduacán, Tabasco

## Introducción

Ciertos materiales experimentan cambios en sus propiedades físicas o metalúrgicas cuando se expone a condiciones específicas. Un ejemplo notable es el cobre, cuyas características visuales y conductividad eléctrica se ven afectadas por procesos de corrosión. Esta problemática ha impulsado el desarrollo de técnicas anticorrosivas, entre las que destacan métodos electroanalíticos como la **voltametría cíclica** y la **cronoamperometría**. [1]

El objetivo principal de este estudio consiste en analizar muestras de material y generar una película protectora sobre las mismas para evaluar el grado de corrosión, se empleó la técnica de polarización lineal utilizando un potenciostato-galvanostato. Este equipo especializado cuenta con software integrado que permite realizar las pruebas, generando como resultado **voltamperogramas** y **cronoamperogramas** característicos de cada técnica.[2]

La investigación se llevó a cabo siguiendo normas ASTM estandarizadas °ASTM G1-03: para limpieza adecuada de muestras. °ASTM G5-94: menciona a la preparación correcta del material de interés. °ASTM G59-97: sobre la preparación y medición de soluciones.[3]

## Preparación de sustratos

Inicialmente, se realiza la limpieza de los materiales utilizados como los sustratos. Para determinar los potenciales de depósito se utilizaron vidrios conductores dopados con FTO (óxido de estaño dopado con flúor) y para los depósitos láminas de cobre comercial tipo latón forjado (C37700). Antes de su reutilización debieron de someterse a un proceso de limpieza utilizando: alcohol isopropílico, etanol, acetona y ácido clorhídrico. Esto con la finalidad de eliminar cualquier impureza que se pudiera dar al momento de manipular la muestra de vidrio, así como los residuos que llegaran a generarse posterior de cada prueba.[4]

## Potenciales de depósito

La técnica de voltametría cíclica se utilizó con la finalidad de determinar los potenciales de depósito del ZnO. La figura.1, muestra una curva característica de reducción de este material. Se determinó potenciales en el rango de 1.5 a 1.9 V. teniendo picos característicos de reducción y de oxidación de este compuesto.

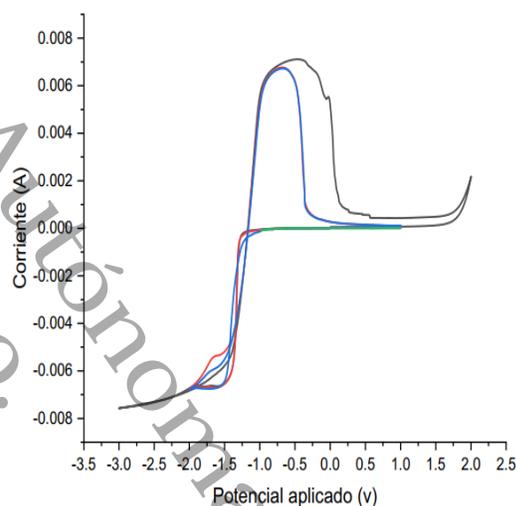


Figura 1. El rango de polaridad aplicada varió desde -3.5 V hasta 2.5 V. Los picos de reducción observados corresponden a las reacciones electroquímicas del ZnO en el medio estudiado.

## Depósito de ZnO

Para realizar los depósitos del ZnO se utilizan los potenciales de 1.5, 1.7 y 1.9 V utilizando la técnica de la cronoamperometría, ayudados de una celda electroquímica de tres electrodos al cual se encontraba conectado a un potenciostato galvanostato. La figura 2, muestra la curva generada por la técnica.

En esta parte en el sustrato se debe ser notorio la aparición de una película, en algunos casos de forma blanca lechosa debido a la presencia del ZnO depositado.

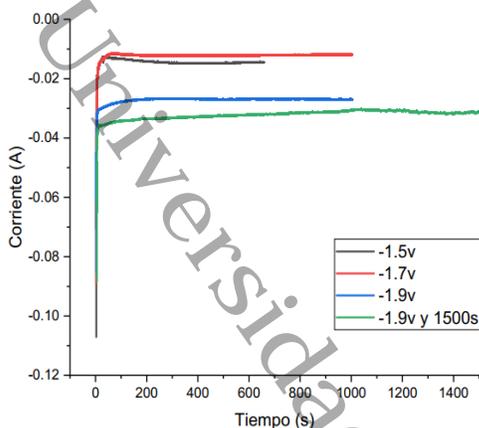


Figura 2. Valores de corriente oscilaron entre 0.00 y 0.12 unidades, registrados en intervalos de tiempo desde 0 hasta 1400 s. correspondiente a la cronoamperometría

### Polarización lineal.

Los valores de potencial aplicado indican como se corroe el sustrato, utilizando un medio conductor en este caso una solución de cloruro de sodio para hacer la medición e indicarnos con la tasa de corrosión que tan rápido se deteriora, como se muestra en la figura 3. Se utilizó como referencia cobre sin recubrir para obtener una diferencia más clara al momento de utilizar la muestra con la película obtenida (muestra de -1.9V).

Muestra	E (v)	J corriente (A/cm <sup>2</sup> )	Tasa de corrosión (mm/año)	Resistencia a la polarización (Ω)
Cobre	-0.204	1.75x10 <sup>-6</sup>	0.041	2662
-1.9v	-0.259	1.19x10 <sup>-6</sup>	0.028	7811

Figura 3. Existe una mejoría al momento de comparar el cobre recubierto con el cobre desnudo, debido que la película disminuye la tasa de corrosión a 0.028 mm/año.

### Medición de rayos-X.

Se utilizaron para medir la composición elemental del compuesto que tenemos depositado en la muestra, mostrándonos por medio de la estructura de esta, el tipo de material con el cual se cuenta como se muestra en la figura 4. Donde se logra apreciar la presencia de ZnO dándonos una estructura hexagonal, con un tamaño de grano de 165.6 angstrom siendo idoneo para la formación de película.

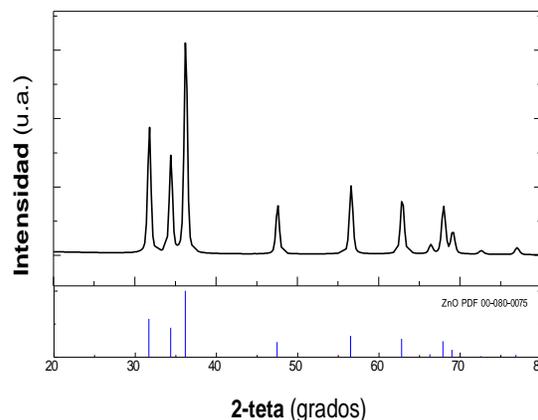


Figura 4. Rayos-X muestran presencia de ZnO demostrando que no existe presencia de algún compuesto no deseado.

### Microscopio de Fuerza Atómica.

Análisis superficial comparativo del cobre polarizado a -1.9 V: A la izquierda, se observa el cobre recubierto con un depósito homogéneo en forma de capas, resultado del tiempo controlado de exposición durante el proceso de deposición. A la derecha, el cobre sin recubrir presenta aglomeraciones irregulares y superficies rugosas, indicativas de imperfecciones o corrosión no mitigada. Estas diferencias morfológicas confirman el efecto protector del recubrimiento aplicado, al inhibir la formación de defectos y promover una estructura más uniforme. Figura 5

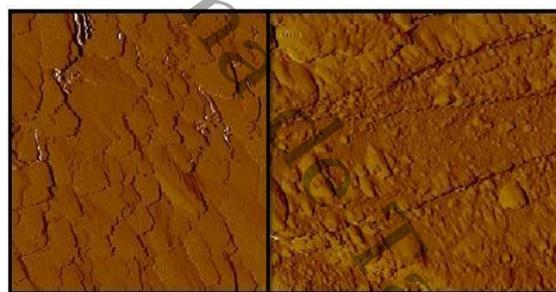


Figura 5. Las imperfecciones suelen ser visible en las imágenes proporcionadas por el AFM como es en este caso, donde nos muestras diferencias notorias.

### Conclusiones

La obtención de películas mediante electrodeposición requiere de un control riguroso de los parámetros electroquímicos, siendo la cronoamperometría una técnica clave al permitir la aplicación de un potencial constante que favorezca una nucleación homogénea y un crecimiento controlado en las

capas de esta misma. Sin embargo durante la formación se presentaron defectos superficiales como aglomeraciones o irregularidades morfológicas, puede originarse en condiciones no ideales de deposición, como tiempos excesivos, inestabilidad en el potencial aplicado o heterogeneidades en la superficie de sustrato. Por eso mismo la caracterización topográfica con el Microscopía de Fuerza Atómica. (AFM) esto nos permite cuantificar parámetros como la rugosidad media y la distribución de partículas, lo cual es fundamental para evaluar la uniformidad del recubrimiento. Complementariamente, el análisis estructural se elaboró con Difracción de Rayos X (XRD) posibilita la identificación de fases cristalinas presentes y su grado de cristalinidad, permitiendo correlacionar la estructura interna con la calidad del depósito. Por otro lado, la voltametría cíclica ofreció información sobre los procesos redox involucrados en la formación de la película y sobre su comportamiento electroquímico los cuales los valores encontrados se pudieron aplicar en la cronoamperometría para obtener la película deseada.

La integración de estas técnicas proporciona una visión integral de la morfología, estructura y comportamiento electroquímico del sistema. Permittiéndonos ajustar de forma precisa las condiciones de deposición para obtener películas de óxido de zinc con propiedades óptimas para su función como barrera anticorrosiva.

**Palabras claves:** Microscopía de fuerza atómica, electrodeposición, Sustrato de cobre.

#### **Lecturas recomendadas.**

1\* Cherubin, A. (2024). Síntesis y aplicación de compuestos con potencial efecto inhibidor en la corrosión de acero.

2\* Hernández, A. G., & Karthik, T. V. K. (2018). Microscopía de fuerza atómica para el análisis de materiales. TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río

3\* Menéndez, S. B. (2022). Deposición por baño químico de películas de óxido de zinc para su aplicación como

ventanas transparentes y conductoras en celdas solares de película delgada (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería. Argentina).

4\* Torres, F. D. C. G., López, J. L. C., Rodríguez, A. S. L., Hernández, G. P., & Flores, L. L. D. (2021). Emisión y defectos de nanoestructuras de películas delgadas de ZnO y ZnO-Cu obtenidas a baja temperatura. *Matéria* (Rio de Janeiro), 26(04), e13107

## Referencias

- Alfaro, M., & Alfaro, I. (2017). Construcción de un potenciostato de bajo costo para estudios de inhibición de corrosión de acero: determinación del potencial de corrosión y mediciones cronoamperométricas. *Educación Química*, 28(4), 269-274.
- Aparicio Ceja, M. E., & Carbajal Arizaga, G. G. (2010). Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 3(2), 62-72.
- Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications* (2nd ed.).
- Binnig, G., Quate, C. F., & Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. *Physical Review Letters*.
- Díaz, D. J. (2018). Caracterización electroquímica de películas de óxido de zinc obtenidas por anodizado en medio alcalino. *Revista de Ingeniería y Tecnología. Materia (Rio J.)*, 23. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0397>
- Elliott, P. (2005). Gallery of corrosion damage. En *ASM Handbook* (Vol. 13B: Corrosion: Materials, pp. 631-646). ASM International.
- Fontana, M. G. (1987). *Corrosion Engineering* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
- Grinblat, G. S. (2015). Nanoestructuras semiconductoras de ZnO: fabricación, estudio y optimización de propiedades ópticas lineales y no lineales.
- Malle, E., & Mellikov, E. (1995). *Películas delgadas de óxido de zinc por el método de pirólisis por aspersión*. s/e.
- Martínez, W. M., Fernández, A. M., & Cano, U. (2005). Caracterización estructural y electroquímica de electrodos de Ni:Zn:S obtenidos por electrodeposición y baño químico para su empleo en electrolizadores alcalinos. *Superficies y Vacío*, 18(2), 14-19.

- Nagar, S., & Chakrabarti, S. (2017). *Optimization of ZnO thin films*. Springer.
- Ortiz, A., García, M., Cruz-Zaragoza, E., & Gómez- Aguilar, R. (2021). Characterization and thermoluminescence study of gamma irradiated Tb-doped ZnO and undoped ZnO synthesized by spray pyrolysis method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 13(27). <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2877>.
- Ortiz, J. L., Manzano, A., Olvera, O., & Pérez, M. A. (2009). Principios básicos de corrosión y sus prácticas en el laboratorio. Limusa.
- Paunovic, M., & Schlesinger, M. (2006). *Fundamentals of Electrochemical Deposition* (2nd ed.). John Wiley & Sons
- Rodríguez, B., Hernández Santaella, L. T., & José, J. O. (2007). Desarrollo de un recubrimiento electrolítico estaño-cobalto alternativo mediante la aplicación de técnicas de manipulación de corriente. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 11(43). [https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212007000200003&script=sci\\_abstract](https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212007000200003&script=sci_abstract)
- Tena, R. (2004). *El óxido de zinc: crecimiento cristalino mediante transporte en fase gaseosa y caracterización de propiedades físicas*. <https://core.ac.uk/reader/70998323>
- Vázquez, M. (2003). *La corrosión: causas, consecuencias y prevención*. Fondo de Cultura Económica.

## Recomendaciones

- Se debe mantener especial cuidado al manipular las muestras de cobre, dado que el contacto directo con las manos puede generar contaminación y afectar las mediciones. Por ello, es indispensable manipularlas siempre con guantes y, de ser posible, manipularlas con pinzas.
- Evitar cambios bruscos de temperatura en las muestras de vidrio FTO, debido a que esto puede provocar fracturas en la parte conductora. Asimismo, no se debe utilizar ningún tipo de ácido para su limpieza química.
- Para cada técnica, se debe evitar reutilizar las mismas soluciones. Se recomienda encarecidamente cambiarlas entre pruebas y lavar las celdas electroquímicas después de cada uso.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

<b>Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional</b>	
<b>Título de la Tesis:</b>	ELECTRODEPÓSITO DE PELÍCULAS DE ZnO PARA APLICACIÓN EN VÁLVULAS DE COBRE, COMO INHIBIDOR DE CORROSIÓN.
<b>Autor de la Tesis:</b>	JESÚS RAMÓN CANTARELL FERNANDEZ.
<b>ORCID:</b>	<a href="https://orcid.org/0009-0000-0772-8254">https://orcid.org/0009-0000-0772-8254</a>
<b>Resumen de la Tesis:</b>	<p>Películas de ZnO fueron depositadas mediante electrodeposición sobre sustratos metálicos de cobre para evaluar su potencial como inhibidores de corrosión. El estudio empleó técnicas electroquímicas tanto para el proceso de deposición como para el análisis de resistencia a la corrosión. Los ensayos se realizaron utilizando un potencióstato-galvanostato, complementado con equipos de caracterización morfológica como microscopía de fuerza atómica (AFM) así como los rayos-X que nos dan una imagen del compuesto obtenido, así como de su composición. Adicionalmente, se realizaron ensayos de polarización lineal para cuantificar la resistencia a la corrosión de los recubrimientos, simulando condiciones ambientales adversas.</p>
<b>Palabras claves de la Tesis:</b>	Voltamperograma, Celda Electroquímica, Voltametría cíclica.
<b>Referencias Citadas:</b>	<p>°Alfaro, M., &amp; Alfaro, I. (2017). Construcción de un potencióstato de bajo costo para estudios de inhibición de corrosión de acero: determinación del potencial de corrosión y mediciones cronoamperométricas. <i>Educación Química</i>, 28(4),269-274.</p> <p>°Aparicio Ceja, M. E., &amp; Carbajal Arizaga, G. G. (2010). Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. <i>Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología</i>, 3(2), 62-72.</p> <p>° Bard, A. J., &amp; Faulkner, L. R. (2001). <i>Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications</i> (2nd ed.).</p> <p>° Binnig, G., Quate, C. F., &amp; Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. <i>Physical Review Letters</i>.</p>

	<p>° Díaz, D. J. (2018). Caracterización electroquímica de películas de óxido de zinc obtenidas por anodizado en medio alcalino. <i>Revista de Ingeniería y Tecnología. Materia (Rio J.)</i>, 23. <a href="https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0397">https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0397</a>.</p> <p>° Elliott, P. (2005). Gallery of corrosion damage. En <i>ASM Handbook</i> (Vol. 13B:Corrosion: Materials, pp. 631-646). ASM International.</p> <p>° Fontana, M. G. (1987). <i>Corrosion Engineering</i> (3rd ed.). McGraw-Hill Education.</p> <p>° Grinblat, G. S. (2015). Nanoestructuras semiconductoras de ZnO: fabricación, estudio y optimización de propiedades ópticas lineales y no lineales.</p> <p>° Malle, E., &amp; Mellikov, E. (1995). <i>Películas delgadas de óxido de zinc por el método de pirólisis por aspersión</i>. s/e.</p> <p>° Martínez, W. M., Fernández, A. M., &amp; Cano, U. (2005). Caracterización estructural y electroquímica de electrodos de Ni:Zn:S obtenidos por electrodeposición y baño químico para su empleo en electrolizadores alcalinos. <i>Superficies y Vacío</i>, 18(2), 14-19.</p> <p>° Nagar, S., &amp; Chakrabarti, S. (2017). <i>Optimization of ZnO thin films</i>. Springer.</p> <p>° Ortiz, A., García, M., Cruz-Zaragoza, E., &amp; Gómez- Aguilar, R. (2021). Characterization and thermoluminescence study of gamma irradiated Tbdoped ZnO and undoped ZnO synthesized by spray pyrolysis method. <i>Journal of Materials Science: Materials in Electronics</i>, 13(27).<a href="https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2877">https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2877</a></p> <p>° Ortiz, J. L., Manzano, A., Olvera, O., &amp; Pérez, M. A. (2009). Principios básicos de corrosión y sus prácticas en el laboratorio. Limusa.</p> <p>° Paunovic, M., &amp; Schlesinger, M. (2006). <i>Fundamentals of Electrochemical Deposition</i> (2nd ed.). John Wiley &amp; Sons.</p>
--	---

	<p>° Rodríguez, B., Hernández Santaella, L. T., &amp; José, J. O. (2007). Desarrollo de un recubrimiento electrolítico estaño-cobalto alternativo mediante la aplicación de técnicas de manipulación de corriente. <i>Universidad, Ciencia y Tecnología</i>, 11(43). <a href="https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212007000200003&amp;script=sci_abstract">https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212007000200003&amp;script=sci_abstract</a>.</p> <p>° Tena, R. (2004). <i>El óxido de zinc: crecimiento cristalino mediante transporte en fase gaseosa y caracterización de propiedades físicas</i>. <a href="https://core.ac.uk/reader/70998323">https://core.ac.uk/reader/70998323</a>.</p> <p>° Vázquez, M. (2003). <i>La corrosión: causas, consecuencias y prevención</i>. Fondo de Cultura Económica.</p>
--	--

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.