



Educación

Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®
Instituto Tecnológico de Orizaba

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA TECNOLÓGICA
PARA EL PROCESO DE METALIZACIÓN
ENFOCADA A LA MANUFACTURA DE
AGUJEROS PASANTES”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

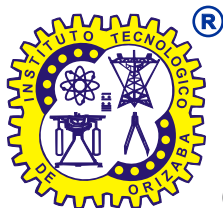
Ing. Oliver Canseco Moreno

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Gerardo Águila Rodríguez

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Ignacio Herrera Aguilar



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

JUNIO 2025



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado

Orizaba, Veracruz, **20/junio/2025**

Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**

Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

C. OLIVER CANSECO MORENO

Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**" DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA TECNOLÓGICA PARA EL PROCESO DE
METALIZACIÓN ENFOCADA A LA MANUFACTURA DE AGUJEROS PASANTES"**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

DRA. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OG-13-F06



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz. Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado

Orizaba, Veracruz, **16/junio/2025**
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

OLIVER CANSECO MORENO

La cual lleva el título de:

**"DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA TECNOLÓGICA PARA EL PROCESO DE METALIZACIÓN
ENFOCADA A LA MANUFACTURA DE AGUJEROS PASANTES"**

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. GERARDO ÁGUILA RODRÍGUEZ

FIRMA

SECRETARIO: DR. IGNACIO HERRERA AGUILAR

FIRMA

VOCAL: DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN

FIRMA

VOCAL SUP.: M.C. ENRIQUE ALEJANDRO CUELLAR
CORTÉS

FIRMA

TA-09-18



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz. Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx



CONTENIDO

Contenido

Lista de Figuras.....	5
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN DE PELICULAS DE COBRE	10
1.1 INTRODUCCIÓN	10
1.2 PROBLEMÁTICA	11
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	11
1.4 HIPÓTESIS	13
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.7 ESTADO DEL ARTE	13
1.8 MARCO TEÓRICO.....	17
1.8.1 FUNDAMENTOS DE LA ELECTRODEPOSICIÓN	17
1.8.2 MORFOLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DE COBRE	17
1.8.3 APLICACIONES DE LA ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE	18
1.8.4 ESTUDIOS PREVIOS Y AVANCES RECIENTES	18
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA CELDA ELECTROQUIMICA DE DEPOSICIÓN DE COBRE	19
2.1 INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS PRELIMINAR.....	19
2.2 DISEÑO DE CIRCUITOS Y SIMULACIONES	21
2.3 MANUFACTURA, ENSAMBLAJE Y PRUEBAS.....	23
2.4 PROGRAMACIÓN E INTEGRACIÓN DE HARDWARE Y SOFTWARE	23
2.5 DISEÑO DE GABINETE E INSTALACIÓN	24
2.6 PRUEBAS Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	26

CAPÍTULO III. IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE: PARÁMETROS Y CONDICIONES EXPERIMENTALES	28
3.1 DISEÑO DEL CIRCUITO CONTROLADOR DE ÁNGULO DE FASE PARA LA TEMPERATURA.....	28
3.4 DISEÑO DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR DE SEÑAL DEL TRANSDUCTOR PT100.....	34
3.2 DISEÑO DEL CIRCUITO CONTROLADOR DE VELOCIDAD DEL SISTEMA DE AGITACIÓN.....	39
3.3 DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL DE CORRIENTE	40
3.5 DISEÑO DEL CIRCUITO SENSOR DE CORRIENTE	41
3.6 DISEÑO DEL CIRCUITO CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO (PID)	46
3.7 DESARROLLO DE UNA INTERFAZ DE USUARIO	48
3.7.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PARA AJUSTE Y MONITOREO DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE.....	49
3.7.2 CONFIGURACIÓN DEL CODIFICADOR ROTATIVO (ENCODER)	50
3.7.3 DISEÑO DE INTERFAZ VISUAL.....	51
3.9 INTEGRACIÓN DE HARDWARE	54
3.10 DISEÑO DE GABINETE E INTEGRACIÓN	55
3.8.1 CELDA ELECTROQUÍMICA.....	57
3.8.2 UNIDAD DE AJUSTE Y MONITOREO.....	58
CAPÍTULO IV. DESARROLLO DE UNA CELDA ELECTROQUÍMICA PARA EL DEPÓSITO DE PELICULAS DE COBRE.....	59
4.1 UNIDAD DE AJUSTE Y MONITOREO.....	59
4.1.1 SALIDA DE CORRIENTE	60
4.1.2 CONTROL DE AGITACIÓN	61
4.1.3 LECTURA DE TEMPERATURA	62
4.2 CELDA ELECTROQUÍMICA.....	62
4.3 FIRMWARE PARA LA INTERACCIÓN HOMBRE-MÁQUINA.....	63
CONCLUSIONES	68

REFERENCIAS.....	69
ANEXOS	71

Lista de Figuras

Figura 1 Diagrama de bloques de las etapas de diseño, implementación y prueba de la herramienta tecnológica para electrodeposición	19
Figura 2 Diagrama esquemático del sistema de electrodeposición con componentes clave	20
Figura 3 Diagrama esquemático de celda electroquímica convencional: configuración bipolar (ánodo-cátodo).....	21
Figura 4 Diagrama esquemático de celda electroquímica con configuración simétrica (doble ánodo-cátodo central)	21
Figura 5 Vista isométrica del modelo 3D de la celda electroquímica	25
Figura 6 Vista isométrica del modelo 3D de la unidad de ajuste y monitoreo para electrodeposición	25
Figura 7 Vista isométrica del modelo 3D del acoplador magnético para agitación del electrolito ..	26
Figura 8 Fotografía del calentador de inmersión para electrolito	28
Figura 9 a) Gráfica de señal senoidal de la red eléctrica b) Gráfica de señal de onda completa rectificadora c) Gráfica de señal diente de sierra.....	30
Figura 10 Diagrama esquemático del circuito convertidor senoidal-diente de sierra sincronizado	30
Figura 11 a) Gráfica de señal diente de sierra y señal constante de 2v b) Gráfica de señal PWM con ciclo de trabajo 26.6%	31
Figura 12 a) Gráfica de señal diente de sierra y señal constante de 5v b) Gráfica de señal PWM con ciclo de trabajo 66.6%	31
Figura 13 a) Gráfica de señal diente de sierra y señal constante de 7v b) Gráfica de señal PWM con ciclo de trabajo 93.3%	32
Figura 14 Diagrama esquemático del circuito comparador para generación de PWM	32
Figura 15 Diseño y manufacturación del PCB para el generador PWM sincronizado a la red eléctrica	33
Figura 16 Diagrama esquemático del circuito de ajuste de fase para disparo de TRIAC.....	34
Figura 17 Diseño y manufacturación PCB del circuito de control de fase para disparo de TRIAC....	34
Figura 18 Diagrama esquemático del circuito puente de Wheatstone para el transductor PT100..	35
Figura 19 Diagrama esquemático del circuito amplificador de instrumentación para el transductor PT100.....	37
Figura 20 Diseño y manufacturación del PCB para acondicionar la señal del transductor PT100....	38
Figura 21 Diseño y manufacturación del PCB para la conexión del transductor PT100	39

Figura 22 Diagrama esquemático del circuito de ajuste de corriente mediante MOSFET	39
Figura 23 Diseño PCB del circuito de control de corriente mediante MOSFET	40
Figura 24 Diagrama esquemático del circuito arreglo de resistencias	40
Figura 25 Diseño PCB del circuito de arreglo de resistencias	41
Figura 26 Diagrama esquemático del circuito ACS712	41
Figura 27 Diagrama esquemático del circuito amplificador diferencial para acondicionamiento de señal del sensor ACS712.....	43
Figura 28 Diagrama esquemático del circuito divisor-compensador para ajuste de offset de 2.5 V	44
Figura 29 Diagrama esquemático del amplificador no inversor para acondicionamiento de señal del sensor ACS712 a 5v	44
Figura 30 Diagrama esquemático de los circuitos seguidores de voltaje	45
Figura 31 Diseño del PCB para el ajuste de zero y span del sensor ACS712	45
Figura 32 Diseño esquemático del circuito amplificador diferencial para entrada del controlador PID	46
Figura 33 Diseño y manufacturación del PCB del amplificador diferencial	47
Figura 34 Diagrama esquemático del circuito controlador proporcional-integral-derivativo	47
Figura 35 Diseño y manufacturación del PCB para el controlador proporcional-integral-derivativo	48
Figura 36 Diagrama de flujo del algoritmo de ajuste y monitoreo del sistema de electrodeposición de cobre	49
Figura 37 Señales digitales CLK y DT del encoder KY-040 durante el giro en sentido horario.....	50
Figura 38 Señales digitales CLK y DT del encoder KY-040 durante el giro en sentido antihorario ...	50
Figura 39 Diagrama ilustrativo del encoder KY-040 con identificación de pines.....	51
Figura 40 Interfaz de inicio del sistema con mensaje de bienvenida en pantalla LCD	51
Figura 41 Menú principal del sistema con acceso a las funciones de temporizador, temperatura, velocidad y corriente.....	51
Figura 42 Interfaz de configuración y monitoreo del temporizador de deposición	52
Figura 43 Interfaz de configuración de las horas en el temporizador de deposición	52
Figura 44 Interfaz de configuración de los minutos en el temporizador de deposición.....	52
Figura 45 Interfaz de configuración de los segundos en el temporizador de deposición.....	53
Figura 46 Interfaz de configuración y monitoreo de la temperatura del electrolito	53
Figura 47 Interfaz de configuración de la velocidad de agitación.....	54

Figura 48 Interfaz de configuración y monitoreo de la intensidad de corriente	54
Figura 49 Diagramas esquemáticos integrados de los circuitos electrónicos del sistema conectados al Arduino Nano	55
Figura 50 Representación estructural en vista múltiple de la celda electroquímica y la unidad de ajuste y monitoreo para electrodeposición	56
Figura 51 Vista isométrica del sistema de electrodeposición con identificación de los componentes principales	57
Figura 52 Fotografías de la unidad de ajuste y monitoreo ensamblada, con señalización de los componentes principales	60
Figura 53 Gráfica de la intensidad de corriente respecto al porcentaje de la interfaz visual.....	61
Figura 54 Gráfica de la velocidad de los agitadores respecto al porcentaje de la interfaz visual	61
Figura 55 Lectura de voltaje en acondicionador de señal para el transductor PT100, 23°C a 100 °C	62
Figura 56 Fotografía de la tapa de la celda electrolítica con disposición de porta electrodos en configuración de dos ánodos y un cátodo central	63
Figura 57 Fotografía de la celda electrolítica con sus componentes funcionales integrados	63
Figura 58 Fotografía de la interfaz principal del sistema con acceso a funciones de temporizador, temperatura, velocidad y corriente	64
Figura 59 Fotografía de la interfaz de configuración y monitoreo del temporizador de deposición	64
Figura 60 Fotografía de la interfaz de configuración y monitoreo de temperatura	65
Figura 61 Fotografía de la interfaz de configuración y monitoreo de velocidad de agitación	66
Figura 62 Fotografía de la interfaz de configuración y monitoreo de corriente eléctrica	66

RESUMEN

Esta tesis presenta el desarrollo integral de una herramienta tecnológica orientada al ajuste y monitoreo de variables involucradas en el proceso de electrodeposición de cobre, específicamente aplicado a placas de circuito impreso (PCBs) con agujeros pasantes. El objetivo principal fue diseñar un sistema que permita automatizar y estandarizar el proceso, garantizando una deposición uniforme de cobre en ambos lados de las placas, con compatibilidad para dimensiones comerciales.

El sistema diseñado abarca una unidad de ajuste y monitoreo capaz de regular cuatro variables fundamentales: temperatura del electrolito, intensidad de corriente, tiempo de deposición y velocidad de agitación. Para ello, se diseñaron y simulon circuitos electrónicos mediante herramientas como Multisim y Ultiboard, se desarrolló una interfaz de usuario basada en Arduino y se diseñó un gabinete físico utilizando software CAD (CATIA), con un sistema de agitación acoplado magnéticamente.

La programación fue desarrollada en el entorno Arduino IDE utilizando técnicas de programación no bloqueante (como la función `millis()`) para garantizar una interacción fluida entre el usuario y el sistema, sin comprometer la precisión del proceso. La interfaz visual incluye un menú navegable mediante un encoder rotativo, que permite configurar y visualizar las variables mencionadas.

Finalmente, se realizaron pruebas funcionales para validar la integración hardware-software, así como la correcta operación de los sistemas de ajuste. El resultado es una herramienta útil, precisa y reproducible, aplicable tanto en ambientes de producción como en laboratorios académicos, sirviendo como base para futuras mejoras que incorporen inteligencia artificial, conectividad remota o interfaces gráficas avanzadas.

ABSTRACT

This thesis presents the comprehensive development of a technological tool designed for the adjustment and monitoring of critical variables involved in the copper electrodeposition process, specifically applied to printed circuit boards (PCBs) with through-holes. The main objective was to design a system capable of automating and standardizing the process, ensuring uniform copper deposition on both sides of the boards, with compatibility for commercial dimensions.

The system includes a control and monitoring unit capable of regulating four key variables: electrolyte temperature, current intensity, deposition time, and agitation speed. To achieve this, electronic circuits were designed and simulated using tools such as Multisim and Ultiboard, a user interface was developed using Arduino, and a physical enclosure was designed with CAD software (CATIA), incorporating a magnetically coupled agitation mechanism.

The programming was developed in the Arduino IDE environment using non-blocking techniques (such as the `millis()` function) to ensure smooth interaction between the user and the system without compromising process accuracy. The visual interface features a navigable menu controlled via a rotary encoder, allowing users to configure and monitor the aforementioned variables.

Finally, functional tests were conducted to validate the hardware-software integration and verify the correct operation of the control systems. The result is a useful, precise, and reproducible tool, suitable for both production environments and academic laboratories, providing a foundation for future improvements such as the integration of artificial intelligence, remote connectivity, or advanced graphical interfaces.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN DE PELICULAS DE COBRE

1.1 INTRODUCCIÓN

En la carrera de electrónica es común manufacturar placas de circuito impreso ya sean para practicas académicas o para proyectos de vinculación haciendo referencia a industrias o empresas, estas tienen de característica caminos o trazos de cobre las cuales se conocen mejor como pistas, cada pista tiene un inicio y un fin, se pueden unir entre ellas o no, pero la función que tienen es conectar componentes ya sean resistencias, capacitores, diodos, terminales, entre otros. Para conectar los componentes es por medio de estas pistas, pero existen dos tipos de ensamble de componentes, uno de ellos son los de tecnología de agujeros pasantes (Through-Hole Technology de las siglas THT) y el otro es dispositivo de montaje en superficie (Surface Mounting Device de las siglas SMD) cada uno posee sus propias características, pero se acostumbra a manufacturar los de agujeros pasantes en las instituciones para las practicas o prototipos, en este caso el que se va a trabajar es el antes mencionado (THT), cuando se hacen estos circuitos impresos de la manera práctica, digamos que a mano haciendo referencia a imprimir el circuito, colocar el dibujo del circuito en una placa fenólica por medio de calor, después introducirlo en cloruro férrico con agua caliente para disolver el cobre que no se encuentra cubierto por el dibujo y al finalizar se obtiene las pistas de cobre con las formas del dibujo, normalmente está bien y funciona la placa, pero cuando se hace una placa con dos caras (pistas en cada lado de la placa fenólica) y se necesita hacer conexiones entre ellas, una de las maneras es por los agujeros pasantes y para hacer esas conexiones sería por los mismo componentes, cables o remaches.

Por medio de la electrólisis, palabra que proviene del griego y que tiene dos radicales, electro que significa electricidad y lisis que significa ruptura. Es el proceso de separación de los elementos por medio de la electricidad, este mismo fundamento se utiliza en el proyecto para hacer una pérdida de iones en un material de cobre y cubrir los agujeros de la placa fenólica con dicho elemento, esto es por medio de la electrodeposición y este es el método para cubrir un material conductor a otro, en este caso utilizando tinta conductiva se cubre los agujeros para posteriormente adherir películas finas de cobre, con esto las paredes del agujero se cubren de cobre y de esa forma conectar ambas caras de la placa, aparte mejora las conexiones de los componentes insertados porque hay mayor área de contacto conductor.

A continuación, se plantea la problemática que motiva el presente estudio, enfocándose en unos de los desafíos técnicos que presenta el laboratorio de sensores e interfaces multimodales al momento de desarrollar circuitos de dos caras. La fabricación de este tipo de circuitos requiere una conexión conductiva, ante esta necesidad, surge la búsqueda de técnicas como la electrodeposición de cobre, que ofrece una solución para mejorar la calidad de los prototipos desarrollados en entornos educativos o de investigación.

1.2 PROBLEMÁTICA

El laboratorio de sensores e interfaces multimodales cuenta con dos opciones para tener PCB (printed circuit board) metalizado y eso es utilizando un proceso mecánico para remachar los agujeros o bien contratando algún servicio externo para tener por lotes los PCB's, el problema de ambos es que uno es muy costoso el realizarlo y laborioso, y la otra demora bastante tiempo en obtenerlo más aparte el presupuesto se consigue en tiempos largos.

El laboratorio tiene cierta dependencia para la manufacturación de estos lo cual no conviene si el objetivo es el desarrollo de proyectos o para obtener un trabajo final que en algunos casos tiene que evolucionar por medio de varios prototipos, cabe recalcar que en ciertos prototipos poco a poco sufren modificaciones para cierto propósito y se hacen varios modelos o versiones, en comparación con una PCB metalizada con una que no, se puede apreciar que la calidad disminuye por motivos de conductividad en los componentes insertados en los agujeros donde algunos casos no se logra unir o bien si se quiere llegar a otro nivel y manufacturar una PCB multicapa.

Considerando las limitaciones previamente expuestas a la fabricación de circuitos de doble cara, se vuelve imperativo buscar soluciones que permitan optimizar los procesos de conexión entre ellas, garantizando uniformidad, adherencia y vitalidad técnica. En este contexto, la electrodeposición se presenta como una alternativa prometedora, no solo por su accesibilidad y bajo costo, sino también por la posibilidad de controlar parámetros clave del proceso. Esta situación plantea una oportunidad para abordar la problemática desde una perspectiva experimental y aplicable, lo cual da paso a la justificación del presente trabajo.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La implementación de técnicas eficientes para la conectividad de circuitos impreso de doble cara representa un paso fundamental en el fortalecimiento de las capacidades prácticas dentro del laboratorio de sensores e interfaces multimodales. En este sentido, la electrodeposición ofrece

ventajas al permitir la formación controlada de películas de cobre mediante parámetros ajustables, resulta útil para aplicaciones educativas y de desarrollo experimental. Justificar este estudio implica reconocer la necesidad de mejorar los métodos actuales, con miras a optimizar la producción de prototipos, reducir costos y mejorar la calidad de los resultados obtenidos en prácticas de laboratorio.

Como el programa de maestría en electrónica cuenta con dos métodos de conexión entre caras con sus partes negativas se opta por una tercera la cual es un método que se ha utilizado en la manufacturación de productos electrónicos del mercado y tienen sus respectivas ventajas entre una de ellas es que componentes SMD ubicados en diferentes caras de la placa se puedan conectar sin la necesidad de limitarse por un diseño estrictamente de una cara, esto genera una reducción de tamaño en los prototipos y más opciones o libertad de diseño.

En el programa es común el desarrollo o manufacturación de los ensambles electrónicos, ya sea para desarrollar un proyecto con fines académicos o para empresas y la calidad de estos es muy importante para obtener buenos resultados.

El laboratorio de sensores e interfaces multimodales tenga una mayor independencia al realizarlos, reducir costos y tiempo, y tener una mayor confiabilidad al manufacturar. Aquí se agrega otros puntos:

- Disponer de una herramienta que permita mejorar las estrategias de manufacturación
- Obtener productos con una calidad estándar profesional y con ello ofrecer servicios al exterior
- Se podría implementar recubrimiento de otro material metálico para evitar el proceso de corrosión y oxidación del cobre

Partiendo de la necesidad de mejorar el proceso de conexión entre circuitos de doble cara mediante una técnica accesible y controlable, se justifica la exploración de la electrodeposición como método alternativo viable. Esta decisión plantea interrogantes concretas sobre la eficiencia, calidad y reproducibilidad del depósito de cobre bajo condiciones experimentales definidas. En consecuencia, se formula una hipótesis que guiará el desarrollo del presente trabajo, orientada a comprobar si el diseño y control adecuado de una celda electroquímica permite obtener recubrimiento metálicos funcionales y uniformes, aptos para su aplicación en prototipos electrónicos.

1.4 HIPÓTESIS

Mediante el desarrollo e integración de diferentes bloques funcionales de hardware y software es posible obtener una herramienta tecnológica funcional para depositar películas de cobre sobre sustratos conductores y/o aislantes mediante el proceso electroquímico, de tal forma que los resultados sean reproducibles y confiables.

1.5 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente trabajo de tesis consiste en desarrollar una herramienta tecnológica que permita controlar y monitorear las diferentes variables del proceso de deposición de películas de cobre mediante el método de electrodeposición tomando en cuenta que las superficies de las muestras son de tamaño estándar para los procesos básicos de manufactura de circuitos impresos.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y manufacturar las diferentes unidades que comprenden el sistema de electrodeposición de películas de cobre.
- Instrumentar electrónicamente las variables principales del proceso de depósito de películas de cobre tales como: tiempo de deposición, temperatura, velocidad de agitación e intensidad de corriente
- Desarrollar un programa de software que permita ajustar y monitorear las variables involucradas en el proceso

1.7 ESTADO DEL ARTE

Mora (2013) desarrolló la investigación “Estudio del proceso de metalizado de agujeros para mejorar la conexión entre las capas de las tarjetas de circuito impreso en la empresa VACIM de la ciudad de Ambato” uno de los objetivos específicos fue determinar los procesos de metalizado que se emplea en la fabricación de PCB. La investigación tiene un enfoque cuantitativo y cualitativo por los datos obtenidos en encuestas, observaciones y datos de libros e internet. La investigación fue de carácter exploratorio y científica. Realizó una encuesta dirigida a los alumnos de la carrera de ingeniería en electrónica y comunicaciones de la FISEI, hizo 10 preguntas para un total de 20 alumnos de noveno semestre, algunos de sus resultados menciona lo siguiente por el metalizado con el método mecánico y sin elementos químicos: “El metalizado de los agujeros lo realizan esporádicamente debido al costo, complejidad de cada elemento electrónico, escasa disponibilidad de los materiales en el mercado y sobre todo porque no se cuenta con un equipo adecuado para la

manufactura de los mismos” , “los estudiantes envían a elaborar los circuitos ya sea este de una sola cara como de doble fuera de la ciudad Ambato, trayendo consecuencias como el tiempo, ya que el producto lo envían las fábricas por cooperativas interprovinciales, de este modo las placas no llegan el día que desea. Cabe indicar que los estudiantes necesitan las PCB de forma inmediata”, “el 100% del total encuestado ha indicado que desea que exista una fábrica en la ciudad de Ambato que realice el proceso de metalizado de los agujeros, como de la manufactura del circuito electrónico ya sea este de una o doble capa. La respuesta en lógica debido a que los estudiantes requieren de este servicio para poder desarrollar sus prácticas”, “el metalizado de los agujeros del PCB, facilita el montaje y la soldadura de los componentes electrónicos, los mismos que se encuentran sobre las caras de la placa e introducidos en los hoyos con cobre. Mejorando la conexión entre las capas del circuito electrónico” [2], además de sus diferentes pruebas al calibrar la temperatura y tiempo obtuvo al final una resistencia de 0.1 ohm en los agujeros metalizados.

Nava (2013) desarrolló la investigación “Electrodeposición y caracterización de recubrimientos de Ni-P” el objetivo fue que mediante la aplicación de corriente directa obtener depósitos Ni-P con manipulación del fósforo, las demás en específico fueron las influencias que tenía el tratamiento térmico de la aleación Ni-P y ver el efecto hacia sus propiedades como la resistencia en el desgaste, dureza, resistencia a la corrosión y características morfológicas. Algo que menciona es que existen otros procesos de metalización y esos son: deposición física de vapor, deposición química, deposición térmica y electrodeposición con corriente directa o pulsante. Comenta que la ventaja de la técnica de electrodeposición a comparación de las otras es que puede revestir piezas de dimensiones más grandes y con un gasto menor en la operación. Algo muy interesante de este fenómeno es que puede cambiar las propiedades mecánicas de las piezas al cubrirlas de otro metal y aparte del bajo costo de producción [3]. Aquí comento algunos de los conceptos que tiene que ver con el tema:

- Electrolítico: Solución que contiene los iones de los elementos metálicos que se quiere depositar
- Cátodo: Elemento que sufre la reacción de reducción o igual conocido como electrodo de trabajo
- Ánodo: Elemento que sufre la reacción de oxidación, puede ser activo o inerte

Castillo (2008) desarrolló un manual, un apunte, un instructivo para el estudio del proceso de la electrodeposición dicho documento nombrado “Principios de electrodeposición” es del

departamento de ingeniería, facultad de estudios superiores Cuautitlán, UNAM Cuautitlán. Lo que posee prácticamente su lectura son los principios de la electrodeposición el cual comienza con la definición de este, menciona algunos principios de la electroquímica, los elementos para realizar este fenómeno y entre otras cosas más. Menciona el proceso electrolítico paso a paso, donde describe los elementos que intervienen y estos son: una fuente de voltaje, un recipiente, el electrolítico y los electrodos. Donde explica que la corriente eléctrica pasa a través de estos elementos porque son conductores y los cambios físicos se presentan en los electrodos, más aún en el electrodo denominado ánodo porque es el que se va a cubrir con películas finas del electrodo denominado cátodo. Igual una ley de Faraday de la electrólisis que dice lo siguiente: “La cantidad de cualquier elemento (radical o grupo de elementos) liberada ya sea en el cátodo o en el ánodo durante la electrólisis, es proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa la solución” [1]. Con esta ley se logra calcular la cantidad de materia que corroe o deposita sobre la otra, el enunciado se expresa matemáticamente así:

$$W = \frac{I \cdot T \cdot M}{n \cdot F}$$

Donde:

W = Cantidad de metal que se ha corroído o depositado (g)

I = Corriente (A)

T = Tiempo que dura el proceso (s)

M = Masa atómica del metal (g/mol)

N = Valencia del metal

F = Constante de Faraday = 96500 (A*s/mol)

Igual menciona algunas de las posibles configuraciones que puede haber por el tipo de forma que tendrá el material a metalizar.

Imaz (2013) desarrolló la investigación “Aplicación de técnicas de electrodeposición mediante pulsos de corriente para la obtención de recubrimiento metálicos” el objetivo fue más a la electrodeposición de metales usando pulsos de corriente, analizó los efectos en los parámetros de pulso sobre cómo el comportamiento del recubrimiento de los metales, su comparación fue con el otro método que es la corriente continua, evaluó los resultados de ambos. Analizó la herramienta

quimiométrica en el proceso de electrodeposición mediante la misma fuente (pulsos de corriente) [4].

El proceso de electrodeposición de cobre en placas de circuito impreso (PCBs) con agujeros pasantes es ampliamente utilizado en la industria electrónica para establecer interconexiones entre diferentes capas. La necesidad de lograr una deposición uniforme, especialmente en microvías con alta relación de aspecto, ha motivado el desarrollo de técnicas avanzadas como la electrodeposición por pulso inverso periódico (PPR), la cual ha demostrado mejorar el llenado y reducir defectos como vacíos o inclusiones de gas [5].

Además, estudios recientes han explorado el comportamiento electroquímico de diversos aditivos utilizados en los baños electrolíticos, como inhibidores y aceleradores, que influyen en la morfología del depósito de cobre. Estos aditivos, en combinación con parámetros optimizados de corriente y tiempo, permiten una mejor distribución del material metálico en los agujeros pasantes, incluso en geometrías complejas [6].

Dentro de este contexto, el control de temperatura durante el proceso es una variable crítica que afecta la eficiencia del transporte iónico y la adherencia del recubrimiento metálico. Una estrategia eficiente para esta tarea es el uso de controladores PID implementados en hardware analógico, utilizando amplificadores operacionales. Estos sistemas ofrecen bajo costo, baja latencia y confiabilidad en aplicaciones de control térmico industrial [7], [8].

El diseño analógico permite actuar en tiempo real sin depender de microcontroladores para la regulación de la señal de control, lo cual resulta útil en entornos donde se requiere estabilidad térmica precisa. Además, su implementación favorece la simplicidad del hardware y la robustez frente a interferencias electromagnéticas comunes en ambientes industriales.

El uso de plataformas de desarrollo embebido como Arduino Nano ha ganado aceptación en prototipos y sistemas de control automatizado debido a su facilidad de programación, bajo consumo y tamaño compacto. Este microcontrolador basado en el chip ATmega328 permite el monitoreo y control de variables físicas como temperatura, corriente y tiempo de operación, con soporte para sensores, pantallas LCD y dispositivos de entrada como encoders rotativos. Todo esto lo convierte en una solución ideal para proyectos de instrumentación y automatización en entornos educativos e industriales [9].

Tras haber revisado los antecedentes y trabajos previos relacionados con la electrodeposición de cobre, es fundamental profundizar en los principios científicos y técnicos que sustentan este proceso. Para comprender adecuadamente los avances presentados en el estado del arte y contextualizar el enfoque de esta investigación, se expone a continuación el marco teórico, el cual aborda los fundamentos electroquímicos que influyen en la calidad del depósito de cobre.

1.8 MARCO TEÓRICO

1.8.1 FUNDAMENTOS DE LA ELECTRODEPOSICIÓN

La electrodeposición es un proceso electroquímico que permite la formación de recubrimientos metálicos sobre superficies conductoras mediante la reducción de iones metálicos en una solución electrolítica. En el caso del cobre, este proceso se lleva a cabo en celdas electrolíticas donde el cobre metálico se deposita en el cátodo a partir de soluciones que contienen iones Cu^{2+} . Los parámetros operativos, como la densidad de corriente, la temperatura y la composición del baño, influyen significativamente en las propiedades del depósito obtenido [10].

Comprender los fundamentos de este proceso permite analizar con mayor precisión cómo se forma la estructura del recubrimiento, lo cual da paso al estudio de su morfología y las técnicas empleadas para caracterizarlo.

1.8.2 MORFOLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DE COBRE

La morfología del recubrimiento de cobre electrodepositado depende de varios factores, incluyendo la composición del baño y los parámetros de deposición. Las técnicas comunes para caracterizar estas películas incluyen:

- Microscopía Electrónica de Barrido (SEM): Permite observar la topografía y morfología superficial.
- Microscopía de Fuerza Atómica (AFM): Proporciona información sobre la rugosidad y estructura a nivel nanométrico.
- Difracción de Rayos X (XRD): Identifica las fases cristalinas presentes en el recubrimiento [11].

Una vez comprendidas las características estructurales y superficiales del recubrimiento, es posible valorar su aplicabilidad en distintos sectores industriales.

1.8.3 APLICACIONES DE LA ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE

La electrodeposición de cobre tiene diversas aplicaciones industriales, tales como:

- Fabricación de circuitos impresos (PCBs): Se utiliza para formar las pistas conductoras.
- Recubrimientos decorativos y protectores: Proporciona resistencia a la corrosión y mejora la apariencia estética.
- Microelectrónica: En la creación de interconexiones en dispositivos electrónicos [12].

Para optimizar estas aplicaciones, la comunidad científica ha realizado múltiples estudios enfocados en mejorar los parámetros del proceso y en el desarrollo de nuevas formulaciones para los baños electrolíticos, lo que se aborda en la siguiente sección.

1.8.4 ESTUDIOS PREVIOS Y AVANCES RECIENTES

Investigaciones recientes han explorado la influencia de diferentes aditivos y condiciones de proceso en la calidad del recubrimiento de cobre. Por ejemplo, el uso de aditivos como gelatina y tiourea ha demostrado mejorar la uniformidad y reducir la rugosidad del depósito [12]. Además, estudios sobre la variación de la densidad de corriente han mostrado efectos significativos en la microestructura y propiedades mecánicas del recubrimiento [13].

Con base en la problemática identificada, la revisión del estado del arte y los fundamentos teóricos previamente desarrollados, se establece una justificación sólida para el diseño e implementación de una herramienta tecnológica que permita controlar e instrumentar el proceso de deposición de cobre por electrodeposición en agujeros pasantes de placas de circuito impreso. A partir de estos antecedentes, en el siguiente capítulo se describe detalladamente la metodología adoptada para llevar a cabo el desarrollo experimental del sistema, incluyendo el enfoque general del proyecto, la selección de componentes, el diseño de circuitos y las estrategias de control utilizadas.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA CELDA ELECTROQUIMICA DE DEPOSICIÓN DE COBRE

Este capítulo describe la metodología seguida para el desarrollo de la herramienta tecnológica, estructurada en una secuencia de etapas que integran la aplicación de técnicas de investigación, diseño electrónico, programación de sistemas embebidos y modelado mediante software de diseño asistido por computadora (CAD). La figura 1 presenta un diagrama a bloques que resume de forma general las fases que conforman esta metodología. El propósito de este enfoque estructurado es garantizar que el desarrollo de la herramienta cumpla con los objetivos planteados, asegurando además su reproducibilidad y viabilidad para futuras implementaciones.

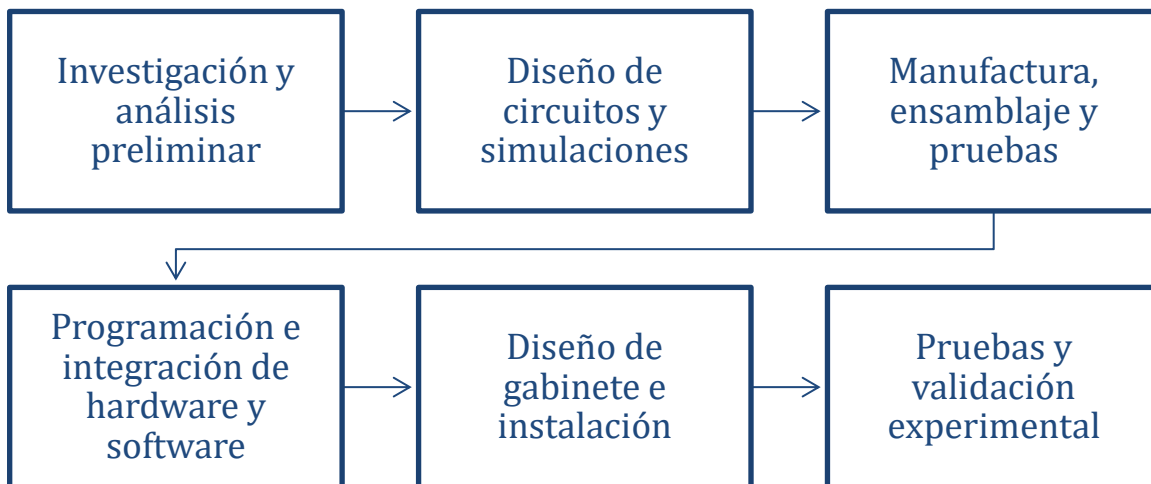


Figura 1 Diagrama de bloques de las etapas de diseño, implementación y prueba de la herramienta tecnológica para electrodeposición de películas de cobre

2.1 INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS PRELIMINAR

Realizar las investigaciones acerca de diferentes materias o disciplinas que se ven involucradas en el desarrollo de esta investigación, como pueden ser:

- Electrónica en el momento de diseñar placas de circuitos impresos para la lectura de sensores, controlar actuadores y así manipular las diferentes variables físicas que se manifiestan en la electrodeposición de películas de cobre.
- Programación para desarrollar una comunicación entre usuario y máquina, este mismo conocido como HMI (son las siglas en inglés de Human Machine Interface) para que haya un ajuste y monitoreo de este.

- Química en el momento de usar principios como la electrólisis y electrodeposición para la separación de iones en este caso del cobre y adherirlos a los agujeros de la placa para saber con lo que está constituido.

Familiarizarse con el proceso para la electrodeposición, las características que tiene y las partes de este para así realizar propuestas de ideas. De manera general en la figura 2 tomada de [1] se muestra las partes con las cuales está conformado, estas son:

- Fuente de alimentación
- Electrodo (ánodo y cátodo)
- Tanque
- Electrolito

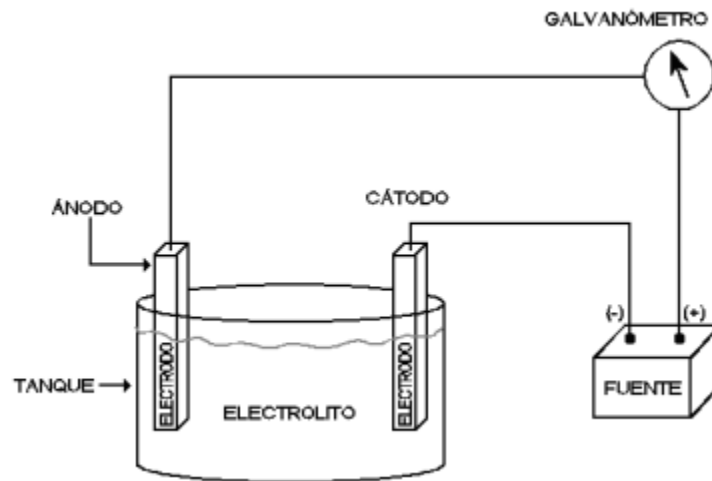


Figura 2 Diagrama esquemático general del sistema de electrodeposición de películas metálicas con componentes clave

El electrolito permanece en un recipiente donde está ambientado a lo necesario para su funcionamiento, esto es sobre la manera de tener un constante movimiento, una temperatura estable, la capacidad para sumergir por completo los electrodos, etc. Los electrodos en esta herramienta tecnológica son los que sufren este proceso de metalización ya que uno adquiere parte del material del otro, en este caso cobre.

La figura 3 adquirido de [1] plasma una configuración en la cantidad y posición de los electrodos, esta tiene como característica que el cubrimiento lo obtiene de manera más concentrada en una cara por la naturaleza de su posición.

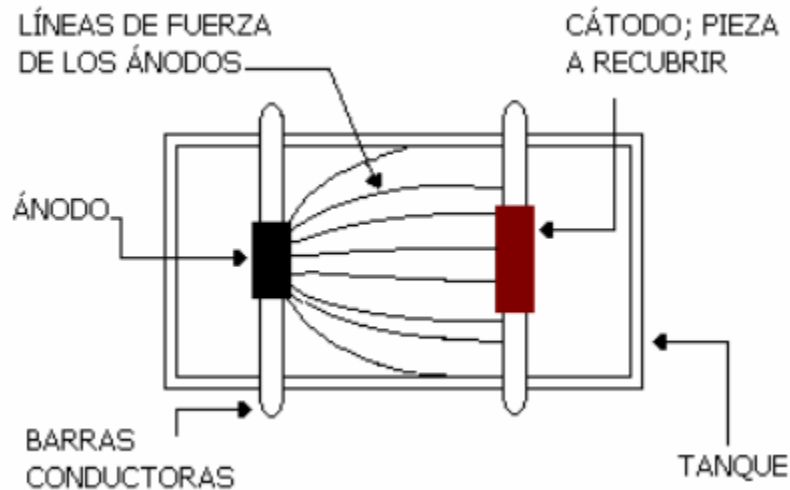


Figura 3 Diagrama esquemático de celda electroquímica convencional: configuración bipolar (ánodo-cátodo)

La figura 4 obtenido de [1] muestra la cantidad de 3 electrodos donde 2 son ánodos y el del centro es el cátodo, por naturaleza de la posición se observa que el recubrimiento está dirigido en ambas caras, idealmente planas.

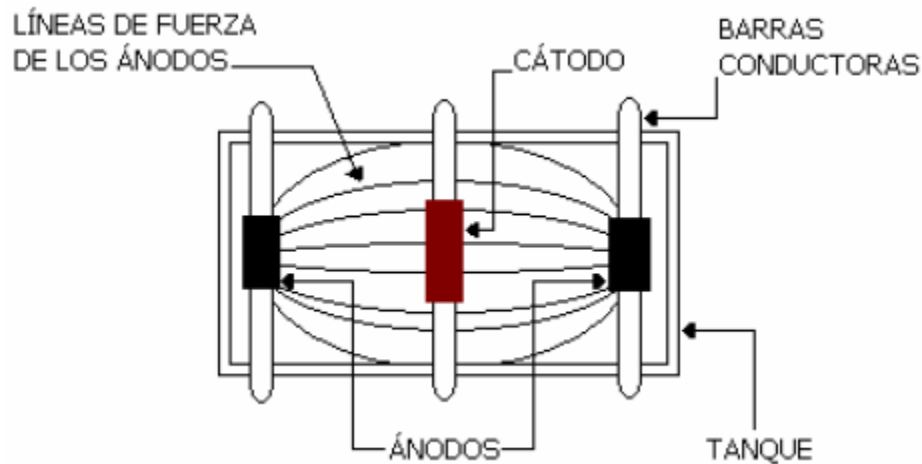


Figura 4 Diagrama esquemático de celda electroquímica con configuración simétrica (doble ánodo-cátodo central)

Con los fundamentos técnicos y criterios de diseño definidos, se procedió a la etapa de desarrollo de circuitos y simulaciones que darán soporte físico al sistema de control y monitoreo

2.2 DISEÑO DE CIRCUITOS Y SIMULACIONES

El diseño de circuitos electrónicos es una etapa fundamental para instrumentar, controlar (ajustar) y monitorear las variables involucradas en el proceso de electrodeposición. Este proceso se inicia con la definición funcional de cada subsistema, seguida de la selección de topologías electrónicas

adecuadas, cálculos de diseño y simulaciones para verificar su comportamiento antes de su implementación física, todo este proceso se realizó con la herramienta multisim.

Se diseñaron los siguientes subsistemas:

- **Control de corriente de electrodeposición:** Se desarrolló un circuito basado en dos transistores MOSFET conectados en paralelo, configurados para regular una señal de entrada de 0 a 5 V, que corresponde a una salida de corriente de 0 a 8 A hacia la celda electroquímica. La salida del circuito incluye los electrodos, el electrolito, una resistencia de carga y una fuente de 12 V.
- **Lectura de corriente:** Se incorporó el sensor ACS712, que proporciona una señal proporcional a la corriente medida. Debido a las características de este sensor, se diseñó un circuito adicional con amplificadores operacionales para ajuste de punto cero y ganancia (zero y span), logrando una salida analógica lineal de 0 a 5 V compatible con el microcontrolador.
- **Control de velocidad de agitación:** Se empleó un diseño similar al del control de corriente, utilizando tecnología MOSFET para manejar dos motores conectados en paralelo y alimentados con una fuente de 12 V. La señal de control también es de 0 a 5 V.
- **Control de temperatura:** Para el calentamiento del electrolito, se diseñó un circuito de control de potencia en corriente alterna mediante modulación por ancho de pulso (PWM) sincronizada con la red eléctrica (60 Hz). Se emplea un circuito de disparo para un TRIAC que regula la energía suministrada a los calentadores.
- **Lectura de temperatura:** Se utilizó un sensor tipo PT100. A partir de su hoja de datos se diseñó un circuito de acondicionamiento que trabaja en un rango de temperatura de 23 °C a 100 °C, implementando ajustes de cero y ganancia para obtener una señal de salida entre 0 y 5 V, proporcional a la temperatura.

Se espera obtener circuitos estables, lineales y seguros que respondan adecuadamente dentro de los rangos operativos definidos para cada variable física. Las simulaciones permiten identificar y corregir posibles fallos antes de la manufactura, reduciendo tiempos y costos en el proceso de prototipado.

Una vez verificado el funcionamiento mediante simulación, se procedió a la manufactura, ensamblaje y pruebas iniciales de los circuitos, lo que permitió avanzar hacia la implementación física del sistema.

2.3 MANUFACTURA, ENSAMBLAJE Y PRUEBAS

La manufactura de los circuitos electrónicos se llevó a cabo a partir de los diseños previamente validados por simulación, posteriormente se diseña la placa de circuito impreso en ultiboard. El proceso consideró dos métodos comunes de fabricación de PCBs: el ataque químico mediante cloruro férrico (FeCl_3) y la remoción de material mediante técnicas de mecanizado por Control Numérico Computarizado (CNC), seleccionando el más adecuado según la disponibilidad de recursos y precisión requerida. Una vez obtenidas las placas, se realizó el ensamblaje manual de los componentes electrónicos, siguiendo el orden establecido en el diseño esquemático. Posteriormente, cada módulo fue sometido a pruebas de funcionamiento, verificando la continuidad de las pistas, ausencia de cortocircuitos y correcto comportamiento eléctrico de cada etapa.

Se espera fabricar módulos electrónicos confiables, funcionales y físicamente compatibles con el gabinete final, que respondan adecuadamente en condiciones reales y puedan ser integrados sin necesidad de modificaciones mayores. Además, se espera verificar que las señales generadas o acondicionadas correspondan con lo establecido en el diseño teórico.

Con los módulos ensamblados y verificados, se procedió al desarrollo del software y la integración con los elementos de hardware, clave para el ajuste del sistema.

2.4 PROGRAMACIÓN E INTEGRACIÓN DE HARDWARE Y SOFTWARE

En esta etapa se desarrolla la programación necesaria para el control, visualización e interacción del sistema con el usuario final. La lógica de operación se estructura de manera modular para facilitar la navegación por menús, el monitoreo de variables y la manipulación de parámetros críticos del proceso de electrodeposición. El código se implementa utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE, programando el microcontrolador ATmega328P embebido en una placa Arduino Nano.

Las principales funcionalidades implementadas abarcan el control y monitoreo de cuatro variables clave: tiempo de deposición, temperatura, velocidad de agitación e intensidad de corriente. Para la interacción hombre-máquina, se diseña una interfaz textual mostrada en una pantalla LCD de 20 columnas por 4 filas (20x4), lo que permite desplegar información clara y estructurada. La

navegación por los menús y la modificación de los parámetros se realiza mediante un encoder rotativo KY-040, el cual emite pulsos en ambos sentidos de rotación, facilitando su uso como selector.

La programación se estructura para evitar bloqueos del sistema, utilizando la función `millis()` en lugar de `delay()` para la gestión del temporizador. Esto permite que las funciones de monitoreo y ajuste permanezcan operativas durante todo el ciclo de ejecución del proceso, garantizando una interfaz reactiva y confiable. Cada menú incluye la posibilidad de modificar los parámetros por defecto y reflejar los cambios en tiempo real, manteniendo la consistencia con las condiciones del proceso.

Finalmente, una vez concluida la implementación del software, se procede a la integración con el hardware previamente fabricado. Se conectan los módulos al microcontrolador para evaluar su funcionamiento conjunto, asegurando la compatibilidad lógica y eléctrica entre los elementos del sistema.

Se espera que el sistema responda adecuadamente a las órdenes del usuario y que cada módulo funcione sin interferencias, manteniendo una operación continua y precisa durante la ejecución del proceso de electrodeposición.

Una vez integrado el sistema electrónico con su respectiva lógica de control, se diseñó e instaló el gabinete que alojaría todos los elementos de forma segura y funcional.

2.5 DISEÑO DE GABINETE E INSTALACIÓN

Una vez completadas las etapas de diseño de circuitos y desarrollo de software, se procede con el diseño mecánico del gabinete que aloja la instrumentación electrónica, así como de la celda electroquímica donde se lleva a cabo el proceso de electrodeposición con la herramienta CATIA. Esta fase tiene como objetivo principal garantizar la correcta disposición física de los componentes, su accesibilidad, seguridad y operatividad.

Se contemplan dos unidades funcionales principales:

1. **Celda electrolítica:** recipiente destinado a contener la solución electrolítica y alojar los electrodos. Su diseño considera la disposición geométrica de los ánodos y del cátodo, así

como la integración de sensores (PT100) y elementos calefactores, la figura 5 muestra una idea de la celda electrolítica.

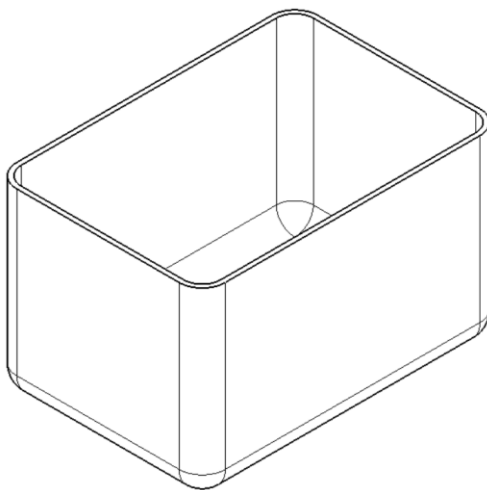


Figura 5 Vista isométrica del modelo 3D de la celda electroquímica

2. **Gabinete de instrumentación:** carcasa destinada a contener las placas electrónicas, el microcontrolador, el dispositivo de monitoreo y ajuste, así como las conexiones eléctricas necesarias. El diseño asegura el espacio suficiente para el montaje, ventilación y mantenimiento como se muestra en la figura 6.

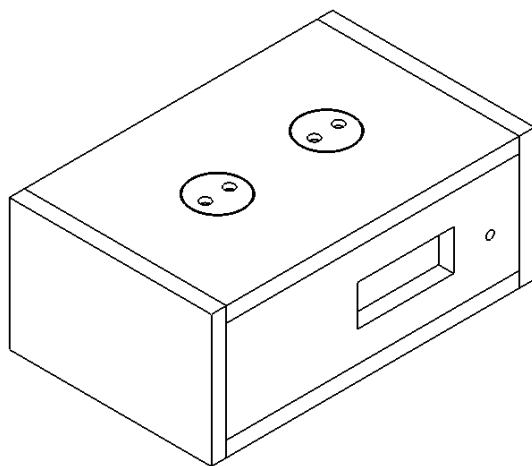


Figura 6 Vista isométrica del modelo 3D de la unidad de ajuste y monitoreo para electrodeposición

Paralelamente, se diseña un sistema de acoplamiento magnético para la agitación del electrolito, evitando uniones mecánicas directas que puedan generar contaminación o desgaste. Para ello, se modela un cilindro acoplado al eje de un motor DC como se muestra en la figura 7, con alojamientos para imanes de neodimio dispuestos de forma estratégica. Este mecanismo permite accionar una

barra magnética (agitador) ubicada dentro de la celda, emulando el funcionamiento de un agitador magnético comercial.

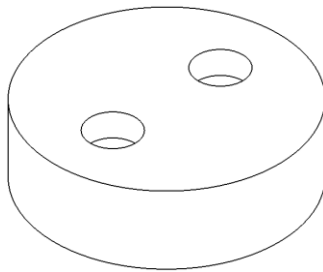


Figura 7 Vista isométrica del modelo 3D del acoplador magnético para agitación del electrolito

Una vez finalizados los modelos, se procede a su fabricación y ensamblaje, realizando las perforaciones y fijaciones necesarias para montar las placas PCB, sensores, módulos de control y demás elementos.

Se espera obtener una estructura robusta, compacta y funcional, que permita integrar todos los elementos electrónicos y electroquímicos del sistema, facilitando su operación, protección y mantenimiento. Además, el sistema de agitación magnética debe ofrecer una transmisión eficiente sin contacto mecánico directo, garantizando un entorno estanco y confiable.

Con todos los subsistemas ya ensamblados e integrados, la siguiente etapa consistió en someter la herramienta tecnológica a pruebas funcionales y validaciones experimentales, a fin de verificar su desempeño en condiciones reales de operación.

2.6 PRUEBAS Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Una vez ensamblada e integrada completamente la herramienta tecnológica, se procedió a realizar pruebas experimentales sistemáticas para verificar su correcto funcionamiento. Estas pruebas incluyeron la interacción entre el software y hardware, el comportamiento de las señales de control, la respuesta de los sensores y actuadores, así como la estabilidad y precisión del sistema en condiciones reales de operación.

El procedimiento consistió en alimentar el sistema y ejecutar el software en condiciones controladas, monitoreando cada una de las funciones: temporizador, control de temperatura, velocidad de agitación e intensidad de corriente. Se observaron las respuestas del sistema frente a diferentes configuraciones y se realizaron ajustes necesarios para garantizar una operación confiable y continua.

Una vez definida la metodología de trabajo, se procede a la implementación práctica del sistema propuesto. En el siguiente capítulo se detallan las etapas de desarrollo experimental, incluyendo el diseño físico de los circuitos de acondicionamiento, la programación del microcontrolador, la integración de los elementos de control y monitoreo, así como las pruebas realizadas para validar el funcionamiento de la herramienta tecnológica en condiciones reales de operación.

CAPÍTULO III. IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE: PARÁMETROS Y CONDICIONES EXPERIMENTALES

En este capítulo se muestra el proceso que se lleva a cabo para el desarrollo de la herramienta tecnológica, esto utilizando diferentes herramientas y elementos para su elaboración. El proceso que se realiza son propuestas, cálculos teóricos, diseños experimentales de los circuitos electrónicos, simulaciones, diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés Computer - Aided Design), manufactura de PCB y por último pruebas.

3.1 DISEÑO DEL CIRCUITO CONTROLADOR DE ÁNGULO DE FASE PARA LA TEMPERATURA

La figura 8 muestra un calentador fijo, este elemento se alimenta directamente a la red eléctrica de 127v y tiene una potencia de 100w. Al momento de trabajar es de una manera directa al líquido que se requiere calentar, de esa forma se procede a colocar 3 de estos calentadores y observar que desde una temperatura ambiente de 23 °C demora aproximadamente 90 minutos para alcanzar los 100 °C.



Figura 8 Fotografía del calentador de inmersión para electrolito

Para el control de la temperatura de dicho dispositivo, conectada directamente a la red de corriente alterna la cual tiene 127 v con 60 Hz (hercios), se emplea un sistema basado en la modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés). La señal PWM se utiliza para regular el ángulo de disparo de un TRIAC permitiendo un control sobre el ciclo de conducción del dispositivo y, por ende, sobre la potencia entregada al calentador fijo. Este enfoque proporciona un método ajustable para mantener la temperatura deseada de la solución, adaptándose a las variaciones en la demanda térmica.

Se desarrolla un circuito electrónico para generar una señal PWM sincronizada con la señal senoidal de la red eléctrica por medio de un proceso eléctrico y electrónico, dicho proceso permita obtener una señal PWM con las características necesarias para el control del ángulo de disparo en un TRIAC.

El proceso comienza con un transformador para la obtención de un nivel adecuado de voltaje ya reducido, seguro y más sencillo de trabajar en el circuito electrónico. Posteriormente, la señal se somete a un proceso de rectificación que solamente permite la salida de valores positivos de la onda.

Lo último de esta etapa es adquirir la señal diente de sierra completamente sincronizada con la onda rectificada. Se utiliza un circuito que asegura la generación de dicha señal y que mantenga la misma frecuencia de la red eléctrica, de esa forma se asegura que ambas estén sincronizadas.

La figura 9 ilustra este proceso:

1. El primer gráfico representa la señal senoidal reducida en amplitud comparada a la que se recibe directamente de la red eléctrica.
2. El segundo gráfico muestra la rectificación de la señal senoidal para producir únicamente ondas positivas.
3. El tercer gráfico presenta una señal diente de sierra.

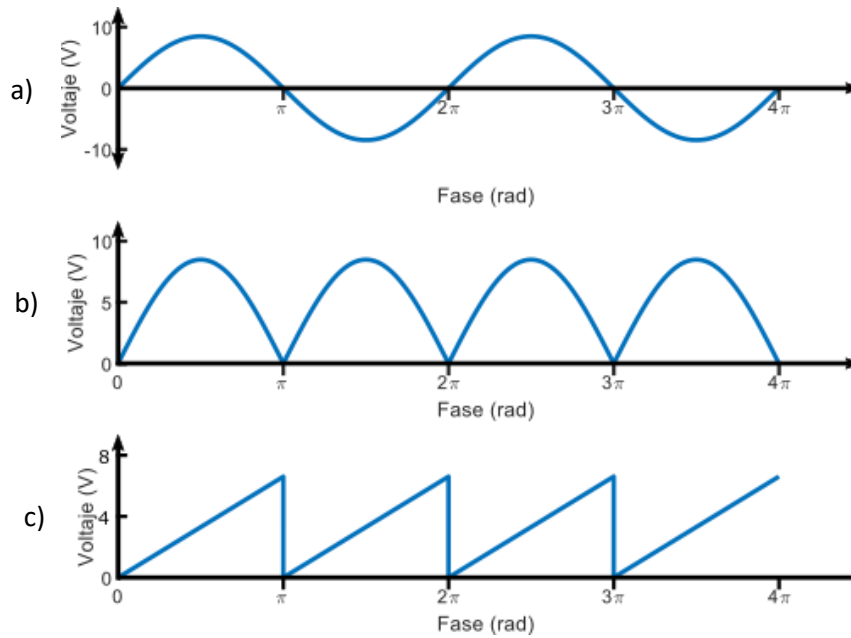


Figura 9 a) Gráfica de señal senoidal de la red eléctrica b) Gráfica de señal de onda completa rectificada c) Gráfica de señal diente de sierra

El procesamiento de señal se realiza con el circuito que se presenta en la figura 10, como se mencionó anteriormente este circuito está diseñado para la obtención de una señal diente de sierra sincronizado con la frecuencia de la red eléctrica (60Hz).

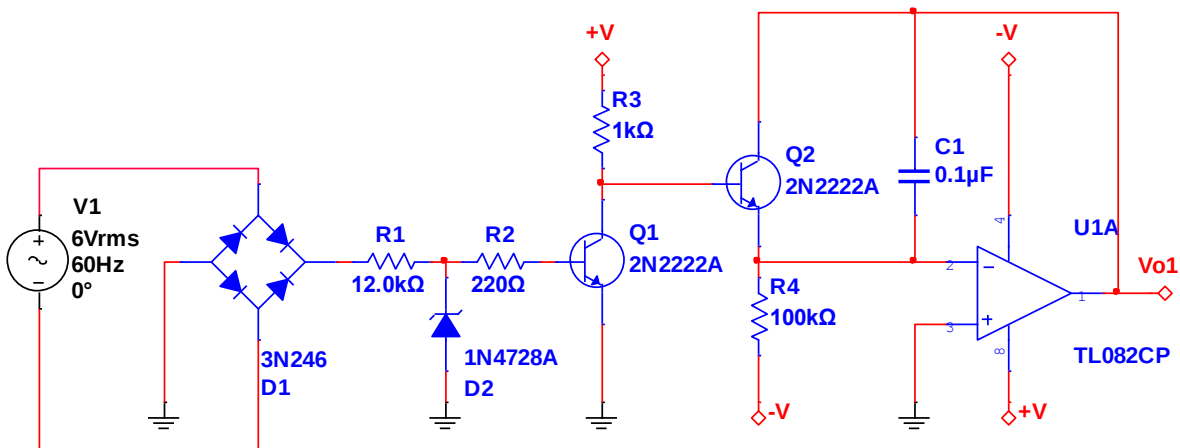


Figura 10 Diagrama esquemático del circuito convertidor senoidal-diente de sierra sincronizado

La señal diente de sierra es introducida a la terminal no inversora de un amplificador operacional configurado como comparador de voltaje, este es comparado con una señal ajustable para su control. El resultado de la comparación es una señal PWM totalmente sincronizada a la frecuencia de la red eléctrica, en las siguientes figuras se explica a más a detalle el motivo de este fenómeno.

Iniciamos con la figura 11, esta expone la comparación de una señal diente de sierra con una señal constante de 2 volts, idealmente la señal diente de sierra tiene un comportamiento de incremento constante y periódicamente hasta llegar al límite de su amplitud. Dividimos este incremento en 2 partes, la primera parte cuando es menor que el valor a comparar (2v) y la segunda parte cuando es mayor, cuando es menor observamos que el comparador nos entrega un estado en alto, y cuando el incremento empieza a ser mayor a los 2 volts entonces entrega un estado bajo.

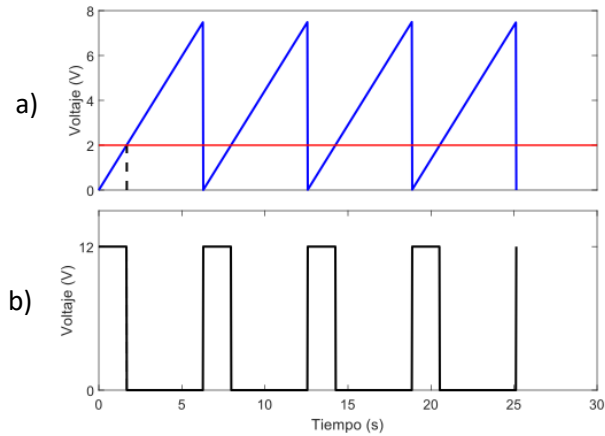


Figura 11 a) Gráfica de señal diente de sierra y señal contante de 2v b) Gráfica de señal PWM con ciclo de trabajo 26.6%

En la figura 12 observamos que, la señal a comparar es de 5 volts, esto genera un cambio en la salida y se refleja en las longitudes de los estados, se percibe que la longitud del estado en alto ha incrementado.

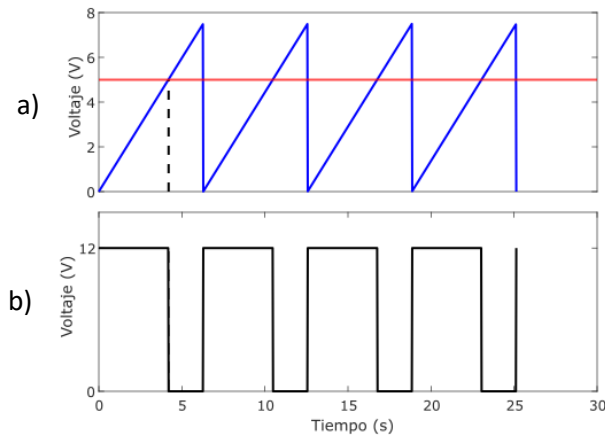


Figura 12 a) Gráfica de señal diente de sierra y señal contante de 5v b) Gráfica de señal PWM con ciclo de trabajo 66.6%

Lo mismo sucede si la señal a comparar sigue aumentando, por ejemplo, con 7 volts como se ilustra en la figura 13, la longitud del estado en alto incrementa hasta casi ser el 100% de su ciclo de trabajo. Con estas variaciones podemos evidenciar que se puede manipular el ciclo de trabajo de la señal PWM.

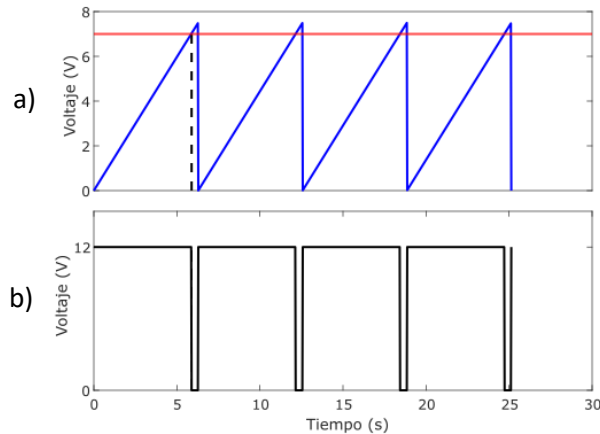


Figura 13 a) Gráfica de señal diente de sierra y señal constante de 7v b) Gráfica de señal PWM con ciclo de trabajo 93.3%

El diseño del circuito electrónico se muestra en la figura 14 donde la entrada inversora tiene la señal diente de sierra y la entrada no inversora es el voltaje que se ajusta para el control del ciclo de trabajo en el PWM, este es el voltaje de control PID, y de alimentación es GND y 12v.

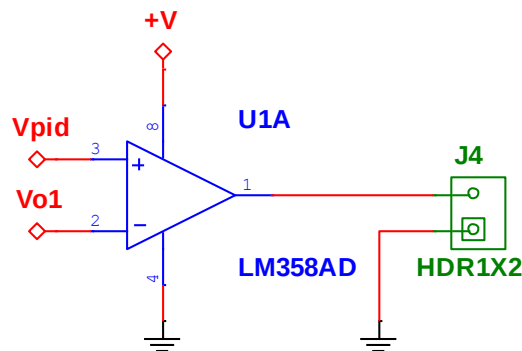


Figura 14 Diagrama esquemático del circuito comparador para generación de PWM

En la figura 15 ilustra el diseño y manufacturación del circuito encargado de generar la señal PWM sincronizada con la red eléctrica, es de una cara y sus dimensiones son de 40x40 mm. A continuación, se describe de manera resumida las principales características y funcionamientos del PCB:

1. **Entrada de la señal:** Desde un transformador recibe una señal de baja tensión (6v), se realiza esto para un manejo seguro en las etapas de procesamiento electrónico.
2. **Etapas de rectificado:** Con la señal de entrada se rectifica y filtra, con esto se obtiene una onda rectificada para obtener solo voltaje positivo.
3. **Generación de la señal diente de sierra:** La onda rectificada se convierte a una señal diente de sierra, la cual está sincronizada con la frecuencia de la red eléctrica (60 Hz), con esto se obtiene la primera etapa para la señal PWM.
4. **Etapas de comparación:** Con un amplificador operacional configurado como comparador procesa la señal diente de sierra con una referencia constante ajustable, en este caso la del controlador PID y así generar la señal PWM.

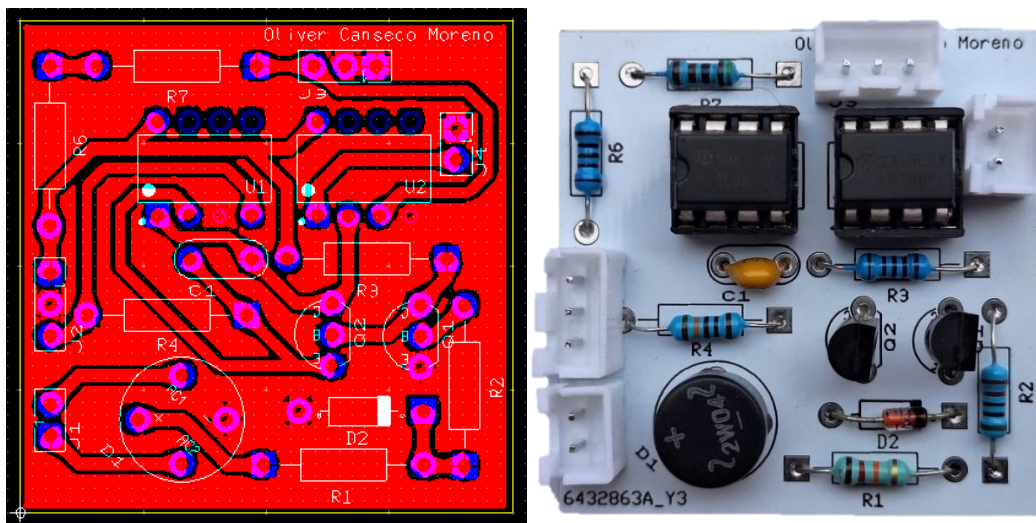


Figura 15 Diseño y manufacturación del PCB para el generador PWM sincronizado a la red eléctrica

La figura 22 ilustra el diseño del circuito electrónico para controlar el ángulo de disparo con un TRIAC, esto permite modular la potencia que se entrega a los calentadores fijos, la señal de entrada es del PWM que interactúa con el optoacoplador, esto garantiza un aislamiento eléctrico entre el circuito de control y potencia.

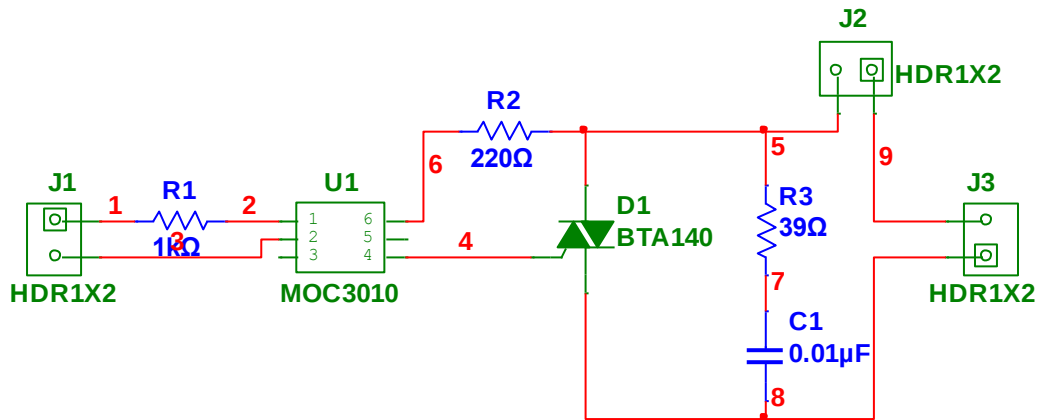


Figura 16 Diagrama esquemático del circuito de ajuste de fase para disparo de TRIAC

La figura 23 muestra el diseño del circuito de control para el ángulo de disparo en PCB y manufacturación del mismo. Esto para separar el circuito de potencia con el de control, tiene como entrada la señal del PWM y GND, como salida es para conectar los calentadores fijos y la alimentación eléctrica de 127v AC, las dimensiones son de 50x25 mm.

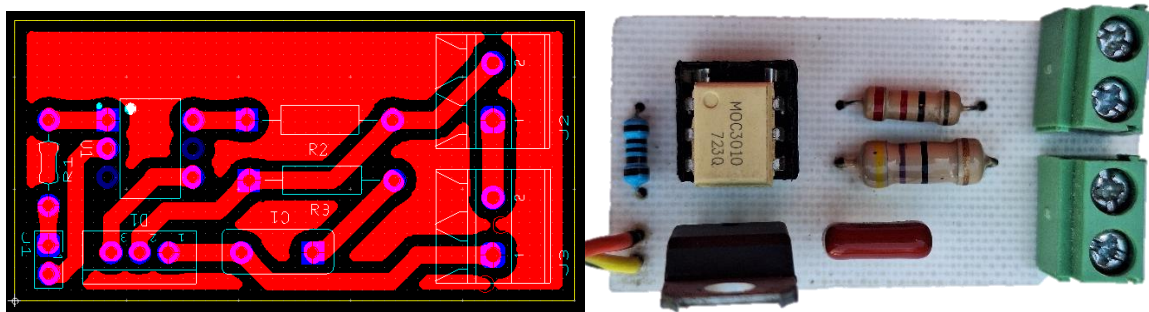


Figura 17 Diseño y manufacturación PCB del circuito de control de fase para disparo de TRIAC

3.4 DISEÑO DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR DE SEÑAL DEL TRANSDUCTOR PT100

Para la lectura de temperatura se utiliza un transductor PT100 con la característica de que es una resistencia varía respecto a la temperatura que se encuentre, con la información del fabricante se muestra la resistencia que presenta de 0 °C a 100 °C en la tabla 1.

Tabla 1 Resistencias del transductor PT100

° C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.9	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.4
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.9	111.28
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	113.99	114.38	114.77	115.15
40	115.54	115.93	116.31	116.7	117.08	117.47	117.85	118.24	118.62	119.01

50	119.4	119.78	120.16	120.55	120.93	121.32	121.7	122.09	122.47	122.86
60	123.24	123.62	124.01	124.39	124.77	125.16	125.54	125.92	126.31	126.69
70	127.07	127.45	127.84	128.22	128.6	128.98	129.37	129.75	130.13	130.51
80	130.89	131.27	131.66	132.04	132.42	132.8	133.18	133.56	133.94	134.32
90	134.7	135.08	135.46	135.84	136.22	136.6	136.98	137.36	137.74	138.12
100	138.5	138.88	139.26	139.64	140.02	140.39	140.77	141.15	141.53	141.91

El transductor PT100 se encuentra en contacto directo con el electrolito o sustancia acuosa para la metalización lo cual una de las variables a monitorizar y controlar es la temperatura, dicha sustancia permanece en un contenedor de plástico para su monitoreo.

El rango de temperatura a leer y controlar es de 23 °C a 100 °C el cual en resistencia se representa como 108.96 Ω a 138.5 Ω , esto tiene una diferencia de 29.54 Ω para la temperatura mínima a máxima. Para percibir los cambios de resistencia y configurar el mínimo del rango asignado se utiliza el puente de Wheatstone como se muestra en la figura 28.

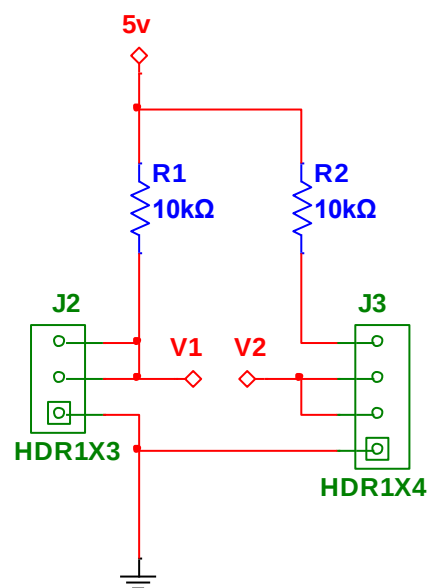


Figura 18 Diagrama esquemático del circuito puente de Wheatstone para el transductor PT100

El puente de Wheatstone consta de 4 resistencias, en la figura anterior muestra R1 y R2 como dos resistencias fijas de 10k Ω y 2 variables, el componente J2 es un potenciómetro que varía de 0 Ω a 200 Ω y J3 es el PT100. El propósito de J2 es que configure el rango mínimo de temperatura el cual es 108.96 Ω (23°C).

El circuito está constituido por dos divisores de tensión donde cada uno tiene como salida V1 y V2, la salida de este se expresa en la ecuación 1:

$$V_o = V_2 - V_1 \quad (1)$$

Donde V1 es el ajuste mínimo de salida y se muestra en la ecuación 2, V2 es el voltaje que está cambiando respecto a la temperatura y su expresión es la ecuación 3, ambas ecuaciones son divisores de tensión.

$$V_1 = (V_{cc})\left(\frac{J_2}{R_1 + J_2}\right) \quad (2)$$

$$V_2 = (V_{cc})\left(\frac{J_3}{R_2 + J_3}\right) \quad (3)$$

Utilizando la ecuación 1 y sustituyendo los valores con la ecuación 2 y 3, configurando el potenciómetro J2 con 108.96 Ω y variando la resistencia de J3 con los valores de 23 °C a 100 °C obtenemos la tabla 2.

Tabla 2 Voltaje del puente de Wheatstone

° C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20				0	1.9E-04	3.8E-04	5.7E-04	7.6E-04	9.5E-04	1.1E-03
30	1.3E-03	1.5E-03	1.7E-03	1.9E-03	2.1E-03	2.3E-03	2.5E-03	2.7E-03	2.8E-03	3.0E-03
40	3.2E-03	3.4E-03	3.6E-03	3.8E-03	4.0E-03	4.2E-03	4.3E-03	4.5E-03	4.7E-03	4.9E-03
50	5.1E-03	5.3E-03	5.5E-03	5.7E-03	5.8E-03	6.0E-03	6.2E-03	6.4E-03	6.6E-03	6.8E-03
60	7.0E-03	7.2E-03	7.4E-03	7.5E-03	7.7E-03	7.9E-03	8.1E-03	8.3E-03	8.5E-03	8.7E-03
70	8.8E-03	9.0E-03	9.2E-03	9.4E-03	9.6E-03	9.8E-03	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.1E-02
80	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.2E-02	1.2E-02	1.2E-02	1.2E-02	1.2E-02
90	1.3E-02	1.3E-02	1.3E-02	1.3E-02	1.3E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.4E-02	1.4E-02	1.4E-02
100	1.4E-02									

El rango de voltaje que entrega el puente de Wheatstone es de 0 V a 14.41 mV, en la lectura de este se utiliza el microcontrolador ATmega328P que posee 8 pines de entrada analógica de 10 bits de resolución (1024 datos), esto con un máximo de lectura de 5 V. Para configurar el rango de lectura se utiliza un amplificador de instrumentación como se muestra en la figura 29.

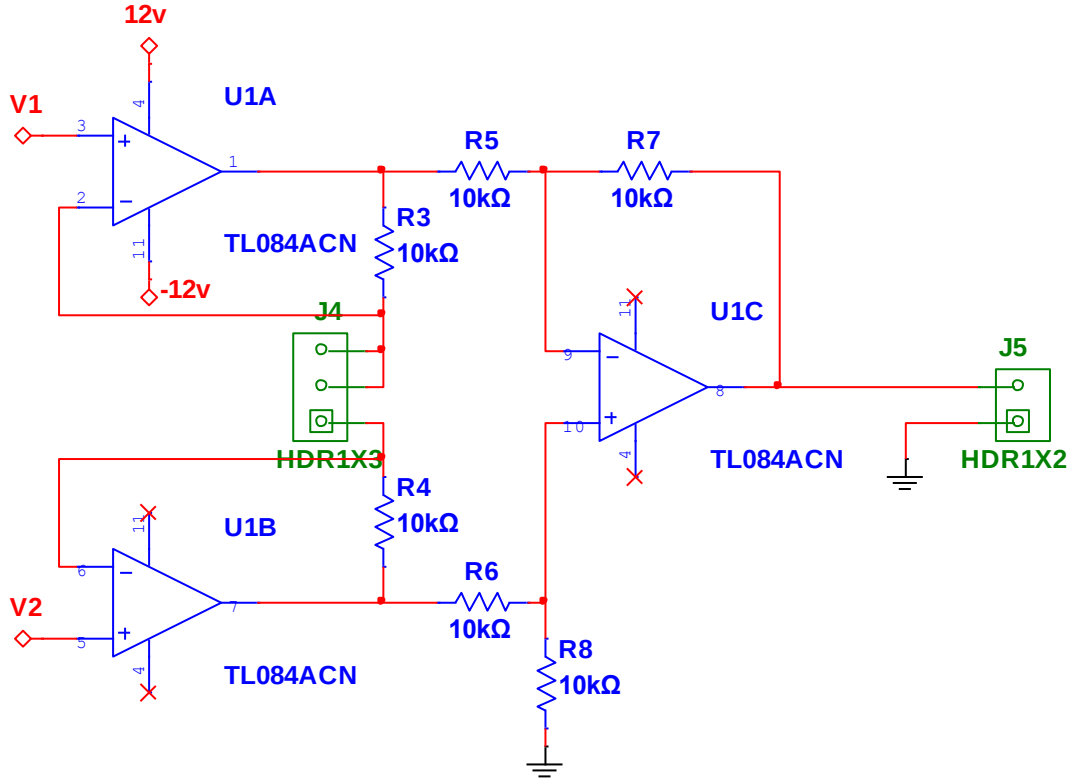


Figura 19 Diagrama esquemático del circuito amplificador de instrumentación para el transductor PT100

Donde la ecuación 4 representa el circuito del amplificador de instrumentación.

$$V_o = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{[R_3][R_4]}{J4} \right) \left(\frac{[R_7][R_8]}{[R_5][R_6]} \right) \quad (4)$$

Para la simplificación de la ecuación se propone resistencias iguales, en este caso se elige de 10kΩ, el resultado se ve en la ecuación 5.

$$V_o = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R}{J4} \right) \quad (5)$$

Se hace un despeje del componente J4 para asignar el valor de la resistencia, sustituyendo se expresa en la ecuación 6 y el despeje en la ecuación 7.

$$5v = (0.06830398974v - 0.05389278422v) \left(1 + \frac{20000\Omega}{J4} \right) \quad (6)$$

$$J4 = \frac{20000\Omega}{\frac{5v}{0.01441120552v} - 1} \quad (7)$$

El resultado de esta operación es de 57.81144861 Ω el cual para su manipulación y ajuste se utiliza un potenciómetro el cual puede variar de 0 Ω a 100 Ω . Los valores que entrega el amplificador de instrumentación de manera teórica son como se ven en la tabla 3.

Tabla 3 Voltaje del acondicionador de voltaje para el transductor PT100

° C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20					0.0662	0.1307	0.1969	0.2631	0.3293	0.3937
30	0.4599	0.5261	0.5922	0.6567	0.7229	0.7890	0.8535	0.9196	0.9857	1.0502
40	1.1163	1.1824	1.2468	1.3129	1.3773	1.4434	1.5078	1.5739	1.6383	1.7044
50	1.7704	1.8348	1.8992	1.9652	2.0296	2.0956	2.1600	2.2260	2.2904	2.3564
60	2.4207	2.4850	2.5510	2.6154	2.6797	2.7457	2.8100	2.8742	2.9402	3.0045
70	3.0688	3.1331	3.1990	3.2633	3.3276	3.3918	3.4578	3.5220	3.5862	3.6505
80	3.7147	3.7789	3.8448	3.9091	3.9733	4.0375	4.1017	4.1659	4.2301	4.2943
90	4.3584	4.4226	4.4868	4.5510	4.6151	4.6793	4.7434	4.8076	4.8717	4.9359
100	5.0000									

El diseño y manufacturación del PCB se ilustra en la figura 30, este tiene una dimensión de 40x36 mm, con la característica de 2 potenciómetros para ajustar el zero y span, de entrada es la alimentación, también la entrada del transductor PT100 y por último una salida para el microcontrolador de 0 a 5v

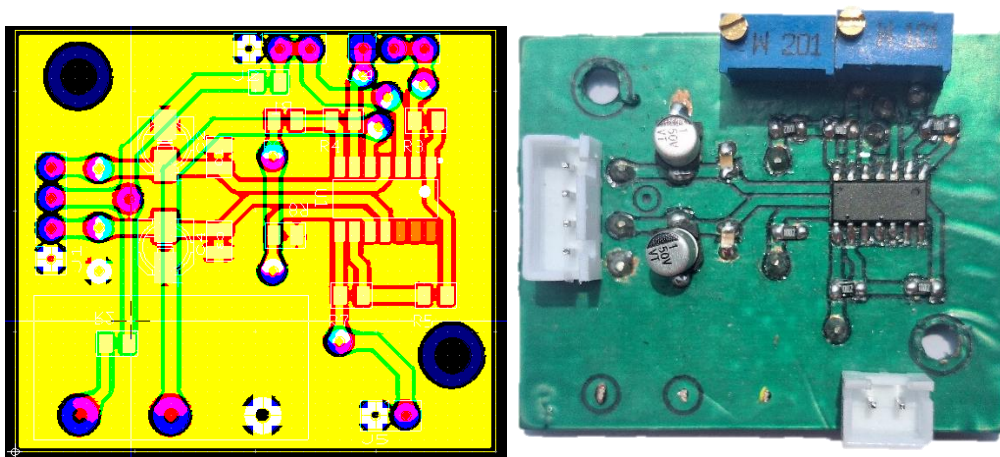


Figura 20 Diseño y manufacturación del PCB para acondicionar la señal del transductor PT100

Se diseña y manufactura una placa de circuito impreso que permita la conexión del transductor PT100 desde el exterior, haciendo referencia al gabinete y también facilitar el cambio de este, la figura 31 muestra el diseño con unas dimensiones de 45x20 mm.

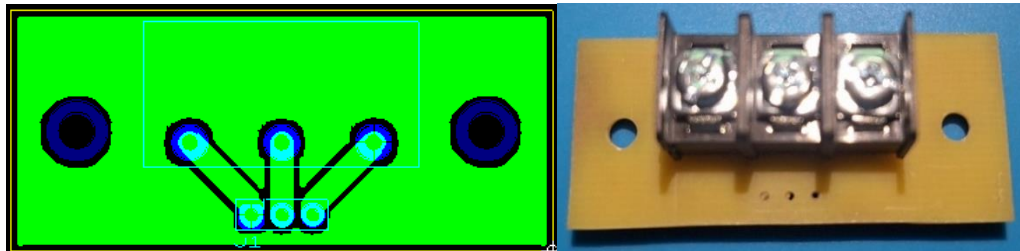


Figura 21 Diseño y manufacturación del PCB para la conexión del transductor PT100

3.2 DISEÑO DEL CIRCUITO CONTROLADOR DE VELOCIDAD DEL SISTEMA DE AGITACIÓN

El siguiente circuito mostrado en la figura 24 está diseñado para controlar la velocidad de 2 motores de corriente continua a través de una señal PWM generada por el microcontrolador. El control se realiza mediante transistores MOSFET tipo N (IRFZ44N), los cuales están configurados como low-side switching. La alimentación principal de los motores es de 12v y la señal de control es una señal PWM que entrega el microcontrolador en un rango de 0 a 5v.

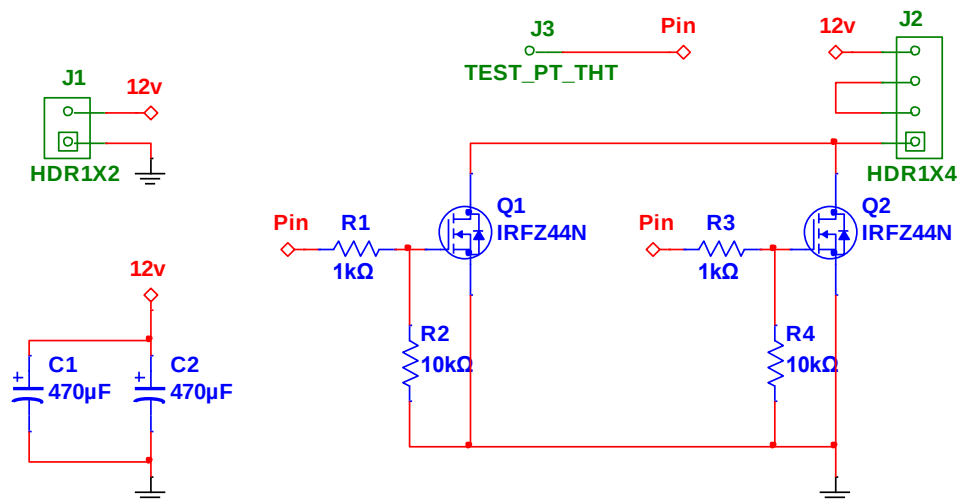


Figura 22 Diagrama esquemático del circuito de ajuste de corriente mediante MOSFET

El diseño y manufacturación del PCB se muestra en la figura 25, este tiene una dimensión de 55x45 mm, como entrada un puerto para la señal PWM y GND, como salida son 2 terminales de tornillo para la conexión de la fuente de alimentación y los 2 motores en paralelo.

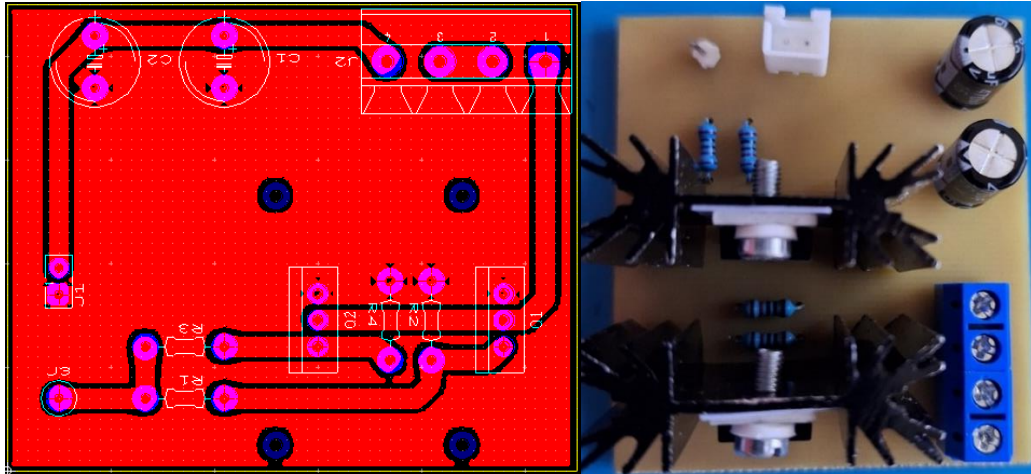


Figura 23 Diseño PCB del circuito de control de corriente mediante MOSFET

3.3 DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL DE CORRIENTE

En el control de corriente, se utiliza el mismo circuito de conmutación con MOSFETs controlado por señal PWM descrito anteriormente (3.2 CONTROL DE MOTOR DC). En lugar de los motores DC como carga, se utiliza dos arreglos de resistencias en paralelo, dicho arreglo se muestra en la figura 26. La combinación de estas 10 resistencias permite obtener una resistencia total de 1Ω , la corriente que tiene de salida es proporcional al voltaje que se le administra.

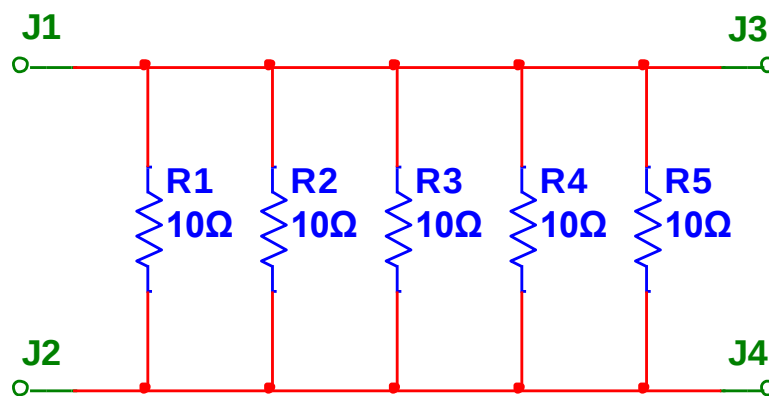


Figura 24 Diagrama esquemático del circuito arreglo de resistencias

El diseño y manufacturación del PCB se muestra en la figura 27 con una dimensión de 80x50 mm, esta configuración es de 10 resistencias en paralelo para obtener una resistencia total de 1Ω , en la

figura solo se aprecia una placa, pero en realidad son 2 que se conectan entre ellas, por ese motivo tiene dos perforaciones de más para la conexión.

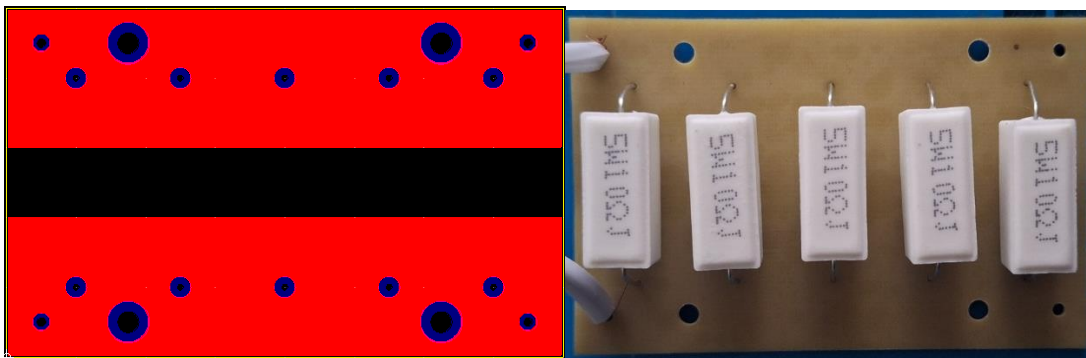


Figura 25 Diseño PCB del circuito de arreglo de resistencias

3.5 DISEÑO DEL CIRCUITO SENSOR DE CORRIENTE

En la lectura de la corriente se utiliza el sensor ACS712 el cual internamente funciona con un sensor hall, al conectar el dispositivo que se quiere medir de manera directa a las terminales del integrado y permitir el flujo de corriente de este, se genera un campo magnético lo cual dicho sensor lo traduce a una tensión. Existen diferentes modelos de este, el que se utiliza permite leer un rango de -30A a 30A con una sensibilidad de 66mV/A. La figura 33 se visualiza en diagrama del circuito.

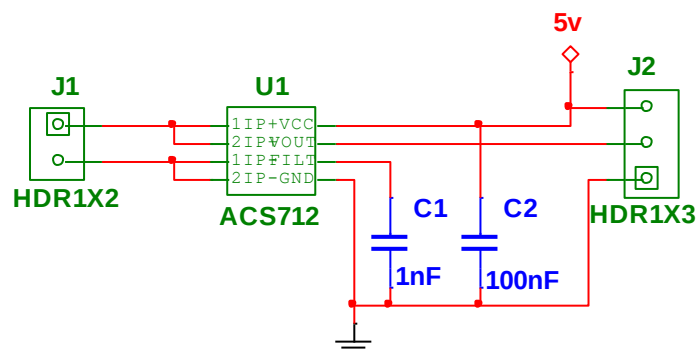


Figura 26 Diagrama esquemático del circuito ACS712

El sensor ACS712 tiene un ajuste de fabrica donde la lectura de 0A tiene una salida de 2.5v, esto permite hacer las lecturas de corriente positivas y negativas, el voltaje de salida es proporcional a la corriente que entra y está se puede interpretar por la ecuación de la recta con pendiente como se muestra en la ecuación 8.

$$y = mx + b \quad (8)$$

Con la ecuación 8 tenemos que la variable dependiente es y, en este caso es el voltaje (v), la variable independiente es x y se interpreta como la corriente aplicada (I), la pendiente es la sensibilidad del modelo utilizado (m) y la intercepción con el eje Y (en este caso voltaje) es 2.5, sustituyendo queda como se muestra en la ecuación 9.

$$v = (66mV/A)(I) + 2.5v \quad (9)$$

La lectura del sensor es de -30A a 30A, sustituyendo esos valores en la ecuación 9 nos da como resultado el rango de voltaje, este es de 0.52v a 4.48v. El rango que se lee en este circuito es de 0A a 10A así que la tabulación de la ecuación 9 es como se observa en la tabla 4.

Tabla 4 Voltaje del sensor de corriente ACS712

I	V
0	2.5
1	2.566
2	2.632
3	2.698
4	2.764
5	2.83
6	2.896
7	2.962
8	3.028
9	3.094
10	3.16

La tabla 4 muestra el voltaje de salida de 2.5v a 3.16v, esto es un span de 0.66 volts, el rango de lectura del microcontrolador Atmega328P es de 0v a 5v con una resolución de 10bits. Se realiza un circuito de acondicionamiento de señal para convertir la señal del sensor con una salida óptica para el microcontrolador.

Se configura la señal de 2.5v a 0v con un amplificador, este configurado como restador y se muestra en la figura 34. Su expresión matemática está descrita en la ecuación 10 si las 4 resistencias tienen el mismo valor.

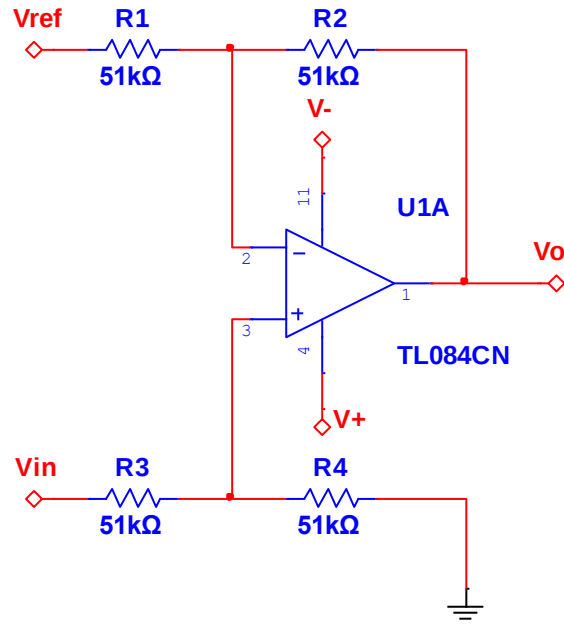


Figura 27 Diagrama esquemático del circuito amplificador diferencial para acondicionamiento de señal del sensor ACS712

$$V_o = V_{in} - V_{ref} \quad (10)$$

Para el control del voltaje de referencia (V_{ref}) se diseña un divisor de tensión para variar su salida entre 1.09v a 2.77v como se muestra en la figura 35. La expresión matemática se expresa en la ecuación 11.

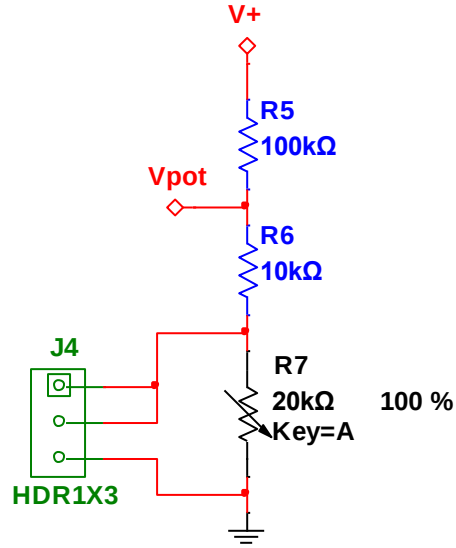


Figura 28 Diagrama esquemático del circuito divisor-compensador para ajuste de offset de 2.5 V

$$V_{pot} = 12v \frac{(R6 + R7)}{R5 + R6 + R7} \quad (11)$$

Se utiliza un amplificador no inversor para convertir 3.16v a 5v el cual también tiene un potenciómetro para ajustar su máximo voltaje, el circuito se muestra en la figura 3.4.x. La expresión matemática se expresa en la ecuación 12.

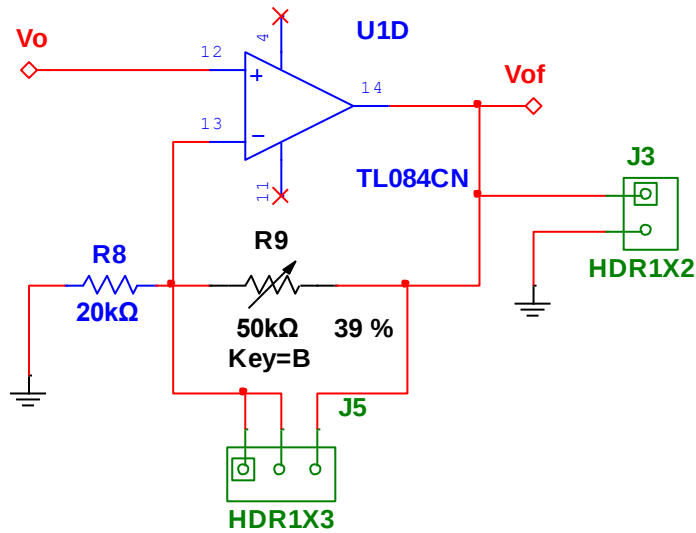


Figura 29 Diagrama esquemático del amplificador no inversor para acondicionamiento de señal del sensor ACS712 a 5v

$$V_{of} = V_o \left(1 + \frac{R_9}{R_8}\right) \quad (12)$$

Se implementa dos seguidores de voltajes para las entradas de voltajes del amplificador restador como se muestra en la figura 37.

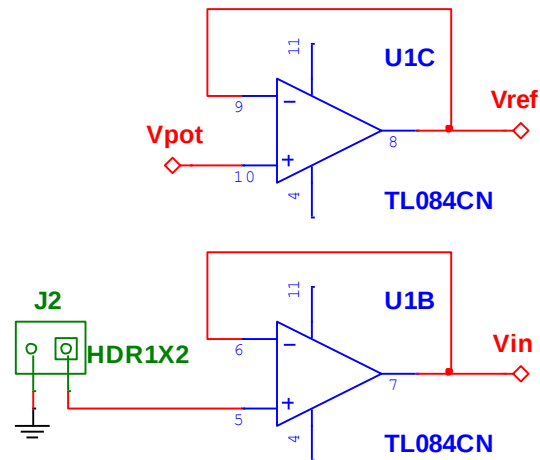


Figura 30 Diagrama esquemático de los circuitos seguidores de voltaje

El diseño del PCB se expone en la figura 31, este tiene una dimensión de 45x40 mm, doble cara, tiene de entrada la alimentación y la conexión de intensidad de corriente, como salida la señal de 0 a 5v.

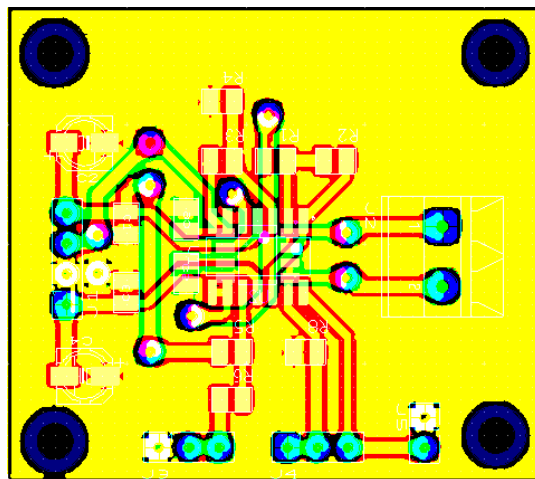


Figura 31 Diseño del PCB para el ajuste de zero y span del sensor ACS712

3.6 DISEÑO DEL CIRCUITO CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO (PID)

Para lograr una regulación precisa de la temperatura, se diseña un sistema de control analógico basado en la arquitectura PID, implementando mediante amplificadores operacionales (OPAMPs).

El sistema utiliza un transductor PT100, cuyo transductor está conectado a un acondicionador de señal para tener un valor de voltaje mínimo y máximo. La señal del transductor PT100 se resta con el setpoint (punto de ajuste) proporcionado del microcontrolador, el circuito se ilustra en la figura 32 el cual es un amplificador operacional configurado como amplificador diferencial, en cada entrada se tiene un seguidor de voltaje.

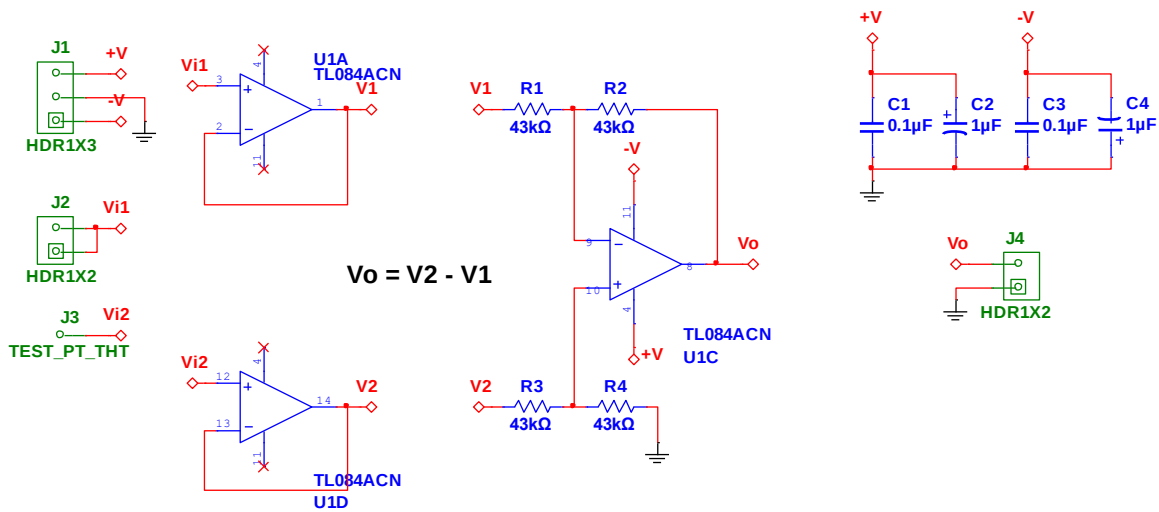


Figura 32 Diseño esquemático del circuito amplificador diferencial para entrada del controlador PID

El diseño y manufacturación del PCB se expone en la figura 33, este tiene unas dimensiones de 30x34 mm, de entrada, tiene su alimentación y las dos señales a restar para obtener el error del controlador.

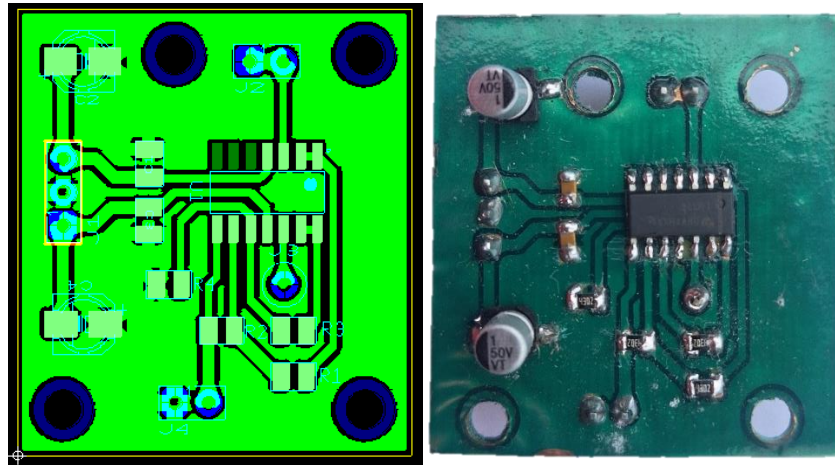


Figura 33 Diseño y manufacturación del PCB del amplificador diferencial

La salida del amplificador diferencial es el error resultante del transductor PT100 y el setpoint, esta salida va a la entrada del controlador PID, el cual está construido con OPAMPs configurados para realizar acciones proporcional, integral y derivativo. La suma de esas salidas proporciona la señal de control, la figura 34 ilustra el diseño del circuito electrónico.

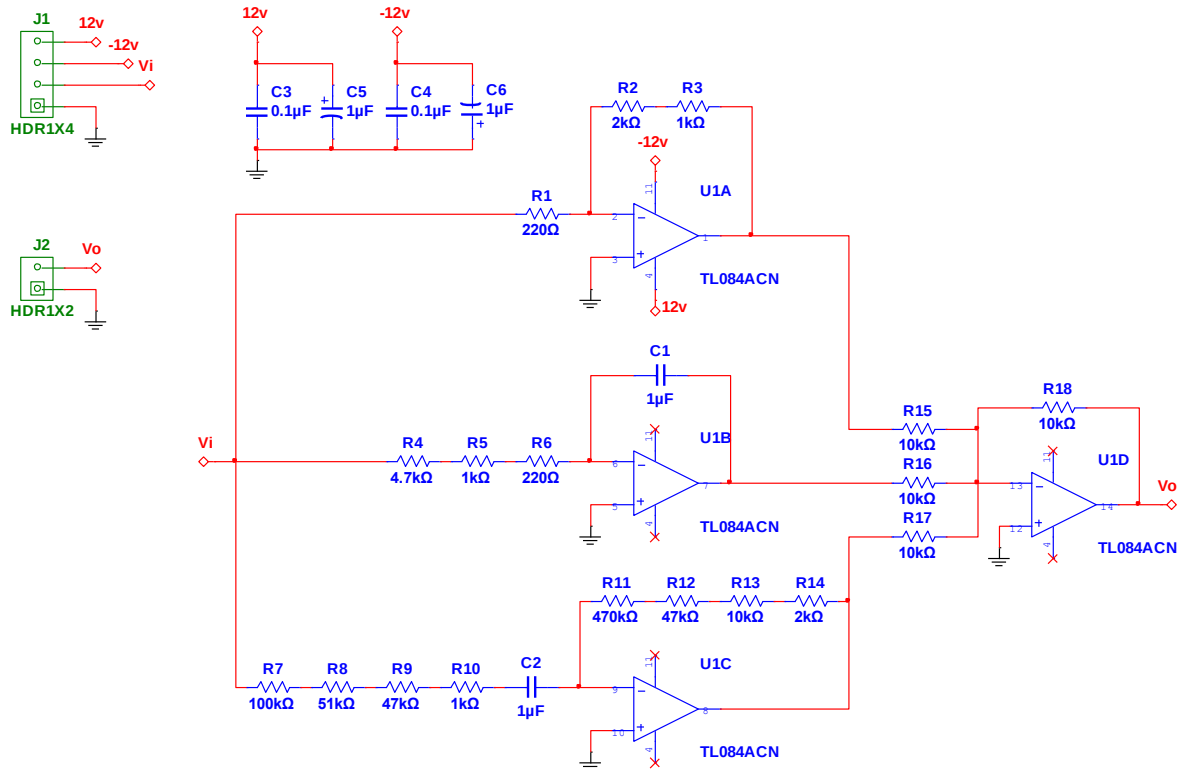


Figura 34 Diagrama esquemático del circuito controlador proporcional-integral-derivativo

El diseño y manufacturación del PCB se muestra en la figura 35, con dimensiones de 38.5x36 mm, de entrada, tiene su alimentación y la señal a controla, por último, la salida del controlador PID.

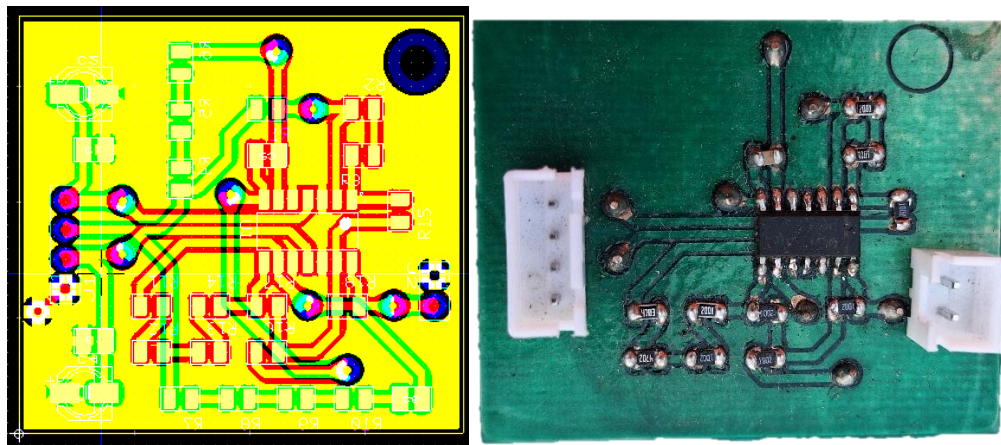


Figura 35 Diseño y manufacturación del PCB para el controlador proporcional-integral-derivativo

3.7 DESARROLLO DE UNA INTERFAZ DE USUARIO

Se desarrolla una interfaz para el usuario con el propósito de mostrar datos de interés e interactuar, estos son: temperatura, tiempo, revoluciones por minuto (RPM) y corriente.

Para esto se utiliza un microcontrolador ATmega328P de la tarjeta de desarrollo Arduino NANO para hacer las lecturas de los sensores y el control de los actuadores e indicadores como es la pantalla de cristal líquido (LCD), específicamente la LCD de 20X4 caracteres.

El control de la interfaz es por medio de un encoder KY-040, la característica que cuenta este dispositivo es que por su configuración mecánica y electrónica se puede detectar cuando se mueve en sentido horario o antihorario sin ninguna limitación mecánica en los grados totales que gira, con esto permite hacer las lecturas y así desplazar la sección del menú que se quiere estar o manipular las unidades de los datos como es el temporizador, corriente o las RPM. Este mismo cuenta con un botón para así seleccionar donde esté señalando en la LCD.

En el desarrollo de la interfaz se tiene la prioridad de ver los datos sin interferir en la ejecución de los actuadores de esa manera se programa con la prioridad de controlar y por último visualizar dichos datos dependiendo del menú correspondiente.

3.7.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PARA AJUSTE Y MONITOREO DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE

De manera general se muestra en la figura 36 el diagrama de flujo del programa, éste cuenta con un inicio, la declaración de las variables, el setup donde se configura los pines a utilizar junto la inicialización del LCD con un mensaje de bienvenida para después iniciar con el loop donde será un ciclo infinito. En el loop se encuentra la lectura de los sensores, el proceso que se realiza ya sea para controlar los actuadores y la vista del menú en la LCD donde comienza con el menú general, en esta muestra las opciones que hay.

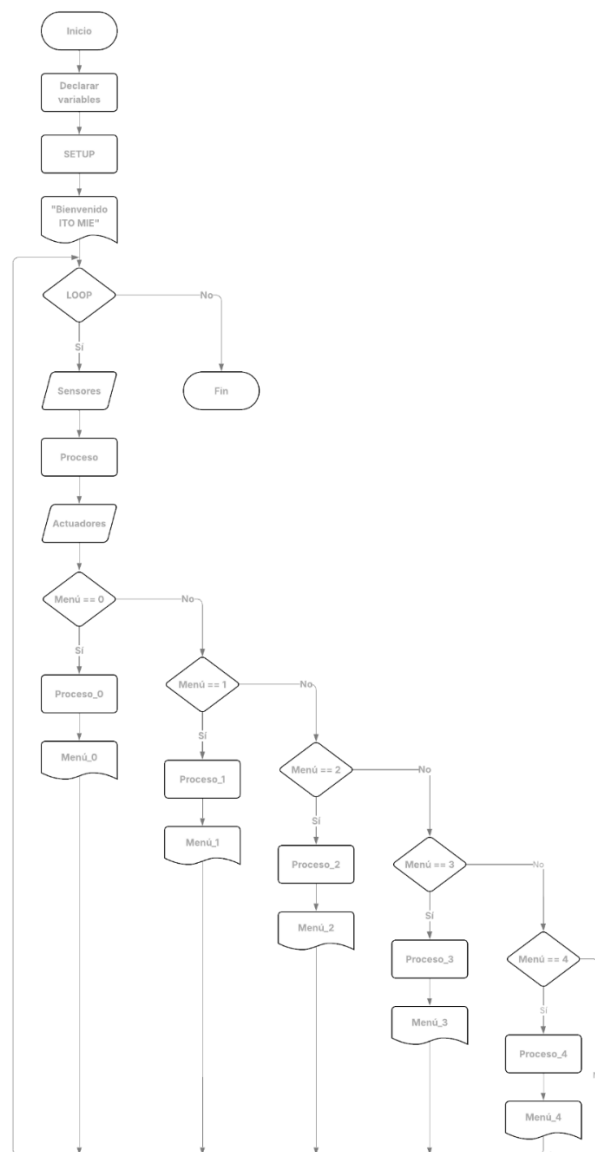


Figura 36 Diagrama de flujo del algoritmo de ajuste y monitoreo del sistema de electrodeposición de cobre

3.7.2 CONFIGURACIÓN DEL CODIFICADOR ROTATIVO (ENCODER)

En la figura 37 se ve cómo interactúa la señal del encoder para reconocer el sentido de giro, la terminal CLK se activa primero que DT e igual se desactiva primero cuando es sentido horario, pero cuando es sentido antihorario como en la figura 38 pasa lo contrario, la terminal DT se activa primero que la CLK e igual se desactiva primera.

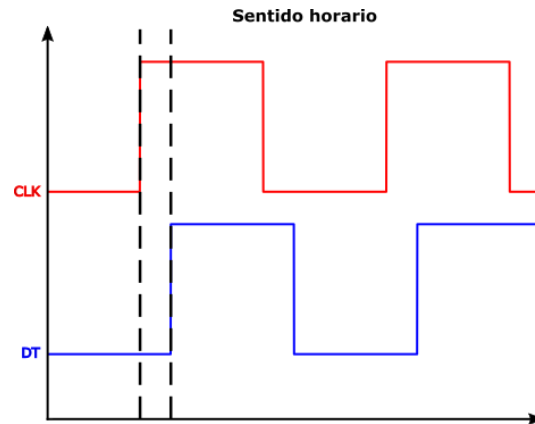


Figura 37 Señales digitales CLK y DT del encoder KY-040 durante el giro en sentido horario

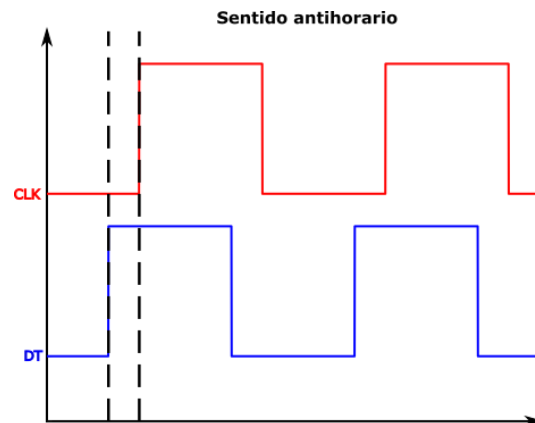


Figura 38 Señales digitales CLK y DT del encoder KY-040 durante el giro en sentido antihorario

Los pines de este dispositivo se observan en la figura 39 los cuales son cinco: GND, alimentación (5 volts), switch, pin CLK y pin DT. El switch está configurado en un pin de interrupción del microcontrolador para darle prioridad a la señal de accionamiento.

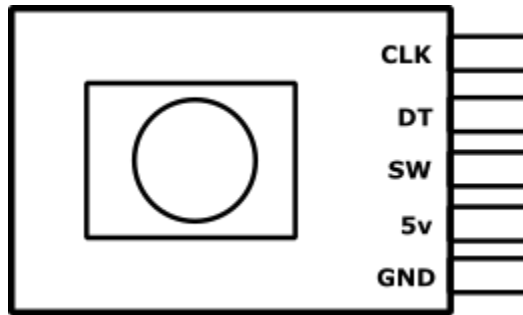


Figura 39 Diagrama ilustrativo del encoder KY-040 con identificación de pines

3.7.3 DISEÑO DE INTERFAZ VISUAL

Se diseñan las interfaces para el usuario las cuales deben mostrar las variables a controlar y visualizar.

Al encender la herramienta le muestra al usuario la figura 40 donde es una bienvenida



Figura 40 Interfaz de inicio del sistema con mensaje de bienvenida en pantalla LCD

La figura 41 se muestra después de la bienvenida, esta expone las diferentes ventanas u opciones que hay para trabajar, se diseña un elemento visual que permita al usuario interactuar con las diferentes opciones, la función principal es la de indicar la posición actual del cursor y facilitar la selección o activación de los elementos en la interfaz, las opciones son las variables a controlar como es el temporizador, temperatura, velocidad y corriente.

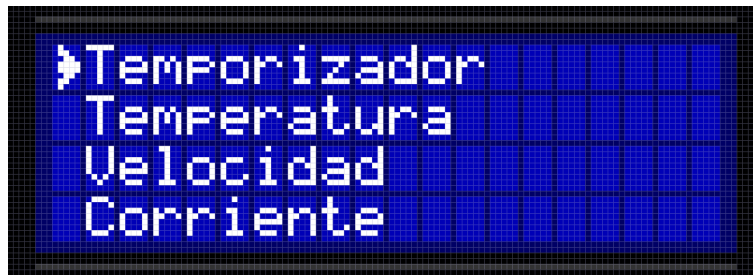


Figura 41 Menú principal del sistema con acceso a las funciones de temporizador, temperatura, velocidad y corriente

Al seleccionar la opción “Temperatura” la interfaz se actualiza como se visualiza en la figura 42, este tiene 3 opciones para interactuar, la primera opción es el tiempo, este tiene un formato de 24 horas

(HH: MM: SS), la segunda opción es “iniciar” que es para ejecutar el temporizador y por último la tercera opción es “atrás” para regresar al menú principal.



Figura 42 Interfaz de configuración y monitoreo del temporizador de deposición

Al seleccionar “00:00:00” el cursor desaparece indicando que está en el modo de configuración de tiempo, el tiempo que se configura es por orden, primero es por horas y este es indicado con el nombre “Horas” en la parte inferior derecha de la interfaz, este se muestra en la figura 43, y tiene un rango de 00 a 23.



Figura 43 Interfaz de configuración de las horas en el temporizador de deposición

Al seleccionar nuevamente el tiempo se cambia la configuración a minutos como se refleja en la figura 44, ahora el indicador en la parte inferior derecha dice “Minutos” reflejando que está en la configuración de minutos, este tiene un rango de 00 a 59.



Figura 44 Interfaz de configuración de los minutos en el temporizador de deposición

La última configuración son los minutos, este aparece cuando se selecciona de nuevo el tiempo, el indicador cambia a “Segundos” como se ilustra en la figura 45, el rango de configuración es de 00 a 59.



Figura 45 Interfaz de configuración de los segundos en el temporizador de deposición

Una vez configurado el tiempo se selecciona el iniciar y empieza la cuenta regresiva con la misma naturaleza de un temporizador, este es el proceso de trabajo de la herramienta.

La siguiente opción del menú principal es “Temperatura”, el diseño de la interfaz se revela en la figura 46, este cuenta con la visualización de la temperatura, configuración de la temperatura (setpoint) y por último la opción de regresar al menú principal. Al seleccionar el ser setpoint desaparece el cursor y se modifica solo la variable de temperatura con un rango de 23 a 100, una vez seleccionado nuevamente el indicador aparece para su desplazo en las opciones.

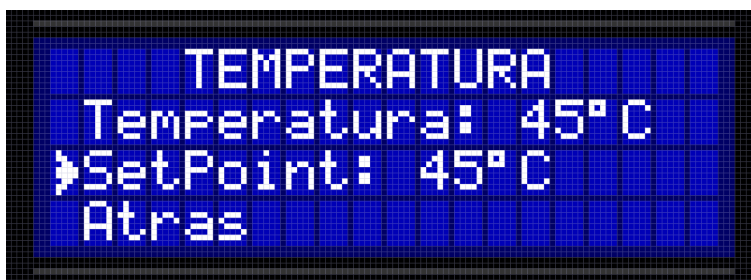


Figura 46 Interfaz de configuración y monitoreo de la temperatura del electrolito

La ventana de “Velocidad” se visualiza en la figura 47, este tiene en total 3 opciones que son para controlar la velocidad de los agitadores con una configuración de 0 a 100%, esto equivale a 0 a 5 volts de salida del microcontrolador. Las otras opciones que tiene son: apagar por completo los motores y regresar al menú principal.



Figura 47 Interfaz de configuración de la velocidad de agitación

La ventana “Corriente” se muestra en la figura 48, este tiene 3 opciones las cuales es controlar el voltaje de 0 a 5 que tiene el microcontrolador de salida, este se muestra en la interfaz con 0 a 100%, apagar por completo la salida de corriente y por último regresar al menú principal.



Figura 48 Interfaz de configuración y monitoreo de la intensidad de corriente

3.9 INTEGRACIÓN DE HARDWARE

La integración de los circuitos en la unidad de ajuste y monitoreo se realizó de manera modular, los módulos cumplen su función específica mientras interactúan con los demás, la figura 49 muestra el diagrama de todos los circuitos integrados.

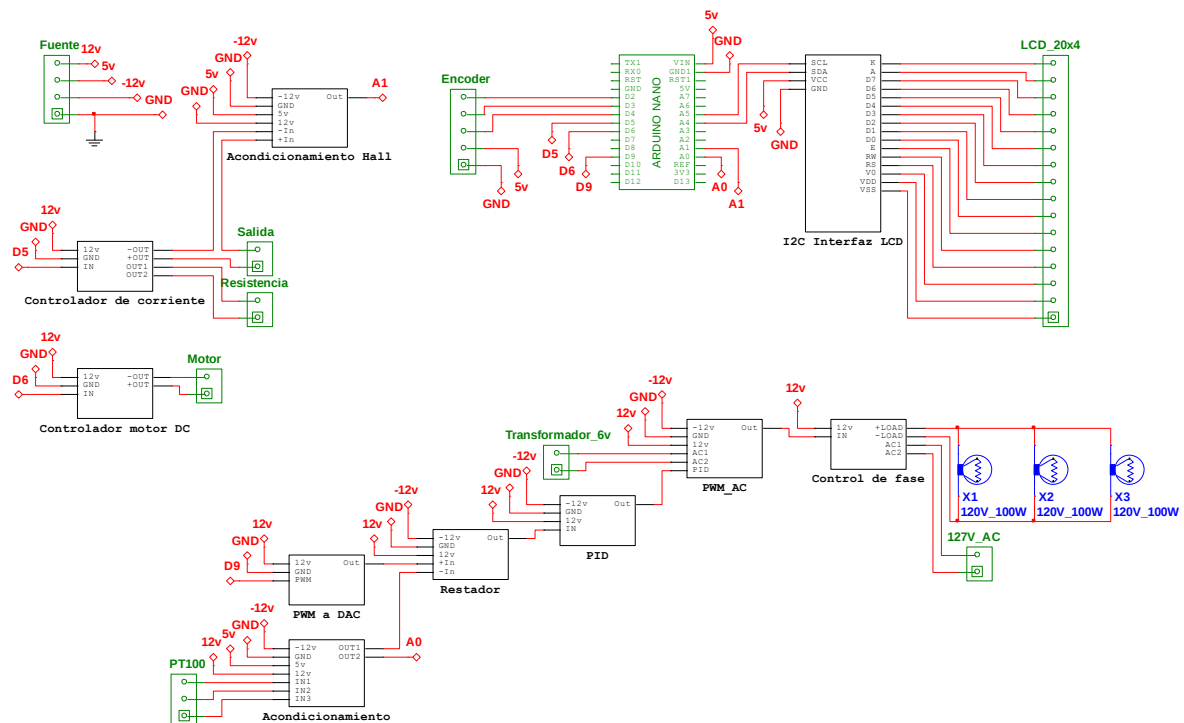


Figura 49 Diagramas esquemáticos integrados de los circuitos electrónicos del sistema conectados al Arduino Nano

3.10 DISEÑO DE GABINETE E INTEGRACIÓN

Éste está constituido por 2 partes, la parte donde se contiene la solución junto el retenedor de los electrodos (celda electroquímica) y las barras agitadoras, y la otra parte es donde contiene todo el sistema electrónico, los planos de la estructura se muestra en la figura 50.

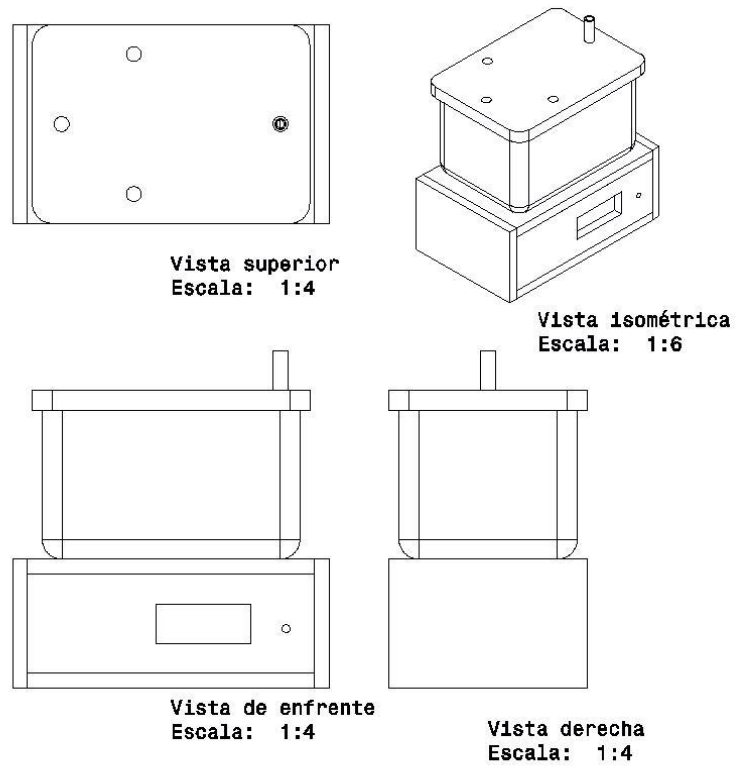


Figura 50 Representación estructural en vista múltiple de la celda electroquímica y la unidad de ajuste y monitoreo para electrodeposición

La figura 51 ilustra la incorporación de los diferentes elementos que trabajan en la unidad de ajuste y monitoreo, estos son sensores y actuadores.

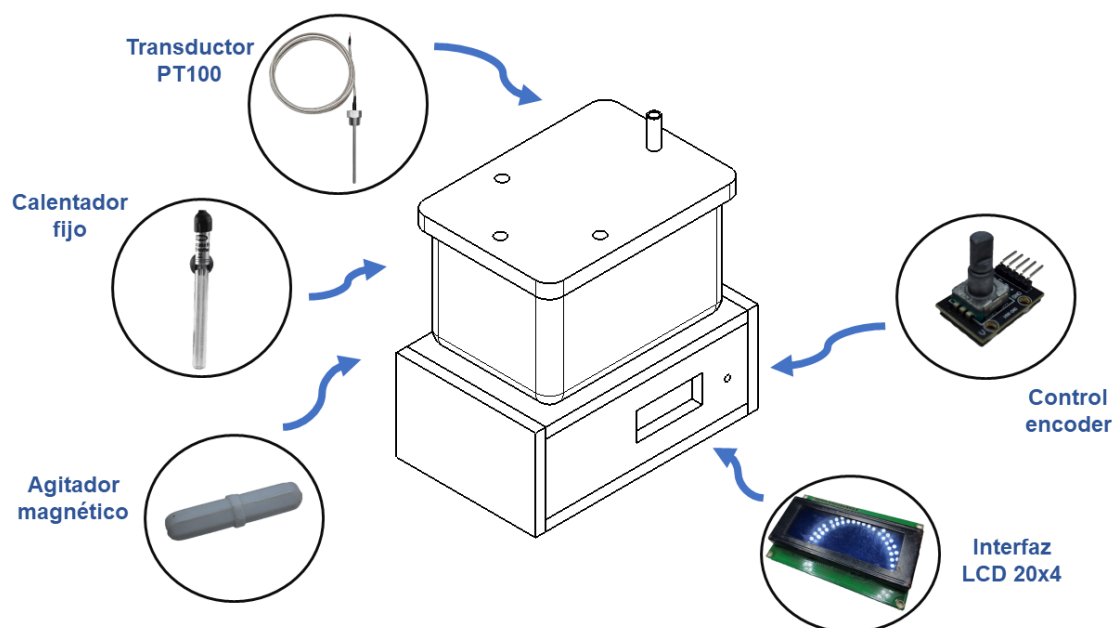


Figura 51 Vista isométrica del sistema de electrodeposición con identificación de los componentes principales

3.8.1 CELDA ELECTROQUÍMICA

Consta de un contenedor principalmente de polietileno tereftalato (PET), seleccionado para resistir las condiciones químicas y térmicas del proceso. En la tapa del contenedor tiene instalado una placa de polietileno de alta densidad para el soporte de los electrodos, dicho soporte está configurado con tres electrodos, diseñado para distribuir mejor la electrodeposición en ambas caras de la placa PCB. Los electrodos están colocados de la siguiente manera:

1. **Cátodo (electrodo central):** Está colocado en el centro del arreglo y actúa como el electrodo de trabajo donde ocurre la deposición del material, este tiene una configuración física para introducir las placas a presión, este es una abrazadera de los fusibles modificado.
2. **Ánodos (electrodos laterales):** Son dos ánodos colocados simétricamente a cada lado del cátodo, aquí es donde ocurre la oxidación del material o desprendimiento. Este también tiene la configuración del cátodo con abrazaderas de fusibles modificados físicamente para introducir a presión las placas.

Los electrodos están conectados a un cable dúplex 14 AWG (American Wire Gauge, en español es calibre de alambre estadounidense), cada polo está diferenciado por su color, rojo y negro, el ánodo color rojo y cátodo color negro. Como terminal cada polo tiene conectado un plug tipo banana con el color de su respectivo polo.

Se incorpora en la tapa del contenedor un tubo de aislamiento de PVC para el sensor PT100, en un extremo de dicho tubo tiene una tapa o tapón con una perforación para la salida de la vaina y haga contacto directo con la solución.

Se realizaron 3 perforaciones en la tapa del contenedor para la instalación de los calentadores fijos, estos se encuentran ubicados en un extremo para el contenedor (el PT100 está en el otro extremo).

3.8.2 UNIDAD DE AJUSTE Y MONITOREO

La unidad de ajuste y monitoreo está diseñada para gestionar, supervisar y ajustar las variables involucradas en el proceso de electrodeposición, al momento de su construcción se agregaron diferentes puertos para su conexión. El diseño del gabinete proporciona los siguientes puertos:

- Conexión para los calentadores fijos
- Conexión para instalación domestica (127 AC)
- Conexión de salida de corriente
- Pantalla para la interfaz
- Dispositivo de control (encoder)

Tras completar el desarrollo experimental del sistema y verificar su funcionamiento en condiciones controladas, se procedió a realizar un conjunto de pruebas orientadas a evaluar el desempeño de la herramienta tecnológica en la deposición de cobre. En el siguiente capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos, considerando el comportamiento de las variables físicas instrumentadas, la estabilidad del control implementado y la eficacia del sistema en la aplicación propuesta.

CAPÍTULO IV. DESARROLLO DE UNA CELDA ELECTROQUÍMICA PARA EL DEPÓSITO DE PELICULAS DE COBRE

En este capítulo se expondrá los resultados obtenidos en el desarrollo del presente proyecto, estos resultados están englobados en 3 secciones: Desarrollo del firmware para la interacción hombre-máquina en el proceso de depósito de cobre, desarrollo de una unidad de ajuste y monitorio para diferentes variables involucradas en dicho proceso y por último la celda electroquímica que está constituido por diferentes elementos como sensores y actuadores.

4.1 UNIDAD DE AJUSTE Y MONITOREO

Se construyó una unidad de ajuste y monitoreo para contener los elementos que instrumentan electrónicamente las diferentes variables involucradas en el proceso de electrodeposición de cobre. Esta unidad mantiene integrado los diferentes circuitos desarrollados en este proyecto, dicha unidad se muestra en la figura 52, en dicha figura se aprecia los siguientes elementos:

- Salida controlada de la intensidad de corriente
- Pantalla LCD para la interfaz visual
- Encoder rotativo para navegación
- Conexión para los calentadores fijos
- Conexión para el transductor PT100
- Sistema mecánico para la agitación
- Tomacorriente

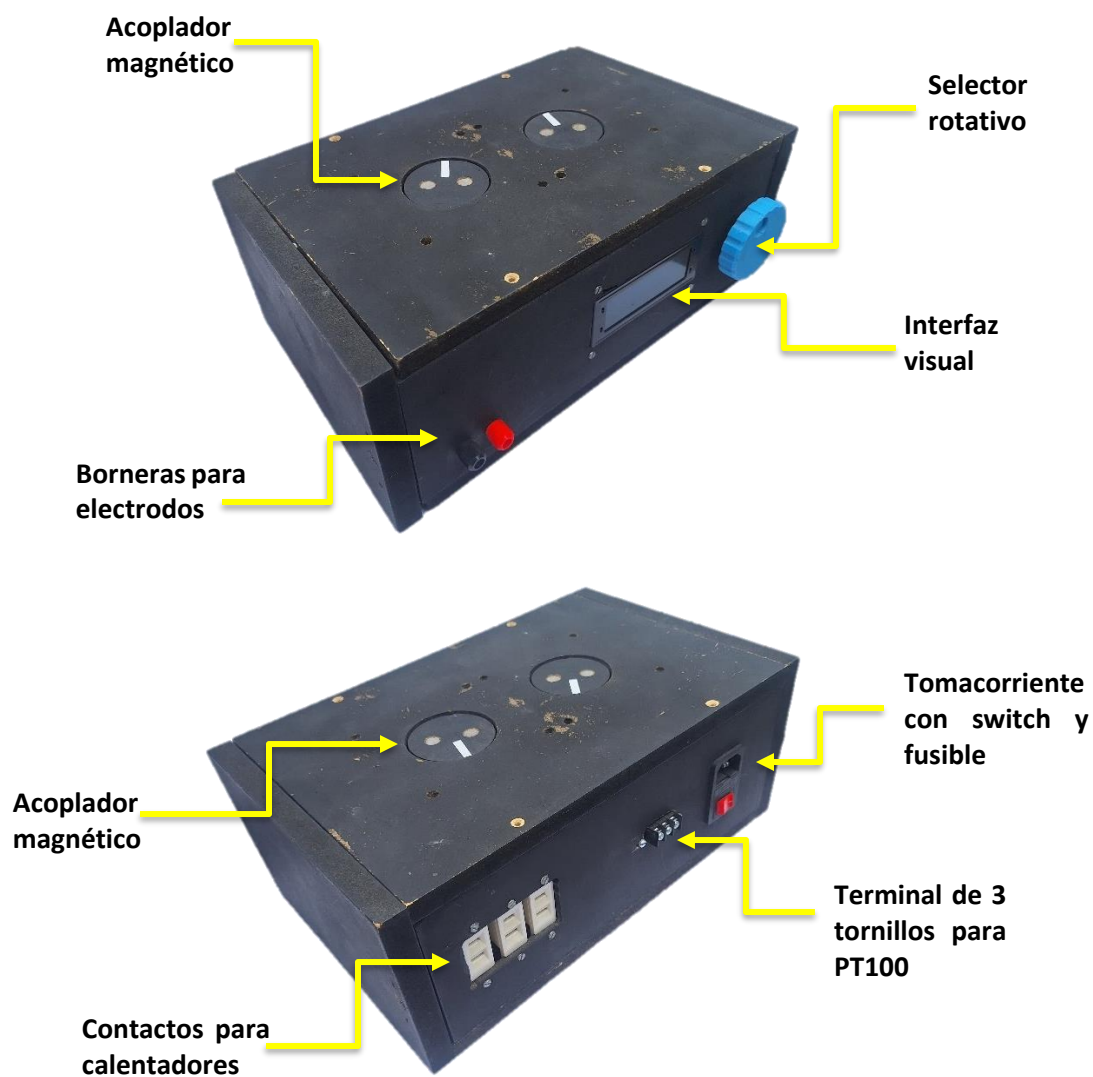


Figura 52 Fotografías de la unidad de ajuste y monitoreo ensamblada, con señalización de los componentes principales

A continuación, se expondrá los resultados de los diferentes circuitos desarrollados para el control y monitoreo de las variables.

4.1.1 SALIDA DE CORRIENTE

Se realizaron mediciones de corriente respecto a la salida del microcontrolador, dado que el microcontrolador opera con una resolución de 8 bits (equivalente un rango de 0 a 255 valores digitales o de 0 a 5 v), se estableció una relación entre el valor digital y un porcentaje mostrado en la interfaz de usuario (un porcentaje de 0 a 100), este se muestra en la figura 53.

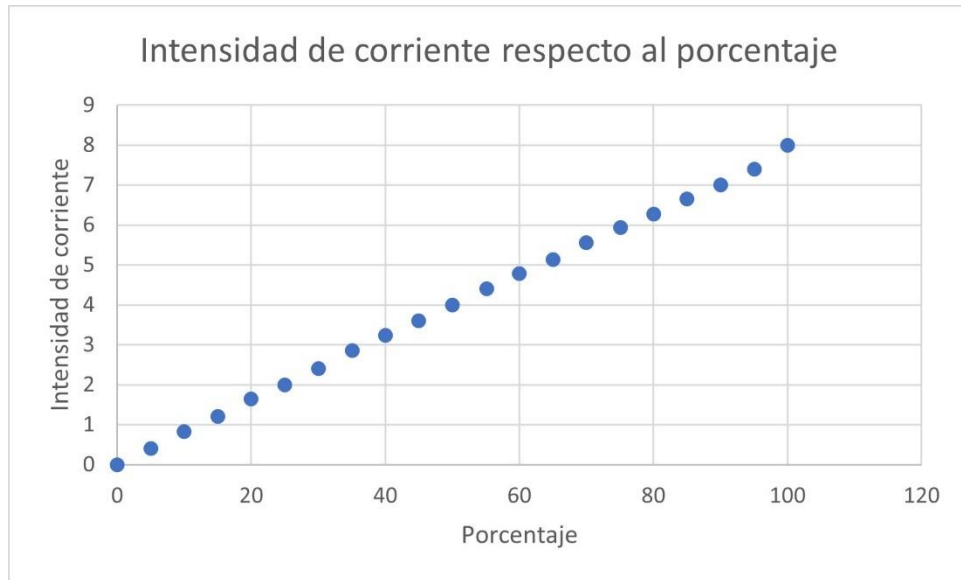


Figura 53 Gráfica de la intensidad de corriente respecto al porcentaje de la interfaz visual

4.1.2 CONTROL DE AGITACIÓN

Se midieron las revoluciones por minuto (RPM) de ambos agitadores, los datos obtenidos se muestran en la figura 54 donde se relacionan con la configuración de la interfaz visual con porcentaje de 0 a 100, la salida del microcontrolador es de 0 a 5v.

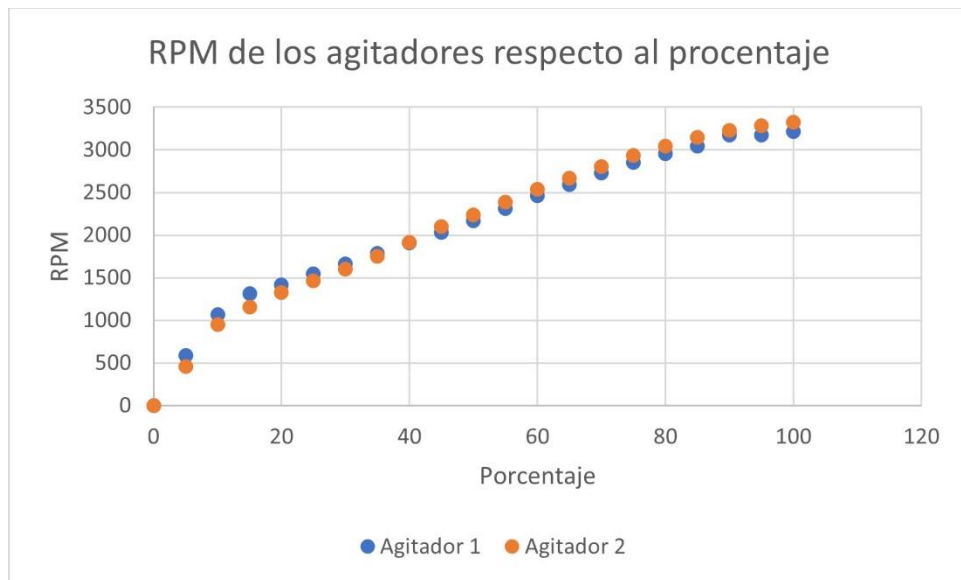


Figura 54 Gráfica de la velocidad de los agitadores respecto al porcentaje de la interfaz visual

4.1.3 LECTURA DE TEMPERATURA

Se registró la temperatura en un rango de 23 a 100 °C en un tiempo de 90 minutos, utilizando un transductor PT100 conectado con el acondicionador de señal. El voltaje de salida del acondicionador se configuró en un rango de 0 a 5v, esto lo hace compatible con la entrada analógica del microcontrolador. Con un intervalo de muestreo de 100ms (milisegundos) entre cada registro se capturaron 54,000 datos, en la figura 55 ilustra 20 muestras respecto al voltaje de 0 a 5.

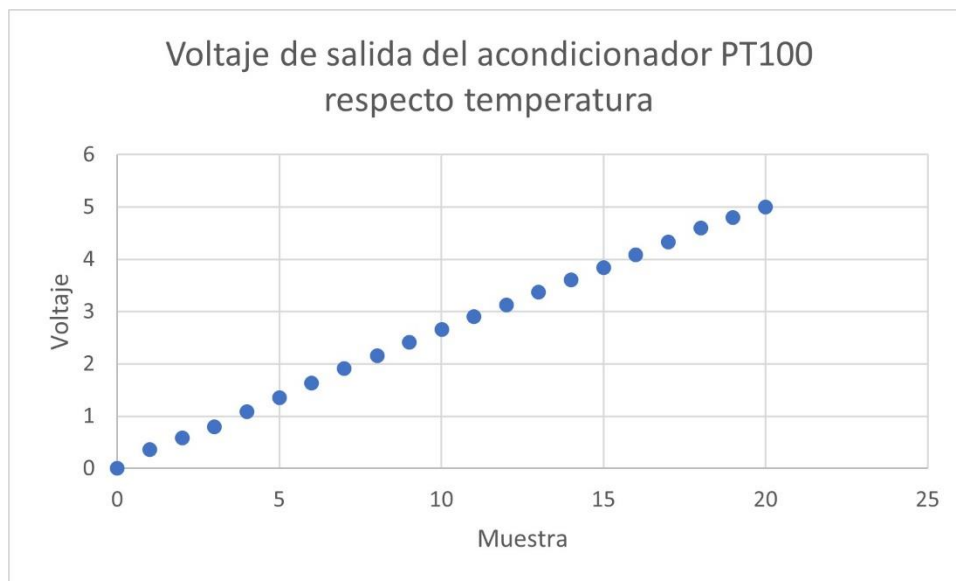


Figura 55 Lectura de voltaje en acondicionador de señal para el transductor PT100, 23°C a 100 °C

4.2 CELDA ELECTROQUÍMICA

Se habilitó un recipiente de polietileno tereftalato (PET) para construir la celda electroquímica, este está constituido principalmente con los porta electrodos, el contenedor para almacenar el electrolito y un transductor PT100 para medir la temperatura. En la figura 56 muestra la tapa que contiene los porta electrodos con una configuración de 2 ánodos y 1 cátodo, este tiene la capacidad de trabajar con una placa de 20x18cm dando un total de 0.036 m².

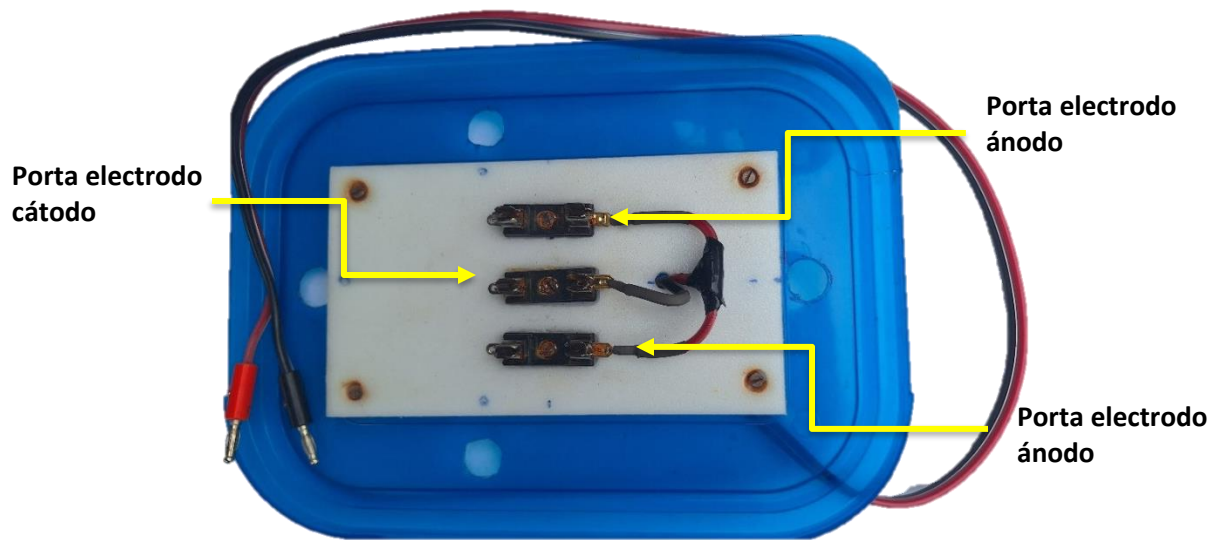


Figura 56 Fotografía de la tapa de la celda electrolítica con disposición de porta electrodos en configuración de dos ánodos y un cátodo central

De esta forma se obtuvo una celda electroquímica como se aprecia en la figura 57, también se observa los elementos involucrados para el ajuste y monitoreo.

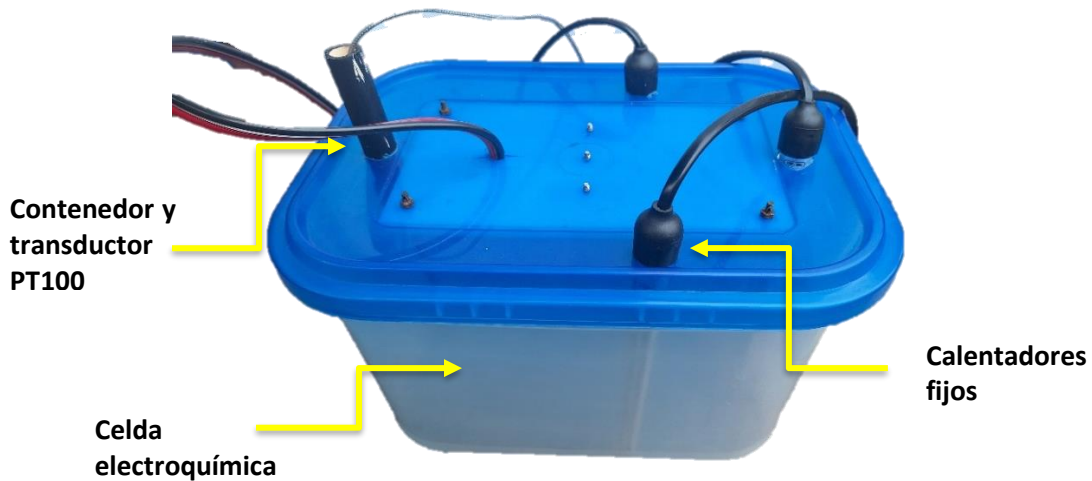


Figura 57 Fotografía de la celda electrolítica con sus componentes funcionales integrados

4.3 FIRMWARE PARA LA INTERACCIÓN HOMBRE-MÁQUINA

Se logró el desarrollo de un firmware para visualizar y controlar las diferentes variables involucradas en el proceso de depósito de cobre con el método de electrodeposición. Visualmente está conformado por 5 menús que permite al usuario comprender en que área está interactuando, el menú principal o general se visualiza en la figura 58, este menú se programó para separar las diferentes magnitudes físicas a visualizar y controlar, las magnitudes son: Tiempo, temperatura, velocidad y la intensidad eléctrica. Se diseñó un puntero que permite visualizar la navegación en el

sistema, esto haciendo referencia a la programación, por medio del encoder o selector rotativo es como el usuario tiene acceso a la navegación ya sea rotando en sentido horario o antihorario, la selección es pulsando.

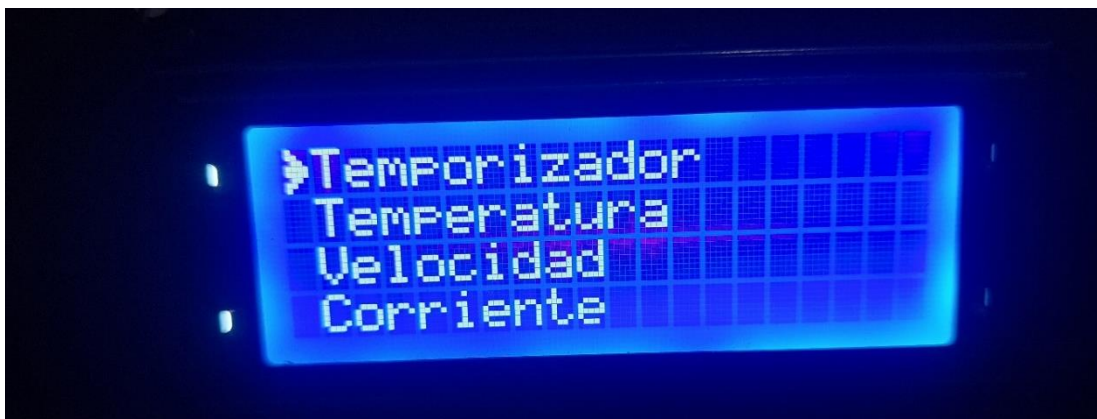


Figura 58 Fotografía de la interfaz principal del sistema con acceso a funciones de temporizador, temperatura, velocidad y corriente

En el menú de “Temporizador” se programó la manipulación del tiempo en que trabaja todo el sistema de depósito de cobre, esto controlando las diferentes unidades de la magnitud de tiempo como son las horas, minutos y segundos. Se configuró un temporizador con el formato de 24 horas (HH: MM: SS), tiene como mínimo 00: 00: 00 y un máximo de 23: 59: 59. Una vez configurado el tiempo se puede iniciar el temporizador y visualmente ver la cuenta regresiva, para regresar al menú principal está la opción de “Atrás”. Lo mencionado anteriormente se visualiza en la figura 59, se observa en esta figura un título que menciona la magnitud que se está operando, el formato de 24 horas del tiempo, la activación del temporizador y por último el regreso al menú principal.



Figura 59 Fotografía de la interfaz de configuración y monitoreo del temporizador de deposición

La figura 60 expone los elementos que se visualizan en el menú “Temperatura”, estos son: Titulo, temperatura, setpoint y atrás. Se programó estos elementos para visualizar la temperatura actual de la celda electroquímica, ajuste de la temperatura y la opción de regresar al menú principal. La unidad en que presenta la magnitud de temperatura es en la escala de Celsius y se configuró un mínimo de 23 °C y un máximo de 100 °C, la visualización es el mismo rango, estos rangos se programaron con una salida y entrada de 0 a 5 volts y la relación de estos es la misma que los cálculos mostrados en la tabla x. El control de la temperatura se programó para cuando empiece el temporizador, la visualización de dicha magnitud se ve todo el tiempo.



Figura 60 Fotografía de la interfaz de configuración y monitoreo de temperatura

En el menú “Velocidad” se programó para visualizar y controlar el porcentaje de voltaje que se entrega en los motores DC, un apagado absoluto de dichos motores y el regreso al menú principal, lo antes mencionado se ve en la figura 61. La salida que tiene el microcontrolador para controlar los motores DC (agitadores) es de 0 a 5 volts y están proporcionalmente relacionados a un porcentaje de 0 a 100, se logró que al momento de configurar el porcentaje poder visualizar físicamente la velocidad de los motores, cuando se deja de configurar se apaga automáticamente, pero al momento de iniciar el temporizador se activan con el porcentaje previamente configurado, por último, la opción de regresar al menú principal.



Figura 61 Fotografía de la interfaz de configuración y monitoreo de velocidad de agitación

La figura 62 presenta el menú de “Corriente”, los elementos que se visualizan son: Titulo, porcentaje, corriente y atrás. Se programó para que al momento de configurar el porcentaje de 0 a 100 tenga una salida proporcional de 0 a 5 volts para el control de la salida de corriente, esto corresponde proporcionalmente de 0 a 8 A y se visualiza en pantalla. Mientras se está configurando el porcentaje de salida, también muestra la intensidad de corriente en la celda electroquímica, pero al dejar de ajustar también deja de proporcionar la intensidad de corriente, se programó para trabajar mientras se ajusta o si el temporizador empieza a operar. Por último, tiene la opción de regresar al menú principal.



Figura 62 Fotografía de la interfaz de configuración y monitoreo de corriente eléctrica

Los resultados obtenidos validan la hipótesis planteada, al demostrar que es factible desarrollar una herramienta tecnológica capaz de controlar y monitorear de manera eficaz las variables clave involucradas en el proceso de electrodeposición de cobre. A través de la instrumentación electrónica de magnitudes físicas como el tiempo de deposición, temperatura, velocidad de agitación e intensidad de corriente, se logró establecer un sistema funcional y confiable. Asimismo,

la programación implementada en el microcontrolador permitió una interacción fluida entre el operador y el sistema, mediante una interfaz visual intuitiva que facilita el control y seguimiento de las condiciones del proceso. La herramienta diseñada mostró compatibilidad con placas de circuito impreso de dimensiones comerciales, cumpliendo con el objetivo general del proyecto y sentando las bases para futuras mejoras en procesos de metalización asistidos por sistemas electrónicos embebidos.

CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo de la herramienta tecnológica orientada al ajuste de variables en el proceso de electrodeposición de películas de cobre, se logró la implementación exitosa de sistemas electrónicos para la instrumentación de parámetros físicos, así como el diseño de una interfaz de usuario que permite su visualización y ajuste. Este desarrollo integró conocimientos en electrónica analógica y digital, y diseño de interfaces hombre-máquina, adquiridos durante el programa de posgrado.

Se concluye que tanto el hardware diseñado como el software de visualización, cumplieron con el objetivo de permitir el ajuste y visualización de las variables: tiempo de depósito, temperatura del electrolito, velocidad de agitación e intensidad de corriente. Esta integración mejoró el ajuste del proceso frente a métodos tradicionales.

Sin embargo, se identificaron oportunidades de mejora en el diseño físico de la celda electroquímica. Dado el volumen de electrolito requerido, se recomienda optimizar las dimensiones del sistema para reducir el consumo de solución en aplicaciones orientadas a placas de circuito impreso de menor tamaño. Alternativamente, se sugiere implementar un mecanismo ajustable en altura para los porta-electrodos, con el fin de adaptar el volumen útil de la celda a diferentes necesidades.

Como línea futura de trabajo, se propone la incorporación de un módulo de comunicación inalámbrica o la sustitución del microcontrolador actual por uno con capacidad de conectividad remota. Esto permitiría la visualización y ajuste de parámetros sin necesidad de presencia física, facilitando así la supervisión del proceso a distancia.

REFERENCIAS

- [1] E. López, A. Rojas, "DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTRODEPOSICIÓN PARA SER USADO EN EL LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES," Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán, México, 2006. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000610392>
- [2] W. M. Mora, "Estudio del proceso de metalizado de agujeros para mejorar la conexión entre las capas de las tarjetas de circuito impreso en la empresa VACIM de la ciudad de Ambato," Ambato, 2013.
- [3] D. U. Nava, "ELECTRODEPOSICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE Ni-P," Querétaro, 2013.
- [4] N. Imaz, "Aplicación de técnicas de electrodeposición mediante pulsos de corriente para la obtención de recubrimientos metálicos," Barcelona, 2013.
- [5] Y. Liu, H. Wu, J. Zhu, Y. Tian, Y. Guo, y J. Gao, "Microvia Filling Mechanism and Optimization by Periodic Pulse Reverse Electroplating," *Coatings*, vol. 12, no. 7, pp. 995, Jul. 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-6412/12/7/995>.
- [6] R. Jayaraman, A. Haran, y B. Popov, "Pulse and pulse reverse plating of copper foils from additive containing acid copper sulfate electrolyte," *Electrochimica Acta*, vol. 111, pp. 391–399, Oct. 2013. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468613013911>.
- [7] T. Hughes, "Analog electronic PID controllers," *Lessons In Industrial Instrumentation*, Control.com. [Online]. Available: <https://control.com/textbook/closed-loop-control/analog-electronic-pid-controllers/>.
- [8] S. J. Thakur, "Design and Implementation of PID Controller using Analog Components," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, vol. 8, no. 1, pp. 20–25, Jan. 2019. [Online]. Available: https://www.ijirset.com/upload/2019/january/5_Design.pdf.

- [9] Arduino, "Nano Hardware Overview," Arduino Documentation, 2024. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/learn/hardware/nano-pcb-guide/>
- [10] M. Shamsuddin, "Effect of Process Parameters on Electrodeposition of Copper Coatings: A Review," *Metals*, vol. 13, no. 4, p. 683, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-4701/13/4/683>
- [11] N. P. Das, V. K. Deshmukh, et al., "Systematic Review on the Effects of Process Parameters on Pulsed Electrodeposition and Surface Structure of Copper Thin Films," in *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering*, CRC Press, 2023. [Online]. Available: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003370628-13>
- [12] M. D. Popescu, et al., "Copper Electrodeposition from Sulfate Baths Containing Gelatin and Thiourea," *Surface and Coatings Technology*, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1452398123028912>
- [13] A. A. Adepoju, "Effect of Current Density on the Electrodeposition of Copper Coating," *IOSR Journal of Engineering*, vol. 3, no. 8, pp. 55–61, 2013. [Online]. Available: [https://iosrjen.org/Papers/vol3_issue8%20\(part-3\)/G03835561.pdf](https://iosrjen.org/Papers/vol3_issue8%20(part-3)/G03835561.pdf)

ANEXOS