Ingeniería Investigación y Tecnología
Volume XXVII (Issue 1), January-March 2026 1-11
ISSN 2594-0732 FI-UNAM Peer-reviewed article
Article information: Received: February 20, 2025, accepted: November 24, 2025.
Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) license
https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2026.27.1.008

Diseño de proceso de electro-recubrimiento de electrodos con níquel utilizados en electrólisis alcalina

Design of electroplating process for nickel electrodes used in alkaline electrolysis

Meza-Juárez, Alan Axel (Corresponding author)
Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Azcapotzalco
E-mail: amezaj1500@alumno.ipn.mx
https://orcid.org/0009-0005-0528-9629

Sandoval-Pineda, Juan Manuel
Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Azcapotzalco
E-mail: jsandovalp@ipn.mx
https://orcid.org/0000-0002-6529-7920

González-Huerta, Rosa de Guadalupe
Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE)
E-mail: rgonzalezh@ipn.mx
https://orcid.org/0000-0002-6016-4723

Moreno-Soriano, Roberto
Instituto Politecnico Nacional
Escuela Superior de Fisica y Matematicas
E-mail: beto.mec@outlook.es
https://orcid.org/0000-0002-5599-5178

Davila-Diaz, Alejandro
Instituto Politecnico Nacional
Escuela Superior de Ingenieria Mecanica y Electrica Azcapotzalco
E-mail: adavilad@ipn.mx
https://orcid.org/0009-0003-9788-0525

Resumen

En este artículo se muestran los resultados obtenidos del desarrollo del proceso de recubrimiento de níquel sobre la superficie de electrodos planos de acero inoxidable 304 (SS 304), utilizados para la obtención de gas Oxihidrógeno por electrólisis alcalina, siendo los electrodos la parte fundamental de un electrolizador. Este proyecto se plantea debido a que el SS 304 bajo estas condiciones genera cromo hexavalente, el cual es un compuesto completamente tóxico y sumamente dañino que se genera cuando se aplica un potencial mayor a 1.4 V en el ánodo. El proceso de recubrimiento consta de tres pasos: a) Baño de limpieza, que elimina polvo y grasa del metal, b) Baño Wood, donde se aplica una ligera capa de níquel para mejorar la adhesión sobre el acero inoxidable, c) Deposición de níquel, empleando el método de Watts para aplicar capas de níquel metálico hasta 80 micras. El proceso es controlado mediante las variables de temperatura, agitación y densidad de corriente, y se apoya en un sistema electromecánico que automatiza las etapas principales, reduciendo los tiempos de operación y mejorando la seguridad del operario. Cada electrodo recibe cuatro capas de níquel: Las tres primeras son homogéneas (de 20 μm cada una), mientras que la última se realiza con variaciones en temperatura y agitación para obtener una superficie porosa y así incrementar el área activa del electrodo. Se ensayó un lote de 10 electrodos de acero inoxidable, en cinco de ellos se aumentó la temperatura del baño a 75 °C, obteniendo recubrimientos con macroporos y un mejor anclaje del níquel trabajando una densidad de corriente entre 0.1 y 0.15 A/cm^2. En las otras cinco muestras, al variar únicamente la densidad de corriente entre 0.1 y 0.15 A/cm^2, se lograron depósitos más uniformes y libres de poros. Los resultados muestran que el control de las variables de proceso permite ajustar la morfología del recubrimiento, logrando superficies porosas o lisas según el requerimiento. Se concluye que el método propuesto incrementa la eficiencia del electrolizador y mejora la seguridad y reproducibilidad del proceso de niquelado, ofreciendo una alternativa de bajo costo frente al uso de electrodos de níquel puro.
Descriptores: Electrólisis alcalina, electro recubrimiento de níquel, oxihidrógeno, APQP, cromo hexavalente.

Abstract

This article presents the results obtained from the development of the nickel coating process on the surface of flat 304 stainless steel (SS 304) electrodes used to obtain oxyhydrogen gas by alkaline electrolysis, the electrodes being the fundamental part of an electrolyzer. This project was proposed because SS 304 under these conditions generates hexavalent chromium, which is a completely toxic and extremely harmful compound that is generated when a potential greater than 1.4 V is applied to the anode. The coating process consists of three steps: a) Cleaning bath, which removes dust and grease from the metal, b) Wood bath, where a light layer of nickel is applied to improve adhesion to stainless steel, c) Nickel deposition, using the Watts method to apply layers of metallic nickel up to 80 microns. The process is controlled by temperature, agitation, and current density variables, and is supported by an electromechanical system that automates the main stages, reducing operating times and improving operator safety. Each electrode receives four layers of nickel: the first three are homogeneous (20 μm each), while the last is applied with variations in temperature and agitation to obtain a porous surface and thus increase the active area of the electrode. A batch of 10 stainless steel electrodes was tested, in five of which the bath temperature was increased to 75 °C, obtaining coatings with macropores and better nickel anchoring by working at a current density between 0.1 and 0.15 A/cm^2. In the other five samples, by varying only the current density between 0.1 and 0.15 A/cm^2, more uniform and pore-free deposits were achieved. The results show that controlling the process variables allows the morphology of the coating to be adjusted, achieving porous or smooth surfaces as required. It is concluded that the proposed method increases the efficiency of the electrolyzer and improves the safety and reproducibility of the nickel plating process, offering a low-cost alternative to the use of pure nickel electrodes.
Keywords: Alkaline electrolysis, nickel electroplating, oxyhydrogen, APQP, hexavalent chromium.

Introducción

Dentro del proceso de electrolisis alcalina, los electrodos son componentes fundamentales en el proceso de descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno presentando un costo de aproximadamente 50 % de los electrolizadores alcalinos, como se muestra en la Figura 1.

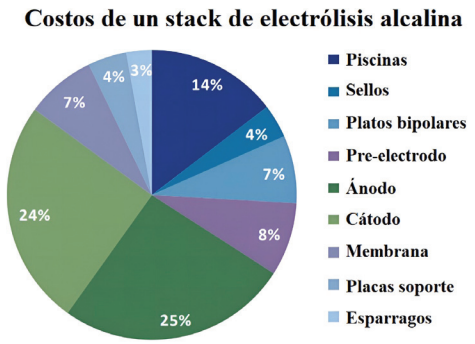

Figura 1. Costos de un ensamble de electrólisis alcalina.

Básicamente, una celda electrolítica consiste en dos electrodos (cátodo y ánodo) donde se producen las reacciones electroquímicas, una corriente eléctrica proveniente de una fuente de poder de un electrolito cierra el circuito como se muestra en la Figura 2, (Alcaraz *et al.*, 2023).

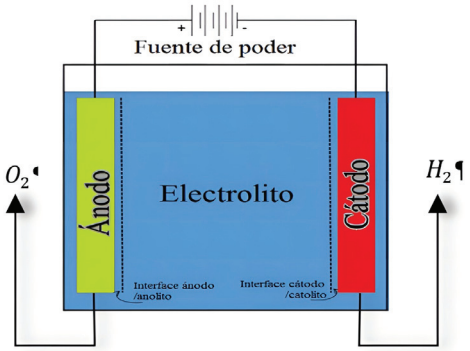

Figura 2. Componentes básicos de una celda electrolítica (Bertuccioli *et al.*, 214).

Este tipo de electrolisis se lleva a cabo mediante la aplicación de una corriente eléctrica en una solución alcalina, generalmente hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH), debido a su alta conductividad iónica. En el ánodo se produce la oxidación del agua, libera oxígeno, mientras que el cátodo, donde ocurre la reducción, se libera hidrógeno, siendo su fórmula estequiométrica la siguiente (Bertuccioli *et al.*, 214):

Reacción en el ánodo: $2OH \rightarrow H_2O + ½\, O_2 + 2e$

Reacción en el cátodo: $H_2O + 2e \rightarrow H_2 + 2OH$

Al trabajar en un ambiente altamente alcalino y con temperaturas que oscilan de entre los 60º y 80º Celsius, es importante que los electrodos se fabriquen de materiales resistentes a la corrosión y posean una alta actividad catalítica, destacando entre ellos materiales tales como; el níquel, acero inoxidable o platino (Ursua *et al.*, 2012).

La eficiencia y durabilidad de estos electrodos son factores determinantes en la viabilidad comercial de la producción de hidrógeno como fuente de energía limpia. Innovaciones recientes se centran en mejorar los materiales de los electrodos para aumentar la eficiencia y reducir los costos operativos. Por lo cual, se hace uso de la técnica de galvanoplastia para el niquelado de electrodos. Siendo la galvanoplastia un proceso electroquímico mediante el cual se deposita un metal sobre una pieza conductora para mejorar su apariencia o proporcionar propiedades específicas. El proceso básico de galvanoplastia implica sumergir la pieza que se va a recubrir (llamada cátodo) y un electrodo de metal (ánodo) en una solución electrolítica que contiene iones del metal que se depositará. Al aplicar una corriente eléctrica continua, los iones del metal se reducen en la superficie de la pieza, formando una capa metálica delgada y adherente (Cavaliere & Perrone, 2021). Los procesos de galvanoplastia se dividen en dos: Electroformación de láminas para moldes y revestimientos de protección o decoración.

En función de lo anterior, el objetivo de este estudio es diseñar y validar un proceso de manufactura que permita modificar la superficie de electrodos de acero inoxidable mediante recubrimientos de níquel obtenidos por galvanoplastia, con el fin de mejorar su desempeño en la electrólisis alcalina. El alcance del trabajo se centra en el análisis de variables clave (como temperatura, densidad de corriente y agitación del baño) para determinar las condiciones óptimas de deposición que garanticen recubrimientos homogéneos, con buena adherencia y mayor área activa. Este estudio no aborda la síntesis de nuevos materiales ni la evaluación electroquímica detallada de los electrodos, sino que se enfoca en la optimización del proceso de niquelado dentro de un entorno controlado, a nivel de planta piloto. Las líneas de procedimiento descritas a continuación corresponden a la fase experimental y metodología empleada en el desarrollo del proyecto.

Materiales y métodos

Para el desarrollo de este proyecto se hace uso de la metodología Advanced Product Quality Planning (APQP), debido a que su implementación aborda todas las etapas del desarrollo de este proyecto y por el tipo de necesidades que demanda, en este caso para la modificación

de la superficie por electo-recubrimiento de los electrodos con níquel (Stamatis, 2019; Kiefer & Allegretti, 2017). En la primera fase que consta de la planificación se desarrolla el plan de trabajo a seguir para diseñar el proceso de manufactura más conveniente para la modificación superficial de los depósitos de níquel sobre la placa de acero inoxidable 304, la cual constará de 4 etapas siendo las siguientes:

- Etapa 1: Para validar el proceso se realiza un análisis de la información recopilada sobre los procesos de manufactura existentes para el niquelado de piezas, un análisis de las ventajas y desventajas que presentan los electrodos previamente manufacturados y los procesos encontrados para la deposición de níquel.
- Etapa 2: Se procede a la modificación de la superficie del electrodo mediante el depósito del níquel, utilizando el control y la modificación de parámetros dentro del proceso de niquelado.
- Etapa 3: Se hace el análisis del desempeño de los electrodos con tiempos de operación de 60 horas de trabajo después de haber sido niquelados con variaciones en el proceso, tales como densidad de corriente, temperatura y agitación, haciendo uso de planta piloto para electrólisis alcalina de 5 kW.
- Etapa 4: Finalmente se evalúa el desempeño y estado físico de los electrodos a través de equipos de medición y microscopía tipo SEM para seleccionar el proceso de manufactura de los electrodos con los mejores resultados.

Para la fase del diseño del producto se desarrollan los conceptos de diseño, se realizan análisis de los parámetros para modificar la superficie de los electrodos. También se llevan a cabo pruebas y validaciones en donde las variables a modificar durante el proceso de niquelado son las siguientes:

Agitación: La agitación acelerará la convección de la solución para que los iones metálicos consumidos cerca del cátodo puedan reponerse a tiempo y la polarización de los electrodos se reduzca. A su vez, que el aumento o disminución de la agitación ayude al desprendimiento de las burbujas de la superficie del electrodo durante el proceso de niquelado.

Temperatura: El aumento de la temperatura generalmente acelera la velocidad de las reacciones de los electrodos y aumenta la conductividad del electrolito, asimismo reduce la polarización entre los electrodos.

Densidad de corriente: El amperaje suministrado influye en el tamaño de grano y homogeneidad en el depósito, la capacidad de dispersión y la cobertura del recubrimiento. Los pasos de recubrimiento de electrodos empleados para este trabajo son descritos a continuación de acuerdo con Baño M.:

1. Recepción de materia prima: Se ingresan al almacén las piezas metálicas que van a ser utilizadas en el proceso de galvanización para efecto protector contra corrosión.
2. Limpieza física: Mediante la utilización de lijas para agua del número 500 se procede a la eliminación de las partículas que quedaron impregnadas en las piezas metálicas. Para el desarrollo de esta etapa se requiere de materiales de limpieza (lana, fibras sintéticas), y agua a temperatura ambiente para eliminar las partículas que los cepillos no logran retirar.
3. Desengrase o limpieza química: Esta etapa consiste en la eliminación de las grasas y aceites de la superficie de las piezas metálicas.
4. Lavado de desengrase: Consiste en el lavado de las piezas con agua a fin de eliminar los residuos de la etapa anterior, ya que estos pueden producir manchas y recubrimientos irregulares.
5. Decapado o desoxidación: Consiste en eliminar las capas de óxido formadas en las superficies de las piezas y se realiza cuando el recubrimiento es de tipo protector. El decapado se realiza sumergiendo las piezas en una solución que puede ser ácida o alcalina.
6. Lavado de decapado: Consiste en el enjuague de las piezas metálicas en un tanque de agua para evitar el arrastre del ácido a las siguientes etapas del proceso.
7. Baño Watts o electrólisis (estañado, cromado, niquelado): Es la etapa del recubrimiento de las piezas metálicas y se lleva a cabo en un baño electrolítico, el movimiento iónico es causado por el campo eléctrico que existe entre los electrodos y la corriente resultante consiste en iones cargados positivamente emigrando hacia el cátodo y iones cargados negativamente emigrando hacia el ánodo como se muestra en la Figura 3.
8. Lavado en caliente: En esta etapa, se retira la totalidad de las impurezas presentes en la pieza, debido al contacto con el baño.
9. Secado: Las piezas metálicas deben secarse lo más rápido posible después del lavado final para evitar la aparición de manchas sobre los depósitos metálicos.

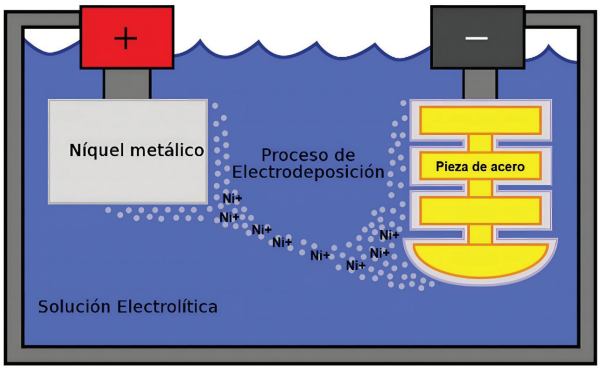

Figura 3. Niquelado de un mandril.

En la fase del diseño del proceso y desarrollo se establecen los procesos de fabricación necesarios para producir el producto. Se identifican y establecen los controles de calidad, se definen los parámetros de producción y se realizan pruebas para validar el proceso.

Al no realizarse de manera adecuada el proceso de niquelado, la placa de acero donde se realiza el depósito puede presentar mala adhesión de níquel o porosidades que van desde la base del depósito hasta la parte superior del mismo. Algo importante a mencionar es que, al momento de modificar el proceso de deposición de los electrodos, se pueden obtener distintos acabados superficiales, que a su vez pueden mejorar el desempeño del electrodo al aumentar el área superficial en contacto con el electrolito.

La principal restricción que tiene actualmente el proceso de niquelar electrodos para electrólisis alcalina, es una deficiente reproducibilidad en la deposición de níquel sobre los electrodos, lo que lleva a defectos sobre la superficie de las caras, quedando expuestas algunas partes del sustrato, que al ser de acero inoxidable 304, al contacto con el electrolito por el proceso de electrólisis alcalina da pie a la generación de cromo hexavalente, un compuesto dañino para la salud, ya que es cancerígeno y está regulado por la norma NMX- AA-044-SC-FI-2014 que se enfoca en el manejo de aguas.

Las metas de este diseño de proceso de manufactura se centran en mejorar los tiempos de producción, aumentar la calidad del producto final y ser capaz de cambiar las variables del sistema de operación que mejor se ajusten a las necesidades del sistema de producción. La parte crítica del diseño se enfoca en estandarizar el proceso de niquelado, así como el diseño de un sistema de control para regular los tiempos de operación en cada uno de los baños del proceso de niquelado, como su temperatura, agitación y corriente aplicada, sin afectar la composición química de los baños de la planta piloto, las cuales están constituidas por las siguientes soluciones como se muestra en la Tabla 1.

Al evaluar el proceso de niquelado, se recurre a la Ecuación 1 para determinar la densidad de corriente y así establecer el amperaje total que se necesita al momento de someter los electrodos circulares de 10 cm de diámetro en las tinas de desengrase y decapado electrolítico para una apropiada deposición de níquel en el baño Watts.

$$J = \frac{I}{A} \tag{1}$$

Donde:

J = Densidad de corriente
I = Intensidad de corriente
A = Área del electrodo

Posteriormente, se hace uso de la ecuación de Faraday donde θ en la Ecuación 2 es el tiempo que permanece el electrodo dentro del Baño Watts, y así alcanzar el espesor deseado, que en este caso será de 80 μm.

Tabla 1 Concentraciones de cada uno de los baños para el proceso de niquelado.

Reactivo	Concentración	Volumen de la solución	Masa del soluto y volumen de ácido
		Desengrase	
GM – 102	85 g/L	30 L	2.5 kg
		Decapado electrolítico	
Cloruro de níquel ($NiCl_2$)	240 g/L	30 L	7.2 kg
Ácido clorhídrico (HCl)	130 ml/L		3.9 L
		Baño Watts	
$NiSO_4$*$6H_2O$ Sulfato de níquel	300 g/L	30 L	9 kg
$NiCl_2$*$6H_2O$ Cloruro de níquel	60 g/L		1.8 kg
H_3BO_3 Ácido Bórico	45 g/L		1.35 kg

$$\theta = \frac{T_{Ni} F\, eq\, \rho_{Ni}}{J\, pm_{Ni}} \quad (2)$$

Donde:

T_{Ni} = Espesor de Pieza
F = Constante de Faraday
eq = Equivalentes que intervienen
$\boldsymbol{\rho_{Ni}}$ = Densidad del Níquel
J = Densidad de corriente
$\boldsymbol{pm_{Ni}}$ = Peso atómico del Níquel
θ = Tiempo en baño

En el caso de la densidad de corriente se deja como variable, ya que el amperaje empleado al niquelar varía entre 6, 9.5 y 12 A, según las observaciones que se realicen en el transcurso del proceso, siendo este un niquelado por capas de 20 en 20 µm hasta alcanzar un máximo de 80 µm. En la Tabla 2 se muestran las dimensiones del electrodo de acero inoxidable para establecer el área total a niquelar.

En la Tabla 3 se determina el tiempo que le toma al sistema niquelar a un espesor de 80 µm.

El siguiente paso es modificar los parámetros de niquelado por lo que se procede a:

1. Enumerar y clasificar los electrodos de acero inoxidable para obtener un mayor control sobre estos.
2. A continuación, se prepara la superficie de los electrodos antes de someterlos al proceso de baño Watt.
3. Comienza el proceso de niquelado dentro del baño Watt, donde se separan los electrodos por lotes y solo se modifica una de las 3 variables antes mencionadas; agitación, temperatura y amperaje.
4. Finalmente se controla la calidad del proceso, se compara el peso y el espesor antes y después de ser niquelados, se identifica bajo qué características se sometieron las piezas, en donde se separan los electrodos con un espesor de níquel por debajo de lo requerido, los que están dentro del porcentaje de error permitido y finalmente los que exceden el porcentaje de níquel en la pieza.
5. Se prueba el desempeño de los electrodos, ensamblándolos en un electrolizador alcalino, con una temperatura de sistema entre 70 y 80 C° y una densidad de corriente promedio de 0.6 A/cm^2 durante 60 h para de esta forma observar su comportamiento cada 20 h.
6. Se determina su eficiencia para comprobar si los electrodos modificados con electro-depósito de níquel son competitivos contra electrodos de níquel puro.

Tabla 2. Dimensiones del Electrodo.

Parámetro	Medida	Unidad
Diámetro	10	cm
Área	78.54	cm^2
Área de 2 caras	1.571	dm^2

Tabla 3. Evaluación analítica para tiempo en baño Watt.

Datos del Baño Watts			
Parámetro	Medida	Unidad	Nomenclatura
Amperaje	9.5	A	
Espesor por depositar	8x10^{-5}	µm	T_{Ni}
Constante de Faraday	26.8015	A/hmol	F
Equivalentes que Intervienen	2		Eq
Densidad del Níquel	8.91x10^6	g/m^3	p_{Ni}
Peso Atómico del níquel	58.7	g/mol	pm_{Ni}
Densidad de Corriente	604.7887	A/m^2	J
Tiempo en baño	1.0763	h	θ
Tiempo en baño	1:04	h: min	θ

Discusión y análisis de resultados

En esta fase es donde se hace la validación del producto y proceso, analizando las pruebas y validaciones adicionales tanto en el producto final como en el proceso de fabricación, modificando los parámetros tales como: Agitación, temperatura y amperaje dentro del baño Watts, para así hacer una comparativa de las superficies obtenidas tras la modificación de dichos parámetros, donde los resultados obtenidos los siguientes: Durante la primera etapa de experimentación se niquelaron los primeros electrodos de acero inoxidable, sin cambios durante el baño Watts para observar la forma en la que se deposita el níquel sobre los electrodos y donde se observa la formación de poros sobre la placa de acero inoxidable 304 por la producción de hidrógeno gaseoso durante el niquelado. La generación de burbujas de hidrógeno dentro del baño Watts ocurre debido a:

1. La intensidad de corriente utilizada, de 9.5 A, influye en la estructura cristalina del recubrimiento, la capacidad de dispersión y la cobertura del recubrimiento.
2. Una deficiente agitación que durante el proceso acelera o disminuye la convección de la solución para que los iones metálicos consumidos cerca del cátodo puedan reponerse a tiempo y la concentración de polarización del cátodo pueda reducirse, o en su defecto generar sombras sobre el área recubierta.
3. La temperatura, que al aumentar generalmente acelera la velocidad de reacción catódica y la velocidad de difusión de iones, y reduce la polarización catódica. Por lo tanto, la cristalización del recubrimiento será más gruesa.

Por lo que se genera un ambiente propenso a la evolución de hidrógeno, quedando los electrodos recubiertos de níquel con porosidades que van desde la superficie de sustrato hasta el espesor de 80μm niqueladas, como se muestra en la Figura 4 en la parte inferior derecha.

Figura 4. Placas de acero inoxidable niqueladas con presencia de poros en la superficie.

Una vez que se observa la superficie del electrodo se analizan las ventajas y desventajas que presenta este tipo de superficie, siendo estas las siguientes:

Desventajas:

- La superficie al no estar completamente niquelada hará que el electrolito entre en contacto con la placa de acero inoxidable y esto genere la evolución de cromo hexavalente durante el proceso de electrólisis alcalina.
- Las porosidades no se presentan uniformemente sobre toda la superficie del electrodo.

Ventajas:

- Al tener este tipo de superficie, se puede obtener una mayor zona de área activa.

Para la segunda etapa se realizaron tres experimentaciones diferentes en las cuales se modificaron las condiciones de: Intensidad de corriente, temperatura y agitación. La primera variable por modificar es el aumento de la corriente sobre las placas de acero inoxidable 304 de 9.5 a 12 A, aunque la superficie presentó una mejoría considerable respecto a las primeras piezas, ya que la superficie de la placa de acero se recubrió casi en su totalidad, presentando de 2 a 3 poros por cm^2 en los que se siguen observando defectos sobre la superficie, esta reducción de defectos significa que el problema de que el electrolito pueda contaminarse de cromo hexavalente por la reacción con la placa de acero, queda solucionada (Figura 5).

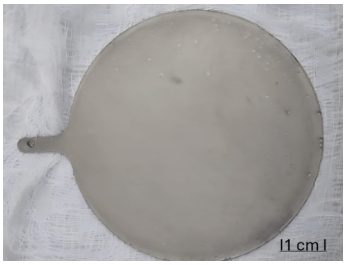

Figura 5. Placas niqueladas a 12 A con presencia de menos poros en la superficie.

La segunda variable por modificar es el aumento de temperatura de 60º a 75º C, con la finalidad de generar la evolución de hidrógeno y obtener una superficie más rugosa y, a su vez, con una mayor superficie de área activa al momento de la electrólisis alcalina. Las placas presentaron ligeras rayaduras blancas sobre la superficie (véase Figura 6), que al ser observadas bajo microscopía de 50 X se puede observar una geometría de tipo gota como se muestra en la Figura 7.

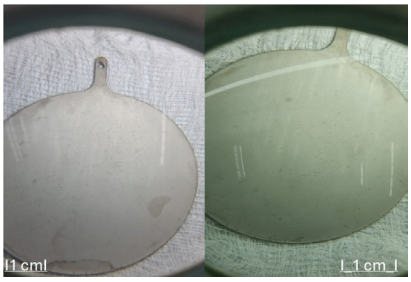

Figura 6. Placas niqueladas a 75° C con ralladuras blancas sobre la superficie.

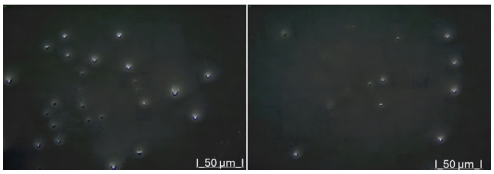

Figura 7. Presencia de poros en forma de gota en placas niqueladas a 75° C.

La tercera variable por modificar es la agitación, en donde se cambiaron los puntos de salida de la bomba dentro de la tina del baño Watt, siendo estos puntos en las esquinas de la tina y sobre el electrodo mismo; lo que dio como resultado defectos hechos por las sombras generadas por las burbujas que se producían por el chorro de la solución del baño. Estas porosidades no son uniformes sobre la placa y solo se apreciaban mayormente dependiendo del punto en donde se colocará la salida de la manguera del baño, como se muestra en la Figura 8, siendo el lado izquierdo el electrodo y el derecho la parte inferior derecha del electrodo.

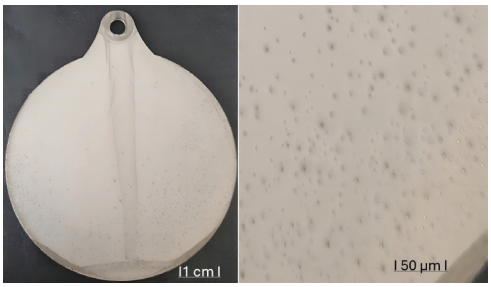

Figura 8. Presencia de poros mayormente visibles sobre la parte donde se colocó la salida del chorro del baño.

La superficie del electrodo se sometió a microscopía de 50 X para observar la geometría del poro, la cual tiene una forma más redonda, como se muestra en la Figura 9, a diferencia de los depositados con cambio de temperatura.

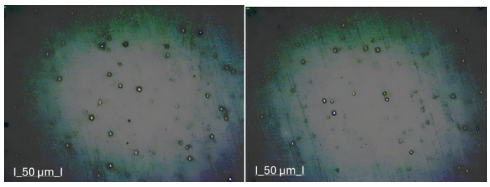

Figura 9. Presencia de poros en forma redonda en placas niqueladas por cambio de agitación.

Para la tercera etapa de experimentación se hace una comparativa de los resultados obtenidos y se plantea un mapa de ruta, por lo que se empieza a niquelar por capas, es decir de 20 en 20 micras hasta llegar a un espesor de 80 micras, variando el amperaje, dependiendo de qué dimensiones sean los poros generados sobre la superficie de la placa de acero, tal como se observa en el diagrama de la Figura 10.

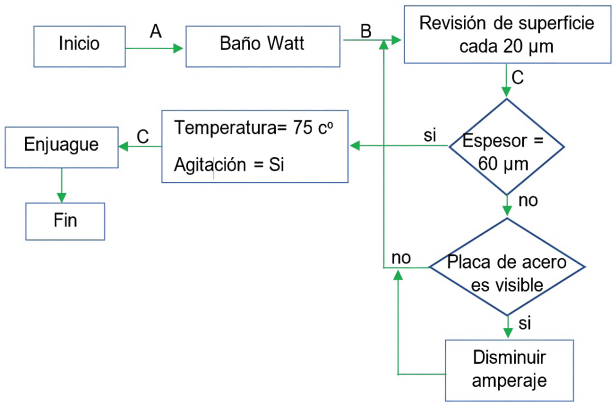

Figura 10. Diagrama de ruta para recubrimiento de níquel en tercera experimentación.

Dentro de las primeras pruebas de esta etapa de experimentación se varía el amperaje iniciando con 12 A y terminando en 6.5 A, de esta manera, se disminuye el tamaño de grano dentro del depósito, y a su vez, se tiene una superficie más rugosa con la presencia de valles y crestas, quedando los electrodos totalmente recubiertos como se muestran en las imágenes del microscopio VHX-7000Keyence con 200 X de resolución de la Figura 11 siendo de color azul la zona más profunda del depósito y de color rojo la zona más elevada con 4 micras.

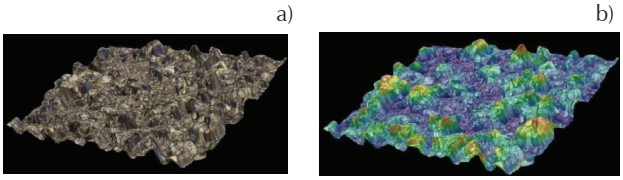

Figura 11. Superficie lateral del electrodo depositado con variación de amperaje.

En la segunda prueba se aumenta la temperatura de 60 a 75 °C esto en las últimas 20 micras y se varía el amperaje según las observaciones realizadas en la primera prueba de la tercera etapa de experimentación, con la finalidad de recubrir porosidades que se presenten sobre la superficie del electrodo dentro de las primeras 60 micras y tener en las últimas 20 micras la misma superficie observada tras el aumento de temperatura en la etapa 2 de experimentación con ligeras rayaduras blancas sobre la superficie como se muestra en la Figura 12. Que al ser observadas bajo microscopio de 100X y 200X se puede ver la misma geometría de tipo gota, pero esta vez recubriendo completamente la superficie de la placa de acero inoxidable. Siendo la profundidad máxima de ~20 micras con este tipo de superficie tipo canal.

Finalmente, para las pruebas en las últimas 20 micras, nuevamente se cambia la salida de la bomba para modificar la forma de agitación del baño, siendo estas las que menor consistencia presentaron sobre la superficie, mostrando porosidades solo en ciertos puntos del electrodo y no uniformemente como en las pruebas anteriores, además de no tener un recubrimiento sobre todo el electrodo de acero como se ve en la Figura 13.

Se procede al análisis comparativo de los resultados obtenidos tras cada una de las etapas de experimentación, de esta forma se hace el diagrama de ruta a seguir al momento de niquelar como se muestra en la Figura 14 y Tabla 4, en donde se enlista el número de actividad, la acción que representa dicho número de actividad, y el proceso anterior a realizar antes de cada actividad, así mismo el tiempo total que toma cada actividad, por ejemplo, la actividad numero 2 será el enjuague, el cual antes pasa por un proceso de preparado de superficie y el tiempo que demora la actividad de enjuague va de los 40 segundos a 1 minuto (4 minutos en total de las veces que se repite el proceso), y finalmente pasando a la etapa de desengrase electrolítico.

Para validar los electrodos con superficie modificada, se ensamblan en un electrolizador alcalino, con 5, 8 y 12 electrodos siendo los electrodos monopolares de níquel puro y los electrodos bipolares de acero inoxidable recubiertos de níquel. En las curvas de desempeño se observan las condiciones de voltaje y amperaje óptimas para que el sistema trabaje de manera ininterrumpida. En la Tabla 5 se visualiza en las condiciones en las que el electrolizador muestra mejores resultados, por lo que, se procura mantener el sistema trabajando bajo esas mismas condiciones de operación.

Al transcurrir las horas de operación se procede a desarmar el electrolizador y a evaluar los electrodos, así como su desempeño dentro del sistema. En la Figura 15 se observa que uno de los electrodos presenta indicios de desprendimiento después de 20 horas de trabajo, esto por una mala técnica en el proceso de niquelado, mientras que el resto de los electrodos presentan estabilidad sobre su superficie.

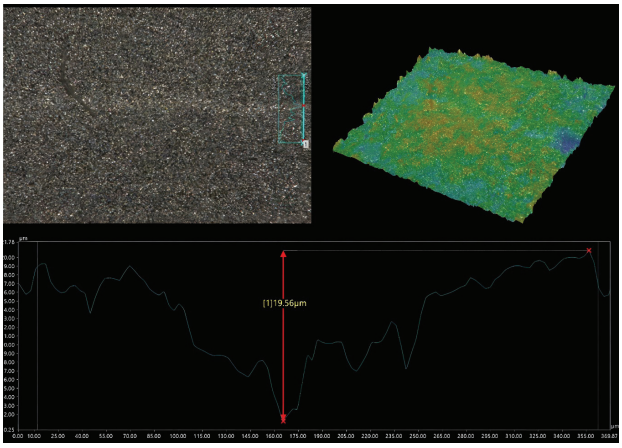

Figura 12. Superficie superior del electrodo depositado con aumento de temperatura en las últimas 20 micras.

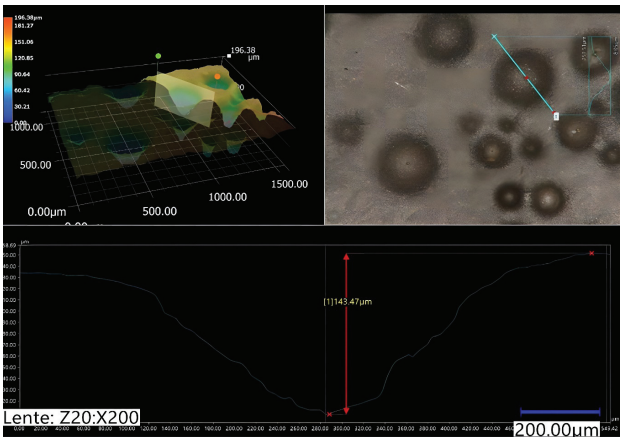

Figura 13. Electrodo depositado ultimas 20 micras sin agitación.

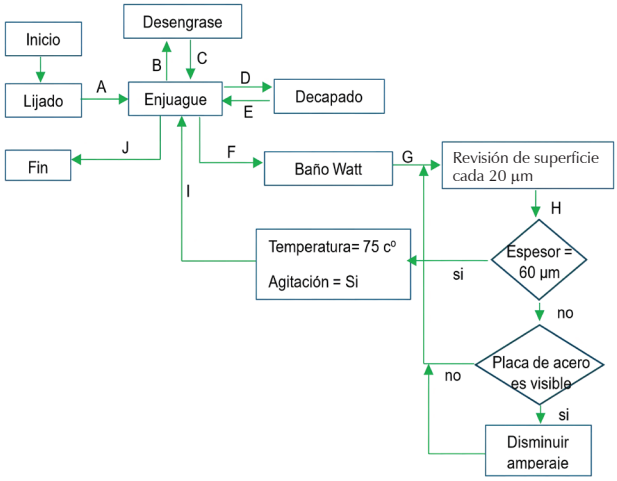

Figura 14. Diagrama de ruta del proceso de niquelado.

Tabla 4. Tabla del proceso a realizar.

Núm. Actividad	Acción	Predecesor	Tiempo en minutos
1	Preparado de superficie	-	5
2	Enjuague	A, C, E, I	4
3	Desengrase	B	1.5
4	Decapado	D	1.5
5	Baño Watt	F, H	64
6	Revisión de superficie	G	3

Tabla 5 Tabla de condiciones en la que el electrolizador opera.

Condiciones de trabajo para 3 electrodos							
Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	C1 (ºC)	Flujo (l/min)	E_{H2}	E_{EC}	η (Eficiencia)
10	38.7	387	72.25	1.23	2.88	6.45	45%
Condiciones de trabajo para 6 electrodos							
Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	C1 (ºC)	Flujo (l/min)	E_{H2}	E_{EC}	η (Eficiencia)
19	34	646	38.25	1.69	3.95	10.77	37

Figura 15. Indicios de desprendimiento del recubrimiento de níquel sobre la superficie del ánodo tras 20 horas de operación.

Se puede observar una coloración gris oscuro en el ánodo, esto generando la descomposición del depósito de níquel. En el cátodo se genera una película gris oscura, que demuestra un depósito sobre la capa de níquel. Posteriormente, se anexan otros 3 electrodos niquelados y se procede a dejarlos trabajar durante 40 horas bajo las mismas condiciones de operación de una densidad de corriente de 0.6 cm^2/A y una temperatura de 70º a 80º para lograr así un total de 60 horas y tener una comparativa a través del tiempo de la degradación de los electrodos. Tras abrir el electrolizador y comparar las superficies, a excepción del electrodo número tres que presentó indicios de desprendimiento del depósito, el resto de los electrodos mostraron una gran estabilidad sobre su superficie, sin mostrar indicios de desprendimiento sobre el recubrimiento, como se ve en la Figura 16. Se usan electrodos ubicados en los extremos que corresponden a electrodos de níquel puro (referencia), mientras que los electrodos centrales fueron recubiertos con níquel mediante baño Watts bajo distintas condiciones experimentales (variación de corriente, temperatura y agitación) descritas en la Tabla 6.

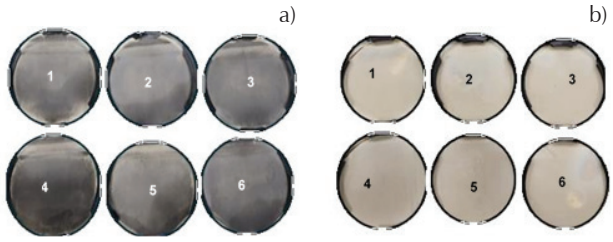

Figura 16. a) Superficie del cátodo tras 60 horas de trabajo, b) Superficie del ánodo tras 60 horas de trabajo.

Tabla 6. Orden y condiciones de los electrodos dentro del electrolizador.

Núm. Electrodo	Tiempo en Electrolizador	Condiciones de Niquelado
-	60 h	Cátodo, este electrodo es de níquel puro
1	60 h	1º capa de 20 μm: 6.5 A, temperatura de 75 Cº con agitación. 2º capa de 20 μm: 9.5 A, temperatura de 75 Cº sin agitación. 3º capa de 20 μm: 12 A, temperatura de 75 Cº sin agitación. 4º capa de 20 μm: 12 A, temperatura de 75 Cº sin agitación.
2	60 h	1º capa de 20 μm: 9.5 A, temperatura de 75 Cº con agitación. 2º capa de 20 μm: 6.5 A, temperatura de 75 Cº sin agitación. 3º capa de 40 μm: 12 A, temperatura de 75 Cº sin agitación.
3	60 h	1º capa de 40 μm: 9.5 A, temperatura de 75 Cº con agitación. 2º capa de 40 μm: 12 A, temperatura de 75 Cº sin agitación.
4	40 h	1º capa de 20 μm: 12 A, temperatura de 75 Cº con agitación. 2º capa de 20 μm: 9.5 A, temperatura de 75 Cº sin agitación. 3º capa de 20 μm: 6.5 A, temperatura de 75 Cº sin agitación. 4º capa de 20 μm: 12 A, temperatura de 75 Cº con agitación.
5	40 h	1º capa de 20 μm: 6.5 A, temperatura de 75 Cº con agitación. 2º capa de 20 μm: 6.5 A, temperatura de 75 Cº sin agitación. 3º capa de 40 μm: 12 A, temperatura de 75 Cº sin agitación.
6	40 h	1º capa de 20 μm: 9.5 A, temperatura de 55 Cº con agitación. 2º capa de 40 μm: 6.5 A, temperatura de 55 Cº sin agitación. 3º capa de 20 μm: 12 A, temperatura de 55 Cº sin agitación.
+	60 h	Ánodo, este electrodo es de níquel puro

Con base en los resultados se observa que los electrodos depositados con níquel muestran una excelente estabilidad y tras un proceso de manufactura que ahorra tiempo, los costos por electrodo se ven reducidos en más de 50 % y este costo se puede disminuir o incrementar dependiendo del material que se niquele, así como la cantidad de electrodos que se niquelen por tina.

Conclusiones

Se desarrolló y validó un proceso de recubrimiento con níquel sobre electrodos de acero inoxidable 304 para su aplicación en electrólisis alcalina, empleando la metodología APQP para garantizar control y reproducibilidad.

Los resultados experimentales demostraron que los factores internos del baño-temperatura, agitación e intensidad de corriente- influyen directamente en la morfología del recubrimiento y en la aparición de defectos sobre la superficie del electrodo. Al optimizar estos parámetros se lograron depósitos homogéneos, con espesor promedio de 80 μm, excelente adherencia y reducción de porosidad visible hasta en un 90 % respecto al proceso manual inicial.

Durante las pruebas de operación del electrolizador por 60 horas continuas, los electrodos niquelados mostraron alta estabilidad estructural y adherencia del recubrimiento, sin desprendimientos relevantes, a excepción de un electrodo fabricado con una técnica inadecuada.

Finalmente, se concluye que el control simultáneo de temperatura (75 °C), densidad de corriente (0.6 A/cm²) y agitación uniforme por aireación produce superficies porosas estables, con mayor área activa y mejor desempeño en la generación de hidrógeno. Este método ofrece una alternativa técnica viable y de bajo costo frente al uso de electrodos de níquel puro, contribuyendo a la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas de electrólisis alcalina.

Agradecimientos

Se agradece al IPN, Proyecto SIP Transdisciplinario 20252385, SIP PRORED 20254750. SIP Innovación 20241061.

Referencias

Alcaraz-Espinoza, J. J., Gómez-Cholula, D., González-Huerta, R. de G.…… *et al.* (2023). *Almacenamiento de Energía: Hidrógeno-Baterías, hacia la independencia energética.* Sociedad Mexicana del Hidrógeno.

Baño, M. *Estudio para conocer los potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador*. Ministerio del Ambiente.

Bertuccioli, L., Chan, A., Hart, D., Lehner, F., Madden, B., & Standen, E. (2014). *Study on development of water electrolysis in the EU.* Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Final Report. Recuperado de https://www.studeersnel.nl/nl/document/rijksuniversiteit-groningen/introduction-to-international-business/study-electrolyser-0-logos-0/73111097

Cavaliere P. D., & Perrone, A. (2021). Water electrolysis for the production of hydrogen to be employed in the ironmaking and steelmaking industry. *Metals*, 11(11), 1816. https://doi.org/10.3390/met11111816

Kiefer, J., & Allegretti, S. (2017). Quality- and lifecycle-oriented production engineering in automotive industry. *Procedia CIRP*, 62, 446-451, Science Direct. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.086

Stamatis, D. H. (2019). *Advanced product quality planning, the road to success*. 1st Ed. New York: CRC Press.

Ursua, A., Gandia, L. M., & Sanchis, P. (2012). Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*, 100(2), 410-426. https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2156750

Bibliografía sugerida

Bhandari, R., Trundewind, C., & Zapp, P. (2013). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis-A review. *Journal of Cleaner Production,* 85. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048

Chrysler-Ford, G. M. (2008). *Advanced product quality planning-APQP*. 2a ed. New York: AIAG.

Di Bari, G. A. (2010). *Electrodeposition of Nickel. Modern Electroplating*. Capítulo 3, EUA: John Wiley & Sons Inc.

Gomez-Sacedón, C., López-Fernández, E., & Gonzalez-Elipe, A. R., *et al.* (2023). Nanostructured nifeo/nife bilayer electrocatalyst for efficient urea assisted water electrolysis. (Preprint). https://doi.org/10.2139/ssrn.4494002

Hernández-Pérez, J. N. (2018). *Desarrollo de electrodos modificados para electrólisis alcalina y su acoplamiento a un reactor oxihidrógeno*. (Tesis). Instituto Politécnico Nacional.

International Energy Agency. (2019). IEA, 2019, BBC News Mundo. Cono Sur, (2021) BBC Mundo.

Jaramillo-Gutiérrez, M. I., & Sierra-González, S. M. (2021). Effect of electrodeposition parameters and surface pretreatment on the electrochemical hydrogen production using nickel-plated stainless steel electrodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 7667- 7675. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.205

Kjartansdóttir Y de L., & Allebrod, C. K., *et al.* (2013). *2nd generation alkaline water electrolysis: Final rerport.* (Tesis de Doctorado). Ărhus University Business and Social Science-Centre for Energy Technologies.

Ley de la industria eléctrica. (2021). Cámara de Diputados. Reforma DOF 09-03-2021. Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LIElec_090321.pdf. Última consulta 8/8/2021

Maggio, G., Squadrito, G., & Nicita, A. (2022). Hydrogen and medical oxygen by renewable energy based electrolysis: A green and economically viable route. *Applied Energy*, 306, 117993. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117993

Mantell, C. L. (1960). *Galvanostegia y Galvanoplastia en Electrochemical Engineering*. Capítulo 7. 77-79. EUA: McGraw-Hill Book Co.

Moreno-López, I. A. (2021). *Desempeño de un electrolizador alcalino con electrodos modificados con depósitos de níquel estableciendo un protocolo de caracterización*. (Tesis superior). Instituto Politécnico Nacional.

SINEM. (2023). Precio Internacional Níquel. Recuperado de https://www.sgm.gob.mx/SINEMGobMx/precio_hist_metal.jsp. Última consulta 16/1/2023.

Standard Specification for Electroplated Engineering Nickel Coatings. (2018).

Wang, X., & Liu, Z., *et al.* (2023). Corrosion characteristics of Inconel 625 cladding layer and NiCrMoAl cladding layer in molten NaCl-KCl and NaCl-KCl-Na2SO4. *Corrosion Science*, 221. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111308

How to cite:

Meza-Juárez, A. A., Sandoval-Pineda, J. M., González-Huerta, R. de G., Moreno-Soriano, R., & Davila-Diaz, A. (2026). Diseño de proceso de electro-recubrimiento de electrodos con níquel utilizados en electrolisis alcalina. *Ingeniería Investigación y Tecnología,* 27(01), 1-11. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2026.27.1.008