



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL**

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema:

**POTENCIOSTATO PARA PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS DEL
BIOMATERIAL A BASE DE QUITINA/GO**

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la
obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

ÁREA: Electrónica

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Tecnología de la información y Sistemas de
control

AUTORES: Jonathan Sebastián Cabrera Lascano
Julio Alexander Pérez Acosta

TUTOR: Ing. Martha Esperanza Sevilla Abarca, PhD

Ambato - Ecuador

febrero - 2024

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: POTENCIOSTATO PARA PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS DEL BIOMATERIAL A BASE DE QUITINA/GO, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por los señores Jonathan Sebastián Cabrera Lascano y Julio Alexander Pérez Acosta, estudiantes de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que los estudiantes han sido tutorados durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.

Ambato, febrero 2024.

Ing. Martha Esperanza Sevilla Abarca, PhD.

TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: POTENCIOSTATO PARA PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS DEL BIOMATERIAL A BASE DE QUITINA/GO es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, febrero 2024.



Jonathan Sebastián Cabrera Lascano

C.C. 0605030956

AUTOR



Julio Alexander Pérez Acosta

C.C. 1804346656

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizamos a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedemos todos nuestros derechos de autor a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizamos su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, febrero 2024.



Jonathan Sebastián Cabrera Lascano

C.C. 0605030956

AUTOR



Julio Alexander Pérez Acosta

C.C. 1804346656

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por los señores Jonathan Sebastián Cabrera Lascano y Julio Alexander Pérez Acosta estudiantes de la Carrera de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado POTENCIOSTATO PARA PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS DEL BIOMATERIAL A BASE DE QUITINA/GO, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con la señora Presidente del Tribunal.

Ambato, febrero 2024.

Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Dr. Freddy Benalcázar Palacios
PROFESOR CALIFICADOR

Ing. Alexandra Lascano Sumbana, Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

Querido Dios, este gran logro que he conseguido te lo dedico a ti, siempre has estado presente guiándome en el camino que debo seguir y he decidido tomar.

Mi querida madre y hermana, pilares fundamentales de toda mi vida, este esfuerzo ha valido la pena en gran parte a que las tengo presentes siempre en mi vida. Querido padre, aunque te encuentras a la distancia, de igual forma has sido importante siempre, para cumplir mis metas, y un apoyo incondicional, les dedico este nuevo logro para mi vida profesional.

Con sincera gratitud,

Jonathan Cabrera

AGRADECIMIENTO

Empiezo agradeciendo a mi compañero Julio por atravesar este arduo camino estudiantil y de investigación, tu conocimiento te llevará lejos.

A nuestra tutora, la Doctora Martha por su amplio conocimiento en química, de verdad tiene aptitud de científica, nunca pare de investigar.

A mis compañeros y futuros colegas, por compartir todas las travesías de la carrera, a veces parecían imposibles, pero al final se lograba presentar esos proyectos con esos informes.

A mi familia, por su amor incondicional y apoyo constante, no me queda más que agradecerles infinitamente.

Agradezco a mi laptop que desde que empecé la carrera me ha acompañado y a mi esfuerzo porque me he dado cuenta de que cuando me dedico, puedo lograr cualquier cosa que me proponga.

Con mucha gratitud,

Jonathan Cabrera.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de investigación a mi familia, que siempre han sido mi ejemplo de lucha a seguir, recordando a su infaltable ayuda, especialmente a mi madre Carmelina Acosta que con su apoyo incondicional se alcanzó mucho más que los objetivos académicos, a mi padre Francisco Pérez su paciencia y ayuda que me permitieron enfocarme en el estudio

A mis amigos que me brindaron su tiempo, además de su ayuda incondicional y por último dedicar este logro a todas las personas que en algún momento me brindaron su apoyo.

Con aprecio,

Julio Pérez.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a nuestra prestigiosa Facultad y a la Universidad Técnica de Ambato por darme las herramientas necesarias para cumplir mis metas académicas.

También extender mis agradecimientos a la Dra. Martha Sánchez, PhD por su apoyo con su vasto conocimiento en los procesos del desarrollo de la investigación y múltiples consejos.

Por último, a mi amigo Jonathan Cabrera que me acompañó en esta investigación aportando todo su conocimiento para cumplir las metas.

Con aprecio,

Julio Pérez

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTO	ix
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS	xx
RESUMEN EJECUTIVO	xxiii
ABSTRACT	xxiv
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Tema de investigación.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Antecedentes investigativos	4
1.3 Fundamentación teórica	9

1.3.1 Electroquímica	9
1.3.2 Análisis electroquímico.....	9
1.3.3 Métodos específicos para el biomaterial a base de quitina/GO	10
1.3.4 Reacciones oxidorreducción	13
1.3.5 Electrólisis.....	14
1.3.6 Potenciostato	14
1.3.7 Rango de corriente eléctrica.....	15
1.3.8 Ciencia de los Materiales	16
1.3.9 Materiales compuestos	17
1.3.10 Materiales y Nanomateriales.....	17
1.3.11 Biomaterial a base de Quitina	18
1.3.12 Compuestos de quitina-grafeno.....	21
1.3.13 Electrodo	22
1.3.14 Pruebas electroquímicas.....	23
1.3.15 Sensorización electroquímica.....	24
1.3.16 Potenciostato LMP91000	25
1.3.17 Interfaz y tecnología de Comunicación.....	26
1.3.18 NFC	27
1.4 Objetivos	28

1.4.1 Objetivo general.....	28
1.4.2 Objetivos específicos	28
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	29
2.1 Materiales.....	29
2.2 Métodos.....	30
2.2.1 Modalidad de la investigación	30
2.2.2 Población y muestra	31
2.2.3 Recolección de información.....	31
2.2.4 Procesamiento y análisis de datos	31
2.2.5 Desarrollo del proyecto	32
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
3.1 Análisis y discusión de los resultados	34
3.2 Desarrollo de la propuesta.....	34

3.2.1 Arquitectura del sistema.....	36
3.2.2 Componentes electrónicos	42
3.2.3 Construcción del dispositivo	50
3.2.4 Electrodo de quitina/GO	60
3.2.5 Interfaz gráfica para el control del Potenciostato.....	63
3.2.6 Métodos de barrido del Potenciostato	66
3.2.7 Resultados de pruebas electroquímicas con electrodo de oro.....	72
3.2.8 Comparación del resultado.....	75
3.2.9 Presupuesto	84
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
4.1 Conclusiones	86
4.2 Recomendaciones.....	87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXOS	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales.....	29
Tabla 2. Comparación de los potencióstatos AFE (Analog Front End).....	44
Tabla 3. Comparación de los microcontroladores.....	46
Tabla 4. Comparación de los Dispositivos NFC.....	47
Tabla 5. Comparación de Características de los ADC.....	47
Tabla 6. Comparación de los DAC	48
Tabla 7. Comparación de tipos de baterías	49
Tabla 8. Parámetros de ajuste para la medición de la Voltamperimetría.....	73
Tabla 9. Parámetros para la medición de la Voltamperimetría normal de pulso	73
Tabla 10. Parámetros para la medición de la Voltametría de onda Cuadrada	74
Tabla 11. Parámetros de ajuste para la medición de la Voltamperimetría.....	74
Tabla 12. Materiales para las pruebas electroquímicas.....	75
Tabla 13. Tabla resumen de Voltametría Cíclica de 100 puntos con respecto a datos de referencia	76
Tabla 14. Parámetros Voltametría.....	77
Tabla 15. Parámetros Voltametría Normal de Pulso.....	78
Tabla 16. Parámetros Voltametría de Onda Cuadrada.....	78
Tabla 17. Parámetros Cronoamperimetría.	79
Tabla 18. Parámetros Voltametría.....	80
Tabla 19. Parámetros Voltametría Normal de Pulso.....	80

Tabla 20. Parámetros Voltametría de Onda Cuadrada.....	81
Tabla 21. Parámetros Cronoamperometría.	81
Tabla 22. Parámetros Voltametría.....	82
Tabla 23. Parámetros Voltametría Normal de Pulso.....	82
Tabla 24. Parámetros Voltametría de Onda Cuadrada.....	83
Tabla 25. Parámetros Cronoamperometría.	83
Tabla 26. Presupuesto del desarrollo del potencióstato	84
Tabla 27. Presupuesto de los electrodos	85
Tabla 28. Tabla completa de prueba de voltamperometría de 100 puntos con respecto a datos de referencia.....	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuota de mercado de potenciostatos (%) por región (2018-2030).....	3
Figura 2. Gráfica de la Voltametría Cíclica	11
Figura 3. Gráfica de Voltametría de Onda Cuadrada.....	12
Figura 4. Gráfica del Diferencial de Pulso.....	13
Figura 5. Corriente que fluye a través del área A cada segundo.....	16
Figura 6. Ingeniería tisular: pilares sobre los que se sustenta	19
Figura 7. Molécula de quitina	21
Figura 8. Diseño interno del LMP91000	26
Figura 9. Arquitectura del sistema	36
Figura 10. Diagrama de flujo de la adquisición de datos.....	38
Figura 11. Diagrama de flujo del procesamiento de datos.....	39
Figura 12. Diagrama de flujo del funcionamiento del NFC.....	40
Figura 13. Diagrama de flujo de la visualización de datos	42
Figura 14. Esquema de la placa para el chip LMP91000.....	50
Figura 15. Diseño en PCB.....	50
Figura 16. Diseño tridimensional.....	51
Figura 17. Esquema del sistema.....	51
Figura 18. Diseño en PCB del sistema.....	52
Figura 19. Diseño en 3D del sistema	52
Figura 20. Parte interna del potenciostato.....	53

Figura 21. Librerías y variables para la función de Voltametría cíclica	54
Figura 22. Señales adquiridas del sistema (Voltametría cíclica)	54
Figura 23. Módulo profesional LMP91000	55
Figura 24. Diagrama de flujo del sistema	56
Figura 25. Potenciostato en funcionamiento	57
Figura 26. Parte de atrás del potenciostato.....	57
Figura 27. Texto inicial del potenciostato.....	58
Figura 28. Segundo texto del potenciostato	58
Figura 29. Parte superior del potenciostato.....	59
Figura 30. Pantalla de potencial del Potenciostato	59
Figura 31. Electrodo de quitina/GO	60
Figura 32. SEM del electrodo de quitina/GO.	62
Figura 33. Sección de Descarga del último análisis en formato .CSV	63
Figura 34. Sección de subida de archivos, (Actualización manual de los archivos de la memoria flash).....	64
Figura 35. Sección del portal Wifi para ingresar credenciales.....	64
Figura 36. Sección para actualizar el Firmware generado desde Platformio.....	65
Figura 37. Sección para reiniciar el dispositivo	65
Figura 38. Sección de Ayuda para la operación del potenciostato	66
Figura 39. Sección acerca de los investigadores	66
Figura 40. Métodos de barrido del potenciostato.....	67

Figura 41. Resultado de la Voltametría Cíclica	67
Figura 42. Resultado de la Voltametría Normal de Pulso.....	68
Figura 43. Resultado de la Voltametría de Onda Cuadrada.....	68
Figura 44. Resultado de la Cronoamperometría	69
Figura 45. Resultado de la prueba de corrección de polarización (BIAS).....	69
Figura 46. Resultado de la Curva de Corriente - Voltaje.....	69
Figura 47. Sección de configuración del potencióstato	71
Figura 48. Sección del panel de control del potencióstato.....	71
Figura 49. Visualización del alcance en base al control de parámetros.....	72
Figura 50. Resultado de la Voltametría Cíclica con electrodo de trabajo de Oro en solución de Ácido ascórbico	73
Figura 51. Resultado de la Voltametría normal de pulso con electrodo de trabajo de Oro en solución de Ácido ascórbico	74
Figura 52. Resultado de la Voltametría de onda Cuadrada con electrodo de trabajo de Oro en solución de Ácido ascórbico	74
Figura 53. Resultado de la Cronoamperometría con electrodo de trabajo de Oro en solución de Ácido ascórbico	75
Figura 54. Comparación de resultados entre el potencióstato desarrollado y el de referencia.....	77
Figura 55. Voltametría cíclica.....	78
Figura 56. Voltametría Normal de Pulso.	78
Figura 57. Voltametría de Onda Cuadrada	79
Figura 58. Cronoamperometría	79

Figura 59. Voltametría cíclica.....	80
Figura 60. Voltametría Normal de Pulso.	80
Figura 61. Voltametría de Onda Cuadrada.	81
Figura 62. Cronoamperometría	81
Figura 63. Voltametría cíclica.....	82
Figura 64. Voltametría Normal de Pulso.	82
Figura 65. Voltametría de Onda Cuadrada.	83
Figura 66. Cronoamperometría.	84

ÍNDICE DE ANEXOS

Figura A1. Hoja de datos del Potenciostato CS150	95
Figura A2 Hoja de datos del LMP91000EVM	96
Figura A3. Normativa FCC parte 15.....	96
Figura A4. Normativa Canadian ICES-003	97
Figura A5. Hoja de datos ESP32.....	97
Figura A6. Funcionalidades módulo PN532.....	98
Figura A7. Diagrama general del ADC y características principales	98
Figura A8. Hoja de datos de la batería LIPO18650	99
Figura A9. Carcasa en software de diseño	99
Figura A10. Corte laser en MDF de 3mm	100
Figura A11. Baquelita del microcontrolador para el potenciostato	100
Figura A12. Microcontrolador ESP32	100
Figura A13. Librerías	101
Figura A14. Variables globales.....	101
Figura A15. Funciones de barrido.....	102
Figura A16. Parámetros de barrido Voltametría Cíclica.....	102
Figura A17. Función para Voltametría Cíclica e impresión de datos	103
Figura A18. Código de parámetros de barrido NPV	103
Figura A19. Código de impresión de Voltaje y Corriente	103
Figura A20. Código de parámetros de barrido SWV	103

Figura A21. Código para imprimir por serial.....	104
Figura A22. Código de parámetros de barrido en CA	104
Figura A23. Código de parámetros de barrido para pruebas de ruido	105
Figura A24. Celda electroquímica para pruebas	105
Figura A25. Peso de Quitina 1,509g	106
Figura A26. Dispositivo de baño ultrasónico.....	106
Figura A27. Agitador Magnético	107
Figura A28. Filtrado de la mezcla.....	107
Figura A29. Resultado del filtrado.....	108
Figura A30. Moldes no adecuados.....	108
Figura A31. Prensa mecánica.....	108
Figura A32. Electrodo de quitina/GO.....	109
Figura A33. Horno industrial	109
Figura A34. Electrodo de quitina y quitina con ácidos	109
Figura A35. Microscopio SEM VEGA3.....	110
Figura A36. Muestra del electrodo de Quitina/GO para ingresar a ser analizada por el SEM.....	110
Figura A37. Termobalanza Sartorius MA160-1US y su datasheets	110
Figura A38. Muestra del electrodo de quitina/GO en termobalanza	111
Figura A39. Muestra de quitina en termobalanza	111
Figura A40. Muestra de grafito-grafeno en termobalanza	111

Figura A41. Pruebas de resistencia y paso de corriente.....	112
Figura A42. Manual de usuario: Configuración inicial, acceso a red “Potenciostato-UTA”	112
Figura A43. Manual de usuario: Configuración inicial, visualización de la puerta de enlace predeterminada.....	113
Figura A44. Manual de usuario: Configuración inicial, escaneo de redes disponibles	114
Figura A45. Manual de usuario: Configuración inicial, acceso a la red y a la interfaz	115
Figura A46. Manual de usuario: Guía del funcionamiento, pantalla inicial y seguridad	116
Figura A47. Manual de usuario: Guía del funcionamiento, acceso a la interfaz del usuario	116
Figura A48. Manual de usuario: Guía del funcionamiento, asegurarse de conexiones antes de ejecutar alguna prueba electroquímica.....	117
Figura A 49. Manual de usuario: Resolución de problemas	117

RESUMEN EJECUTIVO

En esta investigación se desarrolla un sistema de potenciostato diseñado para pruebas electroquímicas en un biomaterial compuesto por Quitina/GO. El potenciostato utiliza un módulo de evaluación LMP91000, un módulo ADS1115 en un ESP32 e incorpora un chip PN532 basado en tecnología NFC para el acceso seguro al dispositivo. El módulo NFC funciona como una llave de seguridad, garantizando el acceso autorizado al potenciostato. La configuración experimental incluye un sistema de tres electrodos; el electrodo de trabajo Quitina/GO desarrollado durante la investigación, un electrodo auxiliar de platino (Pt) y un electrodo de referencia de cloruro de plata (Ag/AgCl). Los datos se transmiten mediante WEBSOCKETS y HTTPREQUEST a una interfaz web accesible después de la autenticación NFC. Este potenciostato permite el monitoreo y análisis en tiempo real de procesos electroquímicos como Voltametría Cíclica, Voltametría Normal de Pulso, Voltametría de Onda Cuadrada y Cronoamperometría, resultando en un dispositivo con eficiencia del 92%, contribuyendo al avance de la investigación en biomateriales.

Palabras clave: Biomaterial, potenciostato, pruebas electroquímicas, quitina, grafeno, websockets, autenticación NFC.

ABSTRACT

In this research, a potentiostat system designed for electrochemical testing on a biomaterial composed of Chitin/GO is developed. The potentiostat uses a LMP91000 evaluation module, a ADS1115 module on an ESP32 and incorporates a PN532 chip based on NFC technology for secure access to the device. The NFC module functions as a security key, ensuring authorized access to the potentiostat. The experimental setup includes a three-electrode system; the Chitin/GO working electrode developed during the research, a platinum (Pt) auxiliary electrode and a silver chloride (Ag/AgCl) reference electrode. The data is transmitted via WEBSOCKETS and HTTPREQUEST to a web interface accessible after NFC authentication. This potentiostat allows real-time monitoring and analysis of electrochemical processes such as Cyclic Voltmetry, Pulse Normal Voltammetry, Square Wave Voltmetry and Chronoamperometry, resulting in a device with 92% efficiency, contributing to the advancement of biomaterials research.

Keywords: Biomaterial, potentiostat, electrochemical testing, chitin, graphene, websockets, NFC authentication.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

POTENCIOSTATO PARA PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS DEL BIOMATERIAL A BASE DE QUITINA/GO

1.1.1 Planteamiento del problema

El uso de potenciostatos es un aspecto de importancia en la electroquímica moderna, ya que permiten medir la corriente y el potencial eléctrico con precisión. Su amplia aplicación abarca la investigación de materiales, la electroquímica analítica y la síntesis de materiales, la corrosión, la energía, la biotecnología (y otros campos). La naturaleza costosa de los potenciostatos, que requieren el uso de componentes electrónicos y sistemas de control altamente especializados y precisos, ha hecho que su proceso de fabricación y ensamblaje sea un desafío [1].

La necesidad de nuevos biomateriales con propiedades médicas y biotecnológicas es cada vez más prominente en el mundo moderno. La ingeniería de tejidos presenta un obstáculo principal que requiere la producción de materiales biocompatibles para la reparación y regeneración de tejidos. Varios países están interesados en desarrollar nuevos biomateriales para fines médicos y dentales. El mercado global de biomateriales alcanzó los \$112,7 billones en 2021, y se espera que alcance los \$349,1 billones en 2030, con una tasa de crecimiento del 13,4% durante el período 2021-2030 [2]. La aplicación de técnicas electroquímicas para la evaluación de biomateriales como la quitina es una línea de investigación prometedora en el campo de la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa. El mercado global de instrumentos electroquímicos se valoró en \$3.139,9 millones de dólares en 2021 durante el período COVID-19 y se espera que alcance los \$4985,2 millones de dólares en 2030, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 5,3% [3]. Y específicamente para potenciostatos, se espera que el mercado de potenciostatos crezca 43,58 millones de dólares durante el período comprendido entre el período de 2023 a 2028, con una tasa compuesta anual del 3,04% durante el período previsto [4].

A nivel global, la demanda de potenciostatos está en constante crecimiento. Los principales proveedores de potenciostatos a nivel mundial incluyen a empresas reconocidas como Pine Research Instrumentation, Gamry Instruments y Princeton Applied Research de Norte América, Corrtest Instruments de China y varias otras a nivel mundial como TEKTRONIX, Metrohm AG, Gamry Instruments, AMETEK, DropSens, PalmSens, Ivium Technologies, ZAHNER-elektrik, Stanford Research Systems, ACM Instruments, Hokuto Denko, Zhejiang Boruide Kongzhi Shebei Group [5]. En el campo de la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa, se están realizando avances significativos a nivel global, con un enfoque particular en el desarrollo de biomateriales innovadores [6] [7]. La quitina, un biopolímero natural, ha surgido como un material prometedor en este campo debido a sus propiedades únicas [8]. Las técnicas electroquímicas se están utilizando cada vez más para la evaluación de estos biomateriales, proporcionando información valiosa sobre sus propiedades y comportamiento [9] [10] [11]. La investigación biomédica está examinando el potencial de los biomateriales basados en quitina mediante técnicas electroquímicas. La síntesis y la practicidad de los biomateriales siguen siendo problemáticas y se requiere más investigación para superar estos obstáculos y explotar todo su potencial [8].

En América del Norte, el mercado de potenciostatos está dominado por actores clave como los que ya han sido mencionados, que juntos representan más del 70% del mercado [5]. Se espera que el mercado global de potenciostatos crezca a una tasa compuesta anual del 2,7% durante el período de pronóstico (2022 - 2027). En el campo de la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa, se están realizando avances significativos en América del Norte [12]. Allí, la investigación en el campo de los biomateriales a base de quitina también está avanzando rápidamente. La quitina, un biopolímero natural, se está utilizando en diversas aplicaciones debido a sus propiedades únicas, como la biocompatibilidad, la biodegradabilidad y la no toxicidad [13] [14]. Las técnicas electroquímicas, en particular, están siendo cada vez más utilizadas para evaluar estos biomateriales, proporcionando información valiosa sobre sus propiedades y comportamiento [13] [14]. Sin embargo, existen desafíos en la síntesis y aplicabilidad de estos biomateriales. Por ejemplo, la extracción y purificación de la quitina puede ser difícil debido a su alta cristalinidad y baja

solubilidad [15]. Además, aunque los materiales a base de quitina y quitosano son biodegradables, sólo realizan una separación de fase del tinte, lo que requiere un tratamiento adicional y cuidadoso [16].

En general, algunas de las aplicaciones clave de los potenciostatos son para monitoreo ambiental, prueba de drogas, pruebas de agua y pruebas de alimentos. El mercado de los potenciostatos en Sudamérica, así como en el resto del mundo, se espera que crezca durante el período de pronóstico 2018-2030 [17], así como se puede observar en la Figura 1. Sin embargo, este informe no ofrece datos específicos sobre el mercado de los potenciostatos en Sudamérica o Ecuador, lo que indica que este campo de investigación de potenciostatos es importante para explorar las oportunidades y desafíos en esta región. Además, se han encontrado tesis de universidades de potenciostatos, lo que demuestra el interés académico y la necesidad de desarrollar instrumentos más accesibles y eficientes para el análisis electroquímico. Por lo tanto, el estudio de los potenciostatos es significativa e importante para el avance de la ciencia y la tecnología.

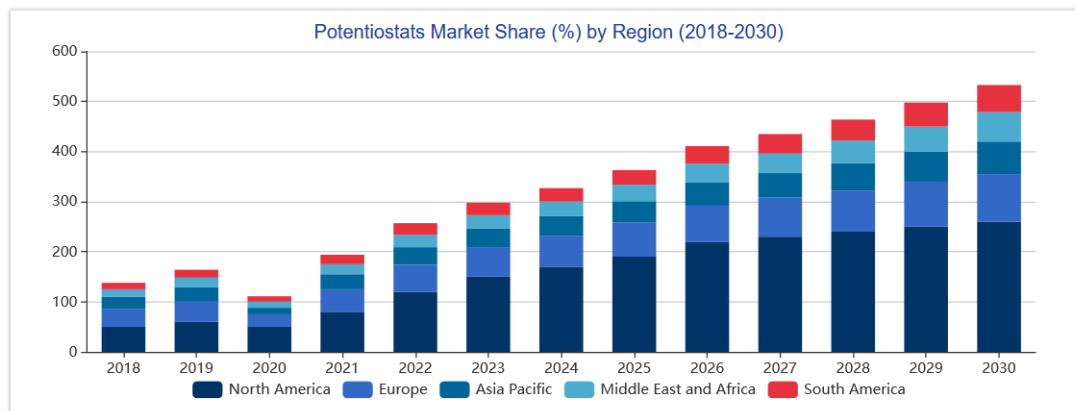


Figura 1. Cuota de mercado de potenciostatos (%) por región (2018-2030) [17]

La quitina es un biopolímero natural con propiedades particulares e intrigantes en el contexto de aplicaciones biomédicas. Sin embargo, su uso aún no está completamente desarrollado debido a la necesidad de describir sus propiedades electroquímicas. La quitina es un material polimérico natural que ha llamado la atención de la industria médica debido a sus propiedades biocompatibles, biodegradables, no tóxicas y sobre todo con varios beneficios para la salud [18]. En la Universidad Técnica de Ambato se

está desarrollando un proyecto innovador aplicado a las ciencias médicas para futuras aplicaciones in vitro.

El costo elevado de los potenciostatos comerciales es una causa común que impide a algunas universidades y laboratorios realizar pruebas electroquímicas. Estos instrumentos tienen precios muy altos, siendo una adquisición exorbitante y difícil de justificar en algunos casos. La incapacidad de realizar las pruebas electroquímicas en el campo de la investigación puede tener un efecto negativo. Además, puede limitar las oportunidades de investigación y colaboración en el campo de la electroquímica y la de biomateriales. En consecuencia, se deben idear métodos alternativos para que estudiantes e investigadores realicen pruebas electroquímicas a un costo accesible. Una forma de hacerlo es explorar opciones más asequibles en el mercado, comprar equipos usados o asociarse con otras organizaciones para distribuir suministros actuales.

La necesidad de medir la respuesta eléctrica con algunos tipos de análisis electroquímicos del biomaterial requiere acceso a un potenciostato en la Universidad Técnica de Ambato. Este instrumento es fundamental para realizar mediciones de corriente eléctrica del electrodo de trabajo de quitina/GO, y obtener información sobre su comportamiento electroquímico. Por esta falta de disponibilidad de un potenciostato en la universidad es un obstáculo para realizar estas mediciones, lo que retrasa la investigación y limita la comprensión del comportamiento del biomaterial.

1.2 Antecedentes investigativos

La electroquímica es un aspecto fundamental en la investigación porque estudia las interacciones de la interfase de un conductor eléctrico y un conductor iónico. Los potenciostatos y las técnicas de medición electroquímica permiten la medición de corriente en varios materiales compuestos como los biomateriales. Para caracterizar y aplicar con precisión el biomaterial a base de quitina/GO en futuras aplicaciones médicas, es necesario comprender sus propiedades electroquímicas. Se diseña y construye un potenciostato para probar este biomaterial mediante pruebas electroquímicas, lo que contribuirá significativamente al progreso de la investigación.

En la publicación de los autores Chica Kevin y Guapi Mora, del año 2022 "Diseño y construcción de un prototipo de potenciostato portátil que permita medir el nivel de oxidación del hierro", mediante el uso de un prototipo que incluía un OPAMP integrado, una celda electroquímica, un amplificador inversor y una tecnología de amplificador no inversor, se midió con gran precisión la corriente eléctrica que fluye durante las reacciones redox. Los hallazgos indicaron que el prototipo de potenciostato portátil podría medir con precisión la oxidación del hierro en diferentes condiciones de temperatura, presión y pH, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde la medición rápida y precisa es crucial. En este estudio se puede determinar un método innovador para evaluar el grado de oxidación del hierro utilizando un prototipo de potenciostato portátil experimental. Para realizar pruebas electroquímicas, el prototipo utiliza una variedad de componentes electrónicos y de software y electrodos comerciales, y cuesta 122 dólares. Los datos de unas 40 pruebas se pueden conservar internamente en el prototipo, evitando cualquier pérdida de información. Además, se creó una aplicación web que permite crear segmentos de datos específicos, visualizar las estadísticas recopiladas y seleccionar la prueba a presentar [19].

En el artículo de los autores Chia-Hung Lee Shawn y Burke Peter publicado el año 2022 "NanoStat: An open source, fully wireless potentiostat", se presenta el desarrollo de un potenciostato de código abierto llamado NanoStat siendo totalmente inalámbrico basado en solo 2 chips de circuito integrado: un microcontrolador digital con WiFi integrado y hardware/software de servidor de archivos/web, y un front-end analógico. Este es capaz de realizar ensayos o pruebas electroquímicas modernas como la voltamperometría cíclica, la voltamperometría de onda cuadrada, la cronoamperometría y la voltamperometría de pulso normal. Consiste en una plataforma versátil con una interfaz de usuario en forma de navegador web conectado a través de http. Aloja todo el código necesario (firmware, HTML5, JavaScript) sin necesidad de software adicional. Su tamaño es reducido con unas medidas de $4 \times 40 \times 20$ mm y con capacidad de 6 horas de funcionamiento con batería. Permite el monitoreo remoto desde cualquier parte del mundo utilizando solo un navegador web por la forma de almacenar el servidor dentro del potenciostato por el microcontrolador con WiFi [20]. La forma de transmisión de los datos en una interfaz de fácil

configuración y visualización de estos para el usuario final que funcione en cualquier navegador disponible hace que esta publicación sea de importancia para el proyecto.

El artículo de los autores Amayreh Mohammad et al, publicado el año 2021 " Voltammetric Determination of Ascorbic Acid in Pharmaceutical Formulations Using Modified Iodine-Coated Platinum Electrode" se centró en la determinación voltamperométrica del ácido ascórbico en formulaciones farmacéuticas utilizando un electrodo de platino recubierto de yodo modificado. Los investigadores se sintieron motivados a idear un procedimiento eficiente y preciso para la determinación de ácido ascórbico en muestras farmacéuticas. Se demostró que los electrodos de platino recubiertos de yodo son inertes tanto a los procesos superficiales como a la adsorción, lo que los hace adecuados para su uso en aplicaciones voltamétricas. Se disolvieron cápsulas o tabletas en polvo y luego se sometieron a dilución en un electrolito de soporte. Luego se realizó el análisis voltamétrico en el electrodo modificado. Según los hallazgos, este método recientemente desarrollado representó con precisión alrededor del 95% del ácido ascórbico presente en las formulaciones farmacéuticas. Los resultados fueron buenos. No hubo diferencias significativas entre las muestras analizadas, lo que llevó a la validación de la precisión del método [21]. Por lo tanto, este artículo es de importancia para desarrollar el proyecto propuesto ya que para la comprobación del correcto funcionamiento del potencióstato se usa la misma solución de ácido ascórbico con un electrodo de platino y se comparan los resultados.

El artículo de revisión de los autores Ikram Rabia et al, publicado el año 2021 "Recent Advances in Chitin and Chitosan/Graphene-Based Bio-Nanocomposites for Energetic Applications" Se centra en los avances recientes en quitina y bionanocompuestos basados en quitosano/grafeno para aplicaciones energéticas. El artículo destaca los beneficios del uso de estos materiales en diversas industrias, incluida la medicina, el almacenamiento de energía y la detección ambiental. Se discuten los métodos de fabricación, los parámetros y las condiciones para crear estos bio-nanocompuestos, así como sus propiedades y aplicaciones. Por ejemplo, se describe un aerogel de quitosano/GO con un valor de densidad de 125 cm²/g y una eficacia de blindaje específica de ~-556 dBcm³/g, que podría ser útil para la absorción por microondas. Además, se discute un quitosano/hidroxietilcelulosa/polianilina cargado con GO dopado por nanopartículas de plata bio-nanocompuesto como hidrogel, que mejoró la

conductividad de CC en aproximadamente 25 veces de $3,37 \times 10^{-3}$ a $8,53 \times 10^{-2}$ S / cm. Los autores también destacan algunas limitaciones y desafíos asociados con estos materiales, como la baja solubilidad y el pH en los campos medicinales [22]. En general, esta revisión proporciona información importante en el desarrollo de bio-nanocompuestos basados en quitina y quitosano/grafeno para aplicaciones energéticas, incluido el uso potencial de estos materiales en pruebas electroquímicas de biomateriales, dando una amplia visión de la posibilidad de la mezcla exitosa y funcionalidad de biomateriales con nanocompuestos.

El artículo de los autores Romero–Serrano Alíed y Pereira Juan publicado el año 2020 "Estado del arte: Quitosano, un biomaterial versátil. Estado del Arte desde su obtención a sus múltiples aplicaciones" se enfoca en el estado del arte de la quitosana, un biomaterial versátil, desde su obtención hasta sus múltiples aplicaciones. La tecnología utilizada en la obtención de la quitosana involucra la reacción de la quitina, que se extrae de los exoesqueletos de crustáceos, con ácido acético. La quitosana obtenida a partir de esta reacción tiene múltiples aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y biomédica. La investigación biomédica ha utilizado el quitosano como matriz para la ingeniería de tejidos, ya que puede mejorar la adhesión celular y promover la regeneración de tejidos. Además, el quitosano se ha utilizado para curar heridas causadas por lesiones en la piel. El artículo señala que el quitosano puede modificarse químicamente para mejorar sus propiedades y usarse para fines específicos, incluida la distribución controlada de medicamentos. El artículo proporciona una descripción general completa del quitosano como "uno de los biomateriales más versátiles para usar en diversas industrias", significando ser de gran utilidad para la investigación y aplicación de la quitina en la biotecnología y un gran justificante para la elaboración del potenciostato [23].

En la publicación de los autores Li Xiaoyun et al, de 2020 "Facile Construction of Chitin/Graphene Nanocomposite Sponges for Efficient Hemostasis", se destaca la fabricación de esponjas nanocompuestas de quitina/grafeno para lograr una hemostasia eficiente. Mediante la incorporación de nanoplacas de grafeno en la quitina a través de un proceso de molienda de bolas, se logró la construcción de estas esponjas nanocompuestas. Los resultados obtenidos revelaron que la adición de grafeno en las esponjas de quitina promovió significativamente el proceso de coagulación sanguínea.

En particular, se observó una reducción del 62% en la pérdida de sangre con un tiempo de hemostasia más corto de 76 segundos en un modelo de lesión hepática en ratas, superando de manera significativa a las esponjas comerciales de polivinilo formal. Además, la implantación subcutánea de las esponjas nanocompuestas demostró una buena biocompatibilidad y biodegradabilidad. Estos hallazgos respaldan la efectividad de las esponjas de quitina/grafeno en la hemostasia, destacando su capacidad para promover la rápida agregación de eritrocitos y su excelente biocompatibilidad [24]. Es importante destacar que se determinan parámetros electroquímicos clave, como la capacitancia, resistencia, y corriente de intercambio, para evaluar la eficiencia y estabilidad del electrodo en aplicaciones biomédicas, por lo que para el proyecto de investigación se deben tomar en cuenta estos parámetros para evaluar al electrodo de quitina/GO.

En la publicación de los autores Luminita Fritea et al, del 2015 “Simultaneous Determination of Ascorbic and Uric Acids in Urine Using an Innovative Electrochemical Sensor Based on β -Cyclodextrin” se desarrolló un sensor electromecánico con la utilización de electrodos modificados con ciclodextrinas para detectar selectivamente el ácido ascórbico y el ácido úrico. Se agregaron ciclodextrinas a electrodos modificados para análisis electroquímicos en Voltametría cíclica, para detectar y medir el ácido ascórbico y el ácido úrico. El material base para la modificación de las ciclodextrinas fueron electrodos de oro. Estos se emplearon como electrodos de trabajo con un electrodo de referencia de (Ag/AgCl) y un contraelectrodo. El estudio encontró que los electrodos tratados con ciclodextrinas eran más selectivos y sensibles al ácido ascórbico y al ácido úrico. Los experimentos electroquímicos requirieron la especificación de parámetros técnicos como velocidades, frecuencias y amplitudes de escaneo. Para estudiar el comportamiento electroquímico del ácido ascórbico y del ácido úrico, se ajustaron las tasas de las exploraciones de voltamperometría cíclica [25]. Este artículo es el más pertinente para la validación de los resultados del potenciostato a desarrollar, ya que estos se los pueden validar con los del artículo a pesar de las diferencias en las dimensiones, composición y trato de los electrodos, obteniendo buenos resultados con un porcentaje de error bajo.

1.3 Fundamentación teórica

La consideración de varios factores importantes, que se van a explicar a continuación, ayudará a comprender el desarrollo y funcionamiento del potencióstato basado en tecnología NFC para análisis electroquímico del biomaterial a base de quitina/GO.

1.3.1 Electroquímica

La electroquímica, es el estudio de las reacciones químicas que involucran intercambios de electrones, con el uso de potencial para generar energía eléctrica o realizar análisis químicos. El concepto general de electroquímica se refiere a la conversión de energía química en energía eléctrica y viceversa [26].

Una celda electroquímica implica la presencia de dos o tres electrodos sumergidos en una solución iónica, donde los electrones se mueven de un electrodo a otro a través de un conductor externo, generando una corriente eléctrica [26].

La electroquímica tiene una importancia significativa en diversos campos, incluida la generación de energía con baterías, pilas de combustible, biomedicina, así como la protección contra la corrosión de metales. Además, se emplea en entornos analíticos como electroforesis-cromatografía capilar y espectroscopía de impedancia electroquímica para determinar la composición y la reactividad química asociada [27].

1.3.2 Análisis electroquímico

Para comprender las características electroquímicas de sistemas y materiales, se debe considerar el análisis electroquímico. El objetivo principal de este es medir las corrientes eléctricas generadas por reacciones redox en una celda electroquímica [26].

En el estudio del biomaterial basado en quitina/GO con el análisis electroquímico es muy importante para medir la resistencia y la capacitancia del biomaterial como respuesta a pequeñas señales de frecuencia. Esto proporciona información detallada sobre las reacciones electroquímicas que ocurren en su superficie, lo que podría indicar modificaciones en su estructura y electroquímica [27].

El potenciostato es un instrumento vital para monitorear y cuantificar variables electroquímicas durante el análisis. Esto permite la utilización de un potencial controlado y la adquisición de corrientes en relación con el tiempo. En aplicaciones como sensores, biosensores y sistemas de administración de fármacos, el potenciostato se utiliza para evaluar si el biomaterial puede funcionar como electrodo. [27].

1.3.3 Métodos específicos para el biomaterial a base de quitina/GO

a. Voltametría Cíclica

La Voltametría cíclica es una técnica electroquímica que aplica un diferencial de potencial variable a un electrodo obteniendo como resultado la medición de la corriente eléctrica que se produce mediante una reacción redox en la celda electroquímica. Esta técnica funciona utilizando un ciclo repetitivo que ajusta el potencial eléctrico con el tiempo. El potencial se varía continuamente en cada ciclo, ya sea de forma controlada o a modo de ejemplo, hasta alcanzar su valor final antes de revertirse. Este proceso se repite. La medición constante de la corriente generada es el resultado de este proceso [28].

Esta es útil en el estudio de reacciones reversibles o semiredox, donde se genera oxidación y reducción en el electrodo. Esto proporciona información valiosa sobre la cinética de estas reacciones, así como sobre las propiedades de los electrodos. Es posible determinar la concentración de sustancias electroactivas o sustancias con características de oxidación y reducción, la constante de velocidad de las reacciones redox y otros parámetros electroquímicos mediante el estudio de los picos y potenciales de corriente [28].

La investigación sobre materiales y sistemas electroquímicos utiliza ampliamente esta técnica, que es crucial en campos como la electroquímica, la química analítica (por ejemplo, biosensores) y la caracterización de electrodos en múltiples aplicaciones. La voltamperometría cíclica desempeña un papel crucial en la comprensión y optimización de los procesos redox y las reacciones electroquímicas en diversos campos científicos y tecnológicos [29]. La forma de la gráfica de esta técnica electroquímica se puede observar en la Figura 2 donde la forma de la onda es el

resultado de un proceso oxidación (a) que depende de corriente catódica, donde la onda depende del aumento del potencial y de un proceso de reducción (b) que depende de corriente anódica, donde la onda depende del decremento del potencial.

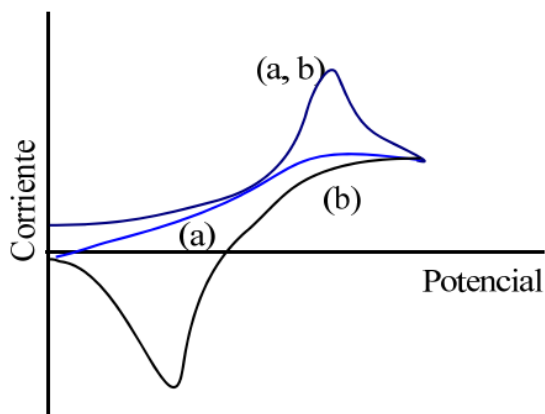


Figura 2. Gráfica de la Voltametría Cíclica [29]

b. Voltametría de Onda Cuadrada

Este tipo de Voltametría mide la microcorriente que pasa a través de un electrodo de trabajo mientras su potencial y el electrodo de referencia correspondiente reciben pulsos alternos a diferentes frecuencias de adelante hacia atrás. Al observar la superposición de ondas cuadradas en una forma de escalera existente, se puede determinar la forma de onda potencial como una modificación de la Voltametría de escalera [30].

En este método, las formas de corriente directa e inversa son valores de diagnóstico, pero generalmente se genera una señal de corriente diferencial restando su inversa de la corriente real usando el software del potenciostato. Claramente, el potencial aplicado debe indicarse con respecto a esta curva diferencial. La gráfica de corriente diferencial que mide los picos de potencial aplicado es indicativa de procesos redox e indica las magnitudes de estas ocurrencias en relación con las concentraciones, con respecto a cada especie activa y reactiva [31].

La forma de la gráfica de esta técnica electroquímica se puede observar en la Figura 3 como marca un adelanto (directa) y un retroceso.

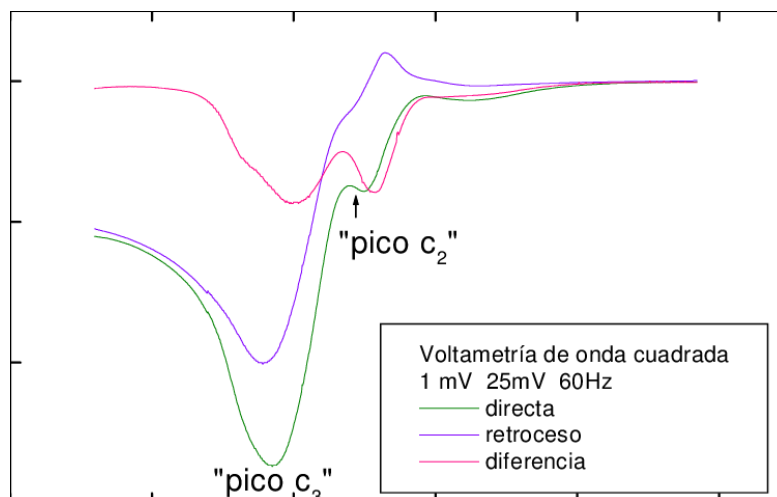


Figura 3. Gráfica de Voltametría de Onda Cuadrada [31]

c. Voltametría Diferencial de pulso

El diferencial de pulso es una técnica electroquímica avanzada que se utiliza para medir la concentración de sustancias químicas en una solución. Se aplica un potencial eléctrico al electrodo en solución y se utiliza un período de tiempo determinado para medir la corriente producida. A diferencia de la Voltametría cíclica, que varía continuamente el potencial eléctrico, esta utiliza un pulso de potencial breve y bien definido antes de medir la corriente [32].

Este análisis reduce el impacto de los efectos de fondo al tener en cuenta la diferencia entre la corriente inicial y final en respuesta al pulso potencial, lo que aumenta la precisión de la medición. La técnica es especialmente adecuada para analizar sistemas redox reversibles o semi-reversibles y para descubrir analitos en concentraciones bajas. Además, puede determinar la concentración de analitos, es decir un material que puede ser cualquier compuesto químico como un ion o elemento, incluso en presencia de interferencias [32].

En la Figura 4 se representa un pico característico de la corriente en relación con el potencial aplicado. La altura y posición del pico se utilizan para medir la concentración de este analito. La exactitud y precisión de este método electroquímico al medir compuestos en soluciones altamente complejas lo convierten en una opción popular para química analítica, investigación farmacéutica o monitoreo ambiental [32].

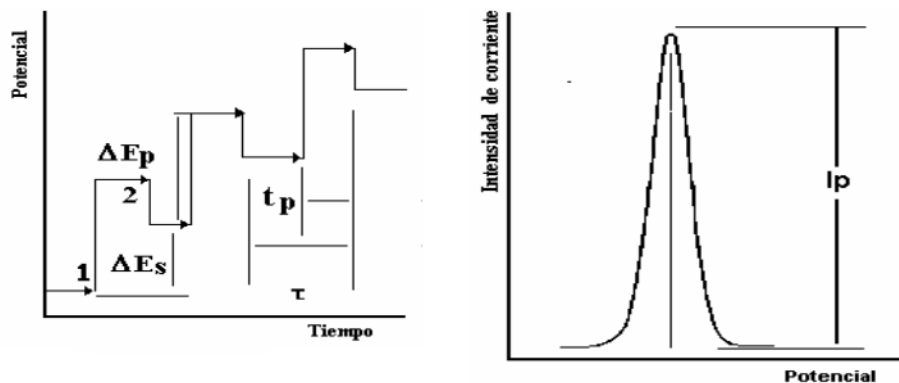


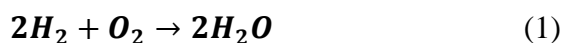
Figura 4. Gráfica del Diferencial de Pulso [32]

1.3.4 Reacciones oxidorreducción

También conocidas como reacciones redox, el modo principal de reacción es el intercambio de electrones entre especies químicas. Los procesos químicos dependen en gran medida de estas reacciones, que pueden aplicarse en diversos campos, como la producción de energía y la química ambiental [33].

En la reacción redox, un agente reductor (generalmente denominado "oxidado") pierde algunos de sus electrones en química y, por lo tanto, se dice que aumenta en términos de estado de oxidación. Al mismo tiempo, un agente oxidante, que adquiere electrones y se reduce, baja su correspondiente estado de oxidación. La ecuación química de los estados de oxidación de cada elemento en una reacción redox indica claramente estos cambios [33].

Por ejemplo, en la reacción de oxidación del hidrógeno (H_2) en presencia de oxígeno (O_2) para formar agua (H_2O), el hidrógeno se oxida al perder electrones, mientras que el oxígeno se reduce al ganarlos como se puede observar en la Ecuación (1):



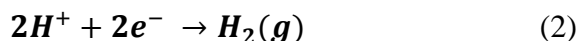
Las reacciones redox son fundamentales para la generación de energía en baterías, pilas de combustible y procesos de combustión. En química analítica, desempeñan un papel crucial en la corrosión de metales además se utilizan para determinar la concentración de sustancias en solución mediante valoración redox [33].

1.3.5 Electrólisis

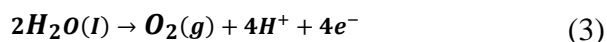
La electrólisis es un proceso donde se utiliza una reacción eléctrica para descomponer sustancias en sus componentes básicos o iones. Se utiliza una solución conductora o electrolito para realizar el proceso en una celda electrolítica, donde se sumergen dos electrodos [34].

En el cátodo, el electrodo negativo, los iones presentes en la solución ganan electrones y se reducen. Por otro lado, en el ánodo, el electrodo positivo, los iones ceden electrones y se oxidan; en ambos casos resulta en la formación de sustancias químicas [34].

Las reacciones generales de reducción y oxidación pueden ser descritas mediante ecuaciones químicas, como la reducción de iones de hidrógeno en el cátodo, como se puede observar en la ecuación (2):



Mientras que, en el ánodo, se produce la oxidación del agua, como se puede observar en la ecuación (3):



La electrólisis tiene muchas aplicaciones, que van desde la generación de hidrógeno y oxígeno a partir del agua hasta la extracción de metales de sus minerales, la purificación de productos químicos y la producción de gases industriales. Se utiliza una corriente eléctrica controlada para descomponer compuestos y obtener sustancias químicas y elementos específicos, lo que la convierte en una técnica fundamental en la química y la industria [34].

1.3.6 Potenciostato

El potenciostato es un dispositivo esencial en el campo de la electroquímica, este es utilizado para controlar y medir con precisión las corrientes y los potenciales en sistemas o celdas electroquímicas [35].

Mantiene un potencial constante entre un electrodo de trabajo y un electrodo de referencia, lo que permite controlar la reacción electroquímica en el electrodo de trabajo; o si es un potenciostato de tres electrodos se añade un contraelectrodo o auxiliar y la corriente en este electrodo es ajustada por el sistema para mantener un potencial constante del electrodo de trabajo con respecto al electrodo de referencia. El uso de este control es esencial para investigar la cinética, la efectividad del catalizador y la respuesta de los electrodos en diferentes entornos [35].

Los potenciostatos se utilizan para diversos fines, incluida la investigación electroquímica básica y la creación de dispositivos electroquímicos como baterías o sensores. Además, su regulación precisa de potenciales y corrientes, junto con la capacidad de registrar información detallada, lo convierte en una herramienta valiosa para comprender reacciones electroquímicas y optimizar sistemas que dependen de ellas [35].

1.3.7 Rango de corriente eléctrica

El rango de corriente eléctrica de un sistema eléctrico o electrónico son valores que se da al sistema para gestionar corrientes de diferentes tamaños; juega un papel crucial tanto en el diseño como en la especificación de dispositivos y circuitos eléctricos [36].

La carga eléctrica que pasa a través de un conductor es lo que define la corriente eléctrica en términos más amplios y puede expresarse en amperios (A). Los voltajes de funcionamiento de los dispositivos y circuitos eléctricos están diseñados para funcionar dentro de un rango definido, con aplicaciones de baja potencia que utilizan microamperios (mA) y usos de alta potencia que utilizan miles de amperios [36]. Se puede visualizar mejor el flujo en un área en la Figura 5.

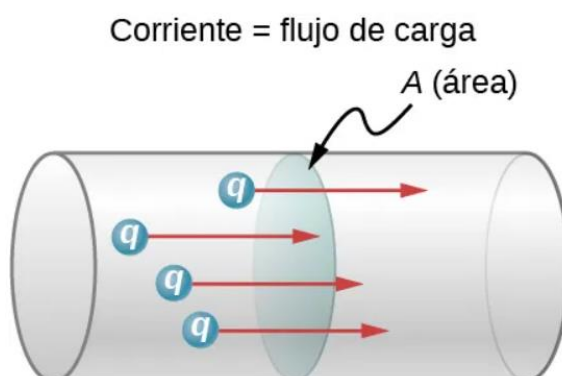


Figura 5. Corriente que fluye a través del área A cada segundo

Dependiendo del diseño del componente, cualquier dispositivo puede diseñarse para manejar una variedad de corrientes. Las corrientes están limitadas en los dispositivos electrónicos, como resistencias y transistores. Por ejemplo, si bien un transistor puede funcionar en su rango de corriente óptimo y permanecer operativo en un rango más amplio, es posible que no funcione con tanta eficiencia [36].

El rango de corriente eléctrica es importante porque determina la cantidad de corriente que puede pasar a través del sistema. Los rangos de corriente van desde pico amperios (pA) hasta miliamperios (mA) o incluso más. Este rango permite adaptar el potenciómetro para otros fines y pruebas. El rango actual puede ser mayor para las pruebas que implican reacciones redox rápidas y menor para aquellas que contienen reacciones más lentas o delicadas [37].

1.3.8 Ciencia de los Materiales

La ciencia de los materiales es un campo interdisciplinario que se concentra en el estudio de la estructura, propiedades y aplicaciones de los materiales. El desarrollo de tecnologías avanzadas se ha visto facilitado por este campo científico fundamental, que ha realizado importantes contribuciones a campos como la electrónica, la energía, la ingeniería, la medicina, y nanotecnología. Además, ha jugado un papel importante en el avance de la tecnología moderna [38].

Hay muchas aplicaciones de la ciencia de los materiales, desde la creación de nuevos materiales con propiedades excepcionales hasta la optimización de sistemas electroquímicos para aplicaciones energéticas y ambientales. Se utilizan

potenciostatos, ya sea con sistemas de dos o tres electrodos, para permitir investigaciones detalladas de las respuestas electroquímicas de materiales y sistemas, lo que resultó en un progreso significativo hacia el desarrollo de nuevos materiales y avances tecnológicos [39].

1.3.9 Materiales compuestos

Las aplicaciones industriales y científicas utilizan con frecuencia materiales compuestos, que son un tipo de materiales. Se distinguen por estar formados por dos o más componentes con propiedades distintas y, cuando se combinan, exhiben características que exceden las de los componentes individuales. La ciencia de los materiales ha sido fundamental en el desarrollo y optimización de estos compuestos, lo que ha dado como resultados materiales altamente eficientes que pueden adaptarse a necesidades específicas [40].

Tanto la fase matriz como la fase de refuerzo están presentes en los materiales compuestos. Se pueden usar fibras, partículas u láminas para crear la fase de refuerzo, que se agrega a la matriz y mejora las propiedades del material compuesto, como resistencia, rigidez, conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión y más. Para lograr las propiedades deseadas en un material compuesto, es importante elegir cuidadosamente entre materiales de matriz y de refuerzo [40].

1.3.10 Materiales y Nanomateriales

Un amplio espectro de aplicaciones tecnológicas, que van desde dispositivos electrónicos avanzados hasta sistemas de almacenamiento de energía y tecnologías sanitarias, dependen de materiales y nanomateriales. El uso de estos materiales hace posible tecnologías innovadoras y soluciones a los problemas actuales [41].

En el ámbito de la electrónica, los nanomateriales han revolucionado el proceso de fabricación de dispositivos pequeños y eficientes. Los transistores y los dispositivos semiconductores ultrarrápidos están fabricados a partir de materiales como nanotubos de carbono, láminas de grafeno y nanopartículas metálicas. Los nanomateriales se

pueden utilizar para reducir el tamaño de los componentes electrónicos, lo que dará como resultado tecnologías más eficientes y potentes [42].

La medicina utiliza nanomateriales para la administración precisa de medicamentos e imágenes médicas de alta resolución. Al permitir que los medicamentos se difundan en áreas específicas del cuerpo a través de nanomateriales, los efectos secundarios se minimizan y los tratamientos se vuelven más efectivos [42].

d. Polímeros

Muchas aplicaciones en la vida cotidiana y diversas industrias hacen de los polímeros una clase importante de materiales. Los monómeros, que son unidades repetidas, constituyen la estructura molecular de estos materiales. Los polímeros tienen una variedad de tamaños, desde moléculas pequeñas hasta largas cadenas de macromoléculas [43].

Entre los polímeros, su adaptabilidad es una de sus características clave. Sintetizarlos en una amplia gama de propiedades físicas y químicas los hace increíblemente populares para la producción de diversos materiales, incluidos plástico/rubí o fibra, así como compuestos. Los polímeros desempeñan un papel crucial en la producción de envases, textiles, dispositivos médicos y diversas aplicaciones industriales [43].

1.3.11 Biomaterial a base de Quitina

Los biomateriales que contienen quitina se utilizan en diversas aplicaciones biomédicas y de ingeniería. Un polisacárido natural llamado quitina abunda en la naturaleza y forma un componente importante del exoesqueleto de artrópodos, insectos, crustáceos y en la pared celular de algunos hongos [44].

Las propiedades de la quitina la convierten en una opción atractiva para la ingeniería de biomateriales. ¿Por qué? Es biocompatible, es decir, puede ser absorbido por el cuerpo humano sin sufrir efectos negativos. Además, puede biodegradarse en sustancias no tóxicas y ser absorbido por el cuerpo. Los biomateriales a base de quitina tienen la capacidad de cumplir con los requisitos de aplicaciones médicas, como la

producción de suturas, apósitos, estructuras de ingeniería de tejidos y sistemas de liberación controlada de fármacos [44].

La quitina es un material versátil que puede modificarse. A partir de esta sustancia se puede elaborar quitosano, que es soluble en ácidos acuosos y tiene múltiples usos en la regeneración de tejidos para la administración de fármacos. La combinación de quitina y quitosano con otros materiales, como polímeros sintéticos o cerámicas, puede dar como resultado biomateriales compuestos que poseen propiedades particulares [44].

La ingeniería de tejidos utiliza biomateriales a base de quitina para crear estructuras tridimensionales que sirven como entorno de crecimiento para células y tejidos. Esto es necesario para la restauración de tejidos dañados o la creación de órganos artificiales. Adaptar la porosidad y la estructura de estos andamios puede conducir a un mayor crecimiento y diferenciación celular [44]. Como se puede observar en la Figura 6, en la ingeniería tisular los biomateriales naturales y sintéticos son de suma importancia como andamios o ayudantes a la regeneración.

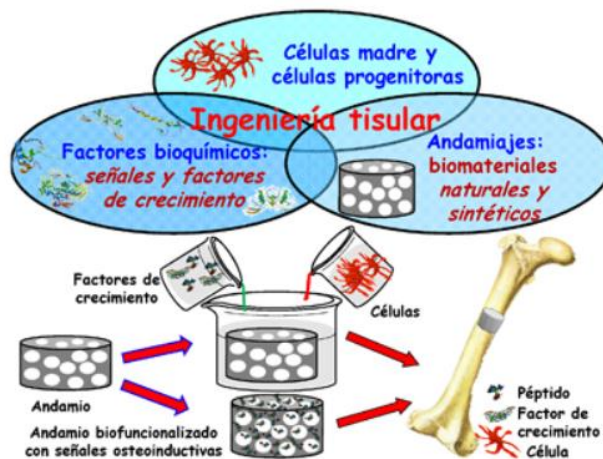


Figura 6. Ingeniería tisular: pilares sobre los que se sustenta [44]

La quitina extraída del camarón es biocompatible y generalmente está libre de secuelas inmunológicas, no provoca reacción alérgica. Este atributo facilita enormemente las aplicaciones médicas. Además, la quitina es biodegradable, lo que significa que se descompone en sustancias no tóxicas y el cuerpo la absorbe con el tiempo. Las aplicaciones médicas, incluida la producción de suturas, apósitos y sistemas de liberación controlada de fármacos, pueden beneficiarse de las propiedades de los

biomateriales a base de quitina. En ingeniería de tejidos, estos biomateriales se emplean para construir estructuras tridimensionales que proporcionan las condiciones ideales para el desarrollo celular. Ajustar la porosidad y la estructura de estos andamios puede promover el crecimiento y la diferenciación de los tejidos, lo cual es crucial para reparar tejidos dañados o crear órganos artificiales [44].

Además, la quitina del camarón puede alterarse químicamente para modificar sus propiedades, incluida su solubilidad y carga superficial. Su utilidad aumenta en diversos dominios biomédicos y de ingeniería. En aplicaciones que requieren una liberación controlada de fármacos, como los hidrogeles de quitina, es útil porque puede retener grandes cantidades de agua y liberar fármacos gradualmente [44].

Se muestra la molécula de la quitina en la Figura 7 donde la composición de la molécula de quitina se puede expresar como $(C_8H_{13}NO_5)_n$, donde n es el número de unidades repetidas. Cada unidad es una N-acetilglucosamina, que es una glucosa modificada con un grupo acetilamina en el carbono 2 [45] [46]. Los grupos que se muestran en la imagen corresponden a los siguientes átomos o grupos funcionales:

- HO: grupo hidroxilo, que se encuentra en los carbonos 3, 4 y 6 de la glucosa.
- CH₂OH: grupo metileno-hidroxilo, que se encuentra en el carbono 5 de la glucosa.
- O: oxígeno, que se encuentra en el anillo de glucosa y en los enlaces glicosídicos entre las unidades.
- CH₃: grupo metilo, que se encuentra en el grupo acetilamina.
- CO: grupo carbonilo, que se encuentra en el grupo acetilamina y en el carbono 1 de la glucosa.
- NH: grupo amino, que se encuentra en el grupo acetilamina.

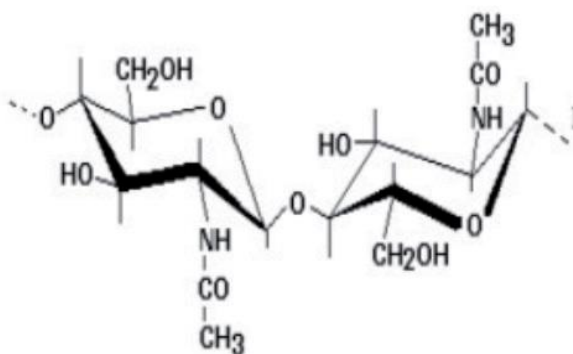


Figura 7. Molécula de quitina [47]

1.3.12 Compuestos de quitina-grafeno

Los compuestos de quitina con grafeno representan una clase especial de materiales híbridos que combinan las propiedades únicas de la quitina, un polisacárido natural, con las excepcionales propiedades del grafeno, un alótropo bidimensional del carbono. Esta combinación singular de materiales ha despertado un gran interés en una variedad de aplicaciones científicas, médicas e industriales debido a su versatilidad y propiedades avanzadas, aunque aún se requiere más investigación de estos compuestos de quitina con grafeno [22].

Los compuestos de quitina y quitosano con nanomateriales de carbono, como el grafeno y el óxido de grafeno (GO), son materiales híbridos prometedores para aplicaciones energéticas [22]. Estos bio-nanocompuestos combinan las propiedades biológicas y fisicoquímicas de los polisacáridos con las propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas de los nanomateriales de carbono [22].

Los problemas encontrados de estos compuestos incluyen la limitada solubilidad de la quitina y quitosano en agua, la baja dispersión del grafeno y del óxido de grafeno en matrices poliméricas, la toxicidad potencial de los nanomateriales de carbono, la falta de investigación sobre el control de calidad de nanocompuestos, y el alto coste de producción y escalado [22].

El óxido de grafeno (GO) es un material derivado del grafeno, que consiste en una red de átomos de carbono con grupos funcionales de oxígeno, como hidroxilos, epóxidos y carboxilos. El GO se puede obtener por la oxidación del grafito natural, usando agentes oxidantes como el ácido sulfúrico, el ácido nítrico y el permanganato de

potasio. El GO tiene propiedades interesantes, como una alta superficie específica, una buena dispersión en agua y una baja conductividad eléctrica. El GO se puede usar como precursor para obtener grafeno reducido, que es más conductor y tiene una estructura más similar al grafeno. El GO también tiene aplicaciones potenciales en el campo de los biosensores, los supercondensadores, los nanocompuestos y la purificación de agua [48] [49].

La combinación de la quitina y el GO puede dar lugar a un material híbrido con una mayor superficie, una mayor estabilidad térmica y una mayor capacidad de almacenar y liberar iones. Esto es beneficioso para las pruebas electroquímicas del biomaterial, usando el potencióstato que controla el potencial y la corriente aplicados al material.

1.3.13 Electrodo

Un electrodo es un conductor utilizado para establecer un contacto eléctrico con una sustancia o medio con el fin de permitir que la corriente se mueva o exista un flujo de esta. Aplicaciones como la electroquímica, la electrofisiología o la soldadura implican el uso de electrodos [50].

e. Electrodo de trabajo:

También conocido como electrodo activo o primario, en este es donde ocurre la reacción electroquímica relevante durante una medición o experimento. Debe ser altamente selectivo para responder de manera adecuada y precisa a la especie química que se está estudiando. Además, debe poseer una buena conductividad eléctrica para facilitar la transferencia de electrones durante la reacción electroquímica. Debe ser estable en el medio ambiente para garantizar la fiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos [50].

En este caso, el electrodo de trabajo, compuesto de quitina/GO, es el componente central en estos experimentos electroquímicos. La quitina aporta su biocompatibilidad y capacidad de modificación química, mientras que el grafeno contribuye con su excelente conductividad eléctrica y superficie altamente activa para reacciones. Su comportamiento electroquímico es esencial para la investigación, este electrodo es necesario para catalizar las respuestas requeridas [47] [50].

f. Electrodo de referencia:

Para medir el potencial del electrodo de trabajo se utiliza un electrodo de referencia, que tiene un potencial constante. Se emplea para crear una escala de potenciales y compararlos. Debe poder adaptarse y replicar los cambios en el entorno con relativa estabilidad. Además, su respuesta electroquímica debería ser relativamente menor en comparación con el electrodo activo [50].

El electrodo de referencia es un elemento crucial en la medición y regulación del potencial eléctrico del electrodo de trabajo. Un ejemplo ampliamente utilizado es el electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl), que mantiene un potencial eléctrico constante y conocido. Esto es esencial para medir y controlar las condiciones electroquímicas a lo largo del experimento [51].

g. Electrodo auxiliar o contraelectrodo:

Una celda electroquímica lo emplea para completar el circuito eléctrico. En lugar de participar directamente en la reacción electroquímica relevante, se emplea para mantener la corriente que fluye a través del sistema. Este no debe ser reactivo y no reaccionar con las especies químicas de la solución. Su objetivo principal es proporcionar una superficie para que circule la corriente eléctrica [50].

El contraelectrodo o auxiliar, en este caso de platino, cumple una función esencial en la configuración experimental. Se lo selecciona por su alta conductividad eléctrica y su resistencia a la corrosión, lo que garantiza la estabilidad del potencial eléctrico en el sistema. Esta estabilidad es crucial para mediciones precisas de las corrientes electroquímicas generadas en el electrodo de trabajo [50] [52].

1.3.14 Pruebas electroquímicas

h. EDS en un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM):

El uso de Espectroscopia De Dispersión De Energía (EDS) en un Microscopio Electrónico De Barrido (SEM) es una técnica analítica avanzada que proporciona información detallada sobre la composición elemental de la muestra a nivel atómico. El SEM es una herramienta que utiliza alta resolución para capturar imágenes

detalladas de superficies en escalas minúsculas. Tanto SEM como el enfoque EDS son eficaces para caracterizar materiales en diversos dominios científicos y tecnológicos [53].

Principio de Funcionamiento. Las muestras absorben electrones de alta energía mediante la emisión de rayos X característicos, que es la base de la EDS en SEM. Si los electrones incidentes golpean los átomos de la muestra, pueden provocar que se ionicen y liberen electrones de las capas internas. Durante el proceso de ionización, los electrones del exterior de las células viajan al interior de las paredes, emitiendo rayos X característicos. Cada elemento químico emite rayos X de energías específicas, que permiten identificar y medir sus elementos constituyentes en la muestra [53].

i. FTIR

La Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) es una herramienta analítica versátil y potente que puede detectar y analizar la composición química de diversos materiales. Este método se basa en la interacción de moléculas con radiación infrarroja, lo que permite obtener información detallada sobre los grupos funcionales y enlaces químicos presentes en una muestra [54].

- **Principio de Funcionamiento.** Explora el potencial de las moléculas para absorber infrarrojos a frecuencias que corresponden a las vibraciones de los enlaces químicos. La presencia de una "huella digital" en el espectro infrarrojo permite la detección y cuantificación de todos los diferentes componentes dentro de la molécula, así como sus grupos o tipos funcionales. El detector mide la intensidad de la radiación transmitida o absorbida en relación con las longitudes de onda cuando exponen un objeto a un espectro infrarrojo [54].

1.3.15 Sensorización electroquímica

La ciencia y la tecnología modernas se basan en sistemas de sensorización electroquímica. Al medir y controlar una reacción redox, estos sistemas ofrecen soluciones esencialmente de bajo costo para la detección de analitos variables [55].

La aplicación de un potencial eléctrico a la celda electroquímica del analito de interés es un aspecto crucial de cualquier sistema de sensorización electroquímico. Al activar este potencial eléctrico, se produce una reacción redox en el analito, lo que da como resultado una corriente eléctrica que puede medirse. La concentración del analito afecta la magnitud de esta corriente eléctrica, lo que permite su medición [55].

1.3.16 Potenciostato LMP91000

El LMP91000 es un chip front-end analógico programable (AFE) diseñado para su uso en aplicaciones de detección electroquímica de micro-potencia. Proporciona una solución completa de ruta de señal entre un sensor y un microcontrolador que genera un voltaje de salida proporcional a la corriente de la celda [56].

El LMP91000 es configurable, lo que permite su compatibilidad con múltiples sensores electroquímicos, como sensores de gas tóxico de 3 electrodos y sensores de celda galvánica de 2 electrodos, con un solo diseño en lugar de múltiples soluciones discretas. Soporta sensibilidades de gas en un rango de 0,5 nA/ppm a 9500 nA/ppm y permite una fácil conversión de rangos de corriente de 5 μ A a 750 μ A a escala completa [56].

El sesgo de celda ajustable y la ganancia del amplificador de transimpedancia (TIA) del LMP91000 son programables a través de la interfaz I2C1. La interfaz I2C también puede ser utilizada para diagnósticos del sensor [56]. Un sensor de temperatura integrado puede ser leído por el usuario a través del pin VOUT y utilizado para proporcionar una corrección de señal adicional en el μ C o monitoreado para verificar las condiciones de temperatura en el sensor [56]. En la Figura 8, se observa el diseño interno del LMAP91000 donde se encuentra lo siguiente:

- Dos variables de entrada llamadas VREF y VDD las cuales son partes configurables por el usuario, estas utilizan un amplificador A1 para alimentar el contraelectrodo, la señal que recibe del electrodo de referencia ingresa a la parte negativa del amplificador A1 que permite medir el diferencial de potencial entre estos dos electrodos dependiendo de la solución ionizante.

- Un switch que permite cambiar la configuración de operación entre dos y tres electrodos.
- Resistencia de carga configurable para el electrodo de trabajo RLoad permitiendo una mejor sensibilidad.
- Un amplificador de transimpedancia TIA el cual se encarga de convertir la corriente en voltaje para determinar de una manera más fácil el nivel de señal.
- Resistencia para el amplificador RTIA, permite aumentar o disminuir la retroalimentación para la sensibilidad del amplificador.
- Salidas Temp Sensor e I2C Interface & Control logic para el control mediante la programación mediante el protocolo I2C.

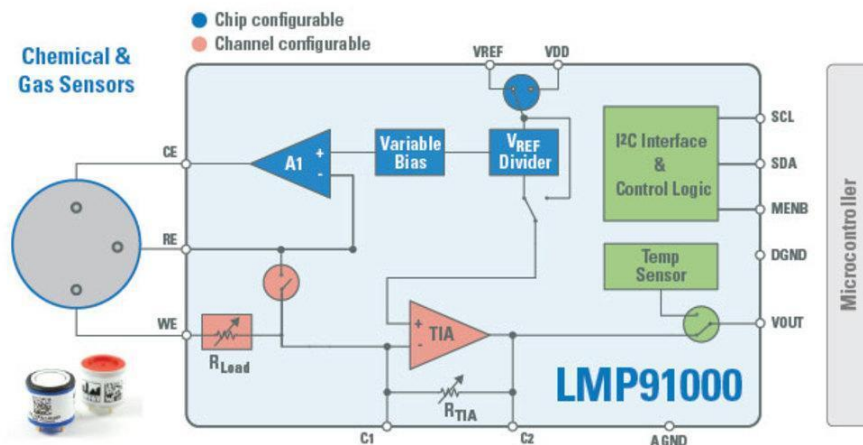


Figura 8. Diseño interno del LMP91000 [57]

1.3.17 Interfaz y tecnología de Comunicación

Javascript es un lenguaje de programación de código abierto que se utiliza especialmente para páginas web con funcionalidades y aplicaciones web. Permite a los programadores de cualquier nivel interconectar dispositivos físicos gracias a librerías o frameworks, bases de datos y API para construir aplicaciones web. Va a recoger y procesar datos de sensores electroquímicos, así como para controlar dispositivos y actuadores basados en los resultados del análisis [58].

En cuanto al sensado de señales, Javascript ofrece varias capacidades. Por ejemplo, websockets permite recibir múltiples señales de sensores binarios (físicos o virtuales), almacenar su estado y fusionarlos en uno solo. Utiliza métodos http como: put, delete, get y post para manejar los estados del sensor y trabajar bajo ese modelo de comunicación.

En el contexto de ESP32 y WiFi, Javascript se ha utilizado para controlar las configuraciones, almacenamiento de las credenciales y para intercambiar datos a través métodos REST [59] [60].

1.3.18 NFC

El uso de tecnología NFC (Near Field Communication) para la seguridad permite que el usuario tenga múltiples ventajas, con respecto a otros métodos de seguridad, un claro ejemplo es la facilidad y rapidez para habilitar o desactivar dispositivos, utiliza un estándar ISO 14443 que define las características físicas y la interacción de trabajo entre etiquetas de proximidad y dispositivos que funcionan a 13,56 MHz [61].

Las comunicaciones, aunque el estándar ISO 14443 menciona que pueden operar hasta 10cm, los nuevos módulos han optado por bajar la intensidad del campo con distancias prácticas de hasta 1cm, lo que dificulta que un atacante pueda ‘captar’ información. Esta tecnología, que se basa en la inducción de campos electromagnéticos, es utilizada en muchas aplicaciones contemporáneas, como pagos móviles, tarjetas de acceso y etiquetas inteligentes [61].

El módulo PN532 actuará como sistema de seguridad para habilitar o deshabilitar el potenciómetro, NFC va a ser utilizado para autenticar a un usuario antes de permitir el acceso al sistema. Por ejemplo, un usuario podría tener una tarjeta NFC que se lee con un lector NFC integrado en el sistema. Solo cuando se presenta la tarjeta correcta, el sistema se activaría o desactivaría. El módulo está equipado con una antena a bordo, por lo que no se necesita una antena externa. Es compatible con las interfaces SPI, IIC y UART para la comunicación [62] [63].

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Construir un potenciostato para pruebas electroquímicas del biomaterial a base de quitina/GO.

1.4.2 Objetivos específicos









- Identificar los componentes electrónicos que permitan la construcción de un potenciostato electroquímico de tres electrodos.
- Construir el circuito electrónico basado en tecnología NFC para pruebas electroquímicas y calibrarlo utilizando los tres electrodos.
- Fabricar un electrodo de quitina/GO y caracterizar su funcionalidad con pruebas electroquímicas.
- Diseñar una interfaz de usuario intuitiva para la extracción y visualización de los datos recolectados, que permita un fácil acceso y entendimiento de los resultados de las pruebas electroquímicas.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

El proyecto de investigación principalmente se centra en la creación de un potenciostato de parámetros configurables, que emplea tecnología probada y confiable para realizar análisis electroquímicos del biomaterial a base de quitina/GO; este biomaterial de igual manera, se lo va a desarrollar durante el proyecto. Se tuvo una cuidadosa consideración para seleccionar los componentes electrónicos para la construcción del dispositivo, con el objetivo de mejorar la relación entre costo y beneficio del potenciostato. Estos componentes se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Materiales

Material	Gráfico	Utilidad
Esp32		Es un microcontrolador de doble núcleo, se encarga de recibir los datos que llegan desde el LMP91000EVM.
LMP91000EVM		Es un módulo de evaluación cuyo microchip encapsula un potenciostato de tres electrodos, se encarga de medir el potencial de las celdas.
ADS1115		Módulo ADC de 16 bits que permite convertir la señal analógica a digital para obtener valores de señales muy pequeñas.
PN532		Módulo NFC se encarga de la seguridad del potenciostato, a través de un dispositivo TAG, de esa manera solo el personal autorizado podrá interactuar con el dispositivo.
Batería LIPO		Componente de almacenamiento de energía, para facilitar el uso del dispositivo sin necesidad de conectarlo a una fuente externa.
Pantalla Oled 2,42		Componente que permite la visualización del estado de seguridad del potenciostato, de indicar si este se encuentra en estado activo y de proporcionar información para ingresar a la interfaz.
Platformio		Entorno de programación, el cual está diseñado para crear entornos separados y un mejor manejo de recurso y librerías.
JavaScript, HTML y CSS		El software del dispositivo está desarrollado en JavaScript para las funciones y comunicación con la ESP32, está maquetado y estilizado con CSS para una mejor apariencia.

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la investigación

La modalidad de investigación para el proyecto es aplicada, se propuso poner en práctica los conocimientos adquiridos durante la formación académica para el diseño e implementación de un potencióstato de bajo costo para pruebas electroquímicas del biomaterial a base de quitina/GO.

La investigación bibliográfica necesaria para llevar a cabo este proyecto se realizó a través de la consulta de tesis, artículos de revistas, libros y manuales con el fin de orientar adecuadamente el proyecto de investigación y obtener resultados adecuados con un porcentaje de error bajo con respecto a otros potencióstatos.

La fase de desarrollo del potencióstato involucró resultados experimentales que debieron ser contrastados con estudios previos donde usaron el LMP91000EVM, lo que convierte a este proyecto en un estudio de enfoque metodológico experimental. Tras varias pruebas del mismo electrodo de trabajo, los resultados fueron coherentes dando una variación mínima en cada punto de la muestra, independientemente de la cantidad de ciclos y configuraciones generales como resistencia de transimpedancia, voltajes mínimos y máximos (mV), velocidad de muestreo (mV/s) y medición en pasos de voltaje (mV), esto quiere decir que, sin importar las varias configuraciones, si se usan varias muestras del mismo compuesto, los resultados son muy parecidos, por lo que el potencióstato tiene un margen de error muy bajo.

Este proyecto identificó que, a pesar de su bajo costo, el potencióstato es capaz de proporcionar resultados precisos y fiables, lo que lo convierte en una herramienta importante para el área de la investigación para el desarrollo de biomateriales a base de quitina/GO.

2.2.2 Población y muestra

En este proyecto de investigación, no se realizaron pruebas directamente en personas, ya que el enfoque se centró en el diseño y construcción de un potenciostato, además, de la obtención del electrodo de quitina /GO y pruebas electroquímicas del biomaterial.

La población en este estudio fueron los electrodos de trabajo de quitina, quitina/GO y una lámina pequeña de oro, esta última fue necesaria para constatar los resultados del potenciostato desarrollado en este estudio con otro que fue desarrollado y comparado con un potenciostato profesional. Estas muestras fueron utilizadas para realizar las pruebas electroquímicas y evaluar el desempeño del potenciostato.

2.2.3 Recolección de información

La información para este proyecto se recopiló mediante una amplia revisión bibliográfica de tesis, hojas técnicas, artículos y manuales. Este proceso se enfocó en obtener información detallada sobre los antecedentes, el funcionamiento y los principales componentes de los potenciostatos, así como sobre la electroquímica y los biomateriales basados en quitina. También se investigaron los fundamentos relacionados con los análisis electroquímicos y los materiales utilizados en la elaboración de estos biomateriales.

La información de este proyecto se recopiló a través de una búsqueda bibliográfica de tesis, fichas técnicas, artículos y manuales. El proceso tuvo como objetivo obtener un conocimiento más profundo sobre el origen, funcionamiento y componentes principales de los potenciostatos, así como sus distintos métodos electroquímicos, incluyendo el biomaterial basado en quitina.

2.2.4 Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos en este proyecto involucró varios componentes cruciales para definir tanto el hardware como el software más adecuado para el desarrollo óptimo del potenciostato, estos incluyen:

- Comparación de los distintos chips de potenciostatos que se pueden adquirir de manera particular.
- Estudio de las configuraciones, métodos de operación, parámetros utilizados previamente implementados en dispositivos similares.
- Comparación y presentación de los resultados de acuerdo con los objetivos propuestos en la investigación y con otro potenciostato probado.

2.2.5 Desarrollo del proyecto

Se presentan las actividades para poder ejecutar el presente proyecto.

- Revisión de aplicaciones y funcionamiento de un potenciostato profesional.
- Identificación de los componentes electrónicos necesarios para la construcción de un potenciostato electroquímico de tres electrodos.
- Adquisición de los componentes identificados para el potenciostato.
- Ensamblaje del circuito electrónico basado en tecnología NFC.
- Diseño de una interfaz de usuario intuitiva para la visualización y extracción de los datos recolectados, incluye la programación de las técnicas electroquímicas.
- Pruebas del potenciostato construido como Voltametría cíclica, Voltametría normal de pulso, Voltametría de onda cuadrada y cronoamperometría utilizando electrodos comerciales como el de platino para el contraelectrodo o auxiliar, de cloruro de plata para el electrodo de referencia y la lámina de oro como electrodo de trabajo en una solución de ácido ascórbico.
- Fabricación de un electrodo de quitina/GO utilizando los materiales y métodos adecuados.
- Pruebas electroquímicas del electrodo de quitina/GO.

- Implementación de la interfaz de usuario en la memoria del módulo ESP32 comunicándose con la red local a través de métodos como WEBSOCKETS y HTTPREQUEST.
- Fabricación de varios tipos de electrodos de trabajo.
- Prueba de la funcionalidad del potenciostato con los métodos de voltamperimetría y cronoamperometría.
- Calibración del potenciostato siguiendo recomendaciones del fabricante donde se corrige el diferencial de potencial de los tres electrodos.
- Comparación de los resultados de las diferentes mediciones.
- Informe final.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de los resultados

Las pruebas electroquímicas han sido de gran ayuda para determinar el comportamiento de ciertos materiales y como pueden ser aprovechados en base a los resultados que se obtuvieron de los mismos, pero los costos actuales por dispositivos de gran precisión se tornan muy inaccesibles para personas particulares e incluso para laboratorios académicos. Por lo tanto, se desarrolla un dispositivo que cumpla con las funcionalidades necesarias para las pruebas electroquímicas con un potencióstato de tres electrodos además de facilitar su uso con una interfaz amigable.

- Explorar las tecnologías modernas y accesibles para el desarrollo de un potencióstato para pruebas electroquímicas.
- Encontrar las limitaciones de desarrollo del sistema electrónico y cómo se superan estos conflictos.
- Discutir las distintas pruebas electroquímicas como: La Voltametría cíclica, Voltametría de onda cuadrada, Voltametría de pulso normal y cronoamperometría, en base a eso se han dado los resultados.
- Considerar algunas mejoras que se puedan dar para que el dispositivo cumpla con todos los parámetros necesarios y que posea una alta eficiencia.

3.2 Desarrollo de la propuesta

El presente proyecto investigativo se enfoca en pruebas electroquímicas de Voltametría Cíclica, Voltametría normal de pulso, Voltametría de onda cuadrada y Cronoamperometría de electrodos de quitina/GO, utilizando un potencióstato construido basado en hardware y software libre, por lo que estas pruebas sólo dependen de dichos electrodos de trabajo y de electrodos comerciales de referencia, contraelectrodo o auxiliar y de trabajo (lámina de oro).

El dispositivo cuenta con un método de configuración de red previa al funcionamiento como tal. El dispositivo emite una red WIFI llamada “Potenciostato” la cual se la debe vincular a un smartphone o computadora, después, este dispositivo debe dirigirse a un navegador y colocar la Default Gateway 192.168.4.1 que es la puerta de enlace predeterminada. Una vez allí, se muestra un proceso de configuración inicial para colocar las credenciales de la red WIFI local, una vez guardadas estas credenciales, el dispositivo se reinicia conectándose a la red WIFI local, si el dispositivo cambiara de ubicación o no encontrase una red WIFI, se repite el proceso de asignar credenciales de la red WIFI local hasta que se conecte a la red local generando la red “potenciostato.local”. Una vez conectada a una red WIFI local, no es necesario que se realice este proceso.

Para la activación del dispositivo, se requiere un tag NFC el cual será colocado sobre el módulo NFC (led rojo), si el tag contiene el UID correcto se enviará una señal al módulo relé, caso contrario, no se obtendrá respuesta del sistema. Esta señal habilita las funcionalidades del dispositivo, luego, se procede a colocar un smartphone compatible con NFC encima del logo de NFC que se encuentra ubicado en la parte superior de la carcasa, en caso de no poseer un smartphone compatible, se puede acceder a través del enlace que está proporcionado en la parte superior junto al logo NFC. Dentro del enlace, se muestra la interfaz de usuario, la cual cuenta con varias opciones a elegir, las cuales son "Métodos", "Configuración", "Panel", "Descargar", "Sistema", "Ayuda" y "Acerca de nosotros". En el botón de “Ayuda” se va a encontrar todo lo necesario para el funcionamiento del dispositivo con la interfaz.

En la parte física, se procede a colocar los tres electrodos, de trabajo (WE), referencia (RE) y contraelectrodo (CE) o auxiliar junto con la solución en una celda electroquímica; con la celda preparada, se conectan los cables de salida del potenciostato, estos se los puede identificar fácilmente mediante las letras de la carcasa o por color para cada tipo de electrodo a los cuales deben conectarse; una vez conectados, en la interfaz se selecciona “Configuración” y se colocan los parámetros iniciales para el método electroquímico que se requiera y se los envía aplastando el botón “Enviar”; automáticamente la interfaz se abrirá en la ventana “Métodos” y se presiona el botón de calibración para que el diferencial de potencial de los electrodos inicie en cero, luego se selecciona el botón del método que se desee hacer el análisis y

el dispositivo empieza a generar microcorrientes con respecto al diferencial de potencial (V_{ref}); el proceso interno de envío de datos consta de dos partes, la primera es del microcontrolador que genera los datos en base a la programación de cada método, y en la segunda parte, estos datos con el método HTTPpost y las funciones de websocket que son requeridas desde el cliente, son enviados al servidor local, y por último, la librería “Plotly” de JavaScript es la encargada de graficar esos datos en un “gráfico de dispersión con líneas y marcadores”; dependiendo de la configuración, tomará un tiempo en mostrar los resultados; una vez finalizado, se descarga, de manera automática, un archivo con los valores de voltaje y corriente para un análisis posterior en cualquier software que acepte el formato CSV como por ejemplo Microsoft Excel.

3.2.1 Arquitectura del sistema

El sistema está desarrollado para pruebas electroquímicas, por lo tanto, tienen componentes químicos y electrónicos, también forma parte un subsistema que se encarga propiamente del potencióstato, las aplicaciones que abarca son desde la medicina, estudio de combustibles, y especialmente en la industria tecnológica y electrónica para el desarrollo de baterías y supercondensadores. El sistema cumple parámetros de seguridad, fiabilidad además de ser compacto. En la Figura 9 se visualiza el esquema general del sistema.

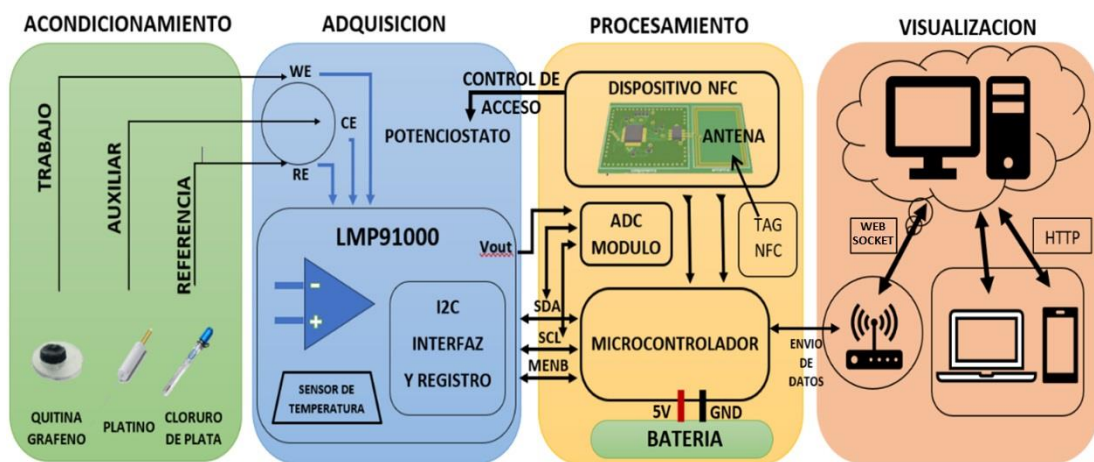


Figura 9. Arquitectura del sistema

El esquema general del potencióstato está conformado por cuatro etapas: Acondicionamiento, adquisición, procesamiento y visualización de los datos.

j. Acondicionamiento.

La primera etapa se basa en el desarrollo y/u obtención de los electrodos, se dispone de tres los cuales son: de trabajo (WE), contraelectrodo (CE) o auxiliar y de referencia (RE), cada uno está compuesto por distintos materiales.

- ***Electrodo de Trabajo.*** Este electrodo se desarrolla en el presente proyecto al mezclar quitina con grafito/grafeno. Se crean varias muestras de este electrodo con esa composición junto con electrodos de trabajo de quitina y se usa una pequeña lámina de oro. La quitina, el grafito/grafeno y la lámina fueron provistos por el grupo de investigación dirigido por el PhD. Pablo Raúl Valle Velasco Docente de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y supervisado por la PhD. Martha Esperanza Sevilla Abarca Docente Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial.
- ***Contraelectrodo.*** Para el contraelectrodo o auxiliar se utiliza alambre de platino, por sus propiedades eléctricas, además de ser buen catalizador en reacciones electroquímicas.
- ***Electrodo de Referencia.*** El cloruro de plata es un electrodo de referencia y consiste en un alambre de plata metálico (Ag) recubierto con una capa de cloruro de plata (AgCl).

k. Adquisición

Esta etapa comienza por el subsistema que conforma el potencióstato, partiendo desde su entrada que conforma los tres tipos de electrodos: trabajo, auxiliar y referencia, después cuenta con amplificadores de señal, se alimenta 3,3 voltios (V_{in}), además con voltaje de bias (V_{dd} y V_{ref}), cuenta con un sensor de temperatura y una interfaz i2c para la comunicación y envío de datos hacia el microcontrolador.

En la Figura 10 se observa el diagrama de flujo de la adquisición de datos del potencióstato en donde se encarga el módulo LMP91000EVM, el cual cuenta con tres pines para los electrodos de trabajo, auxiliar o contraelectrodo y de referencia, estos pueden ser monitorear en tiempo real desde la opción de Panel en el sistema WEB que maneja el potencióstato, ahí se puede cambiar los parámetros y ver como varía los valores de la señal, de ser así se procede a realizar cualquiera de las pruebas que se

muestra en la sección de métodos, si en caso salga mucha distorsión o ruido, se puede configurar parámetros para adecuar la señal, y de ser satisfactorio el resultado el usuario puede descargar el archivo en formato CSV para su análisis posterior.

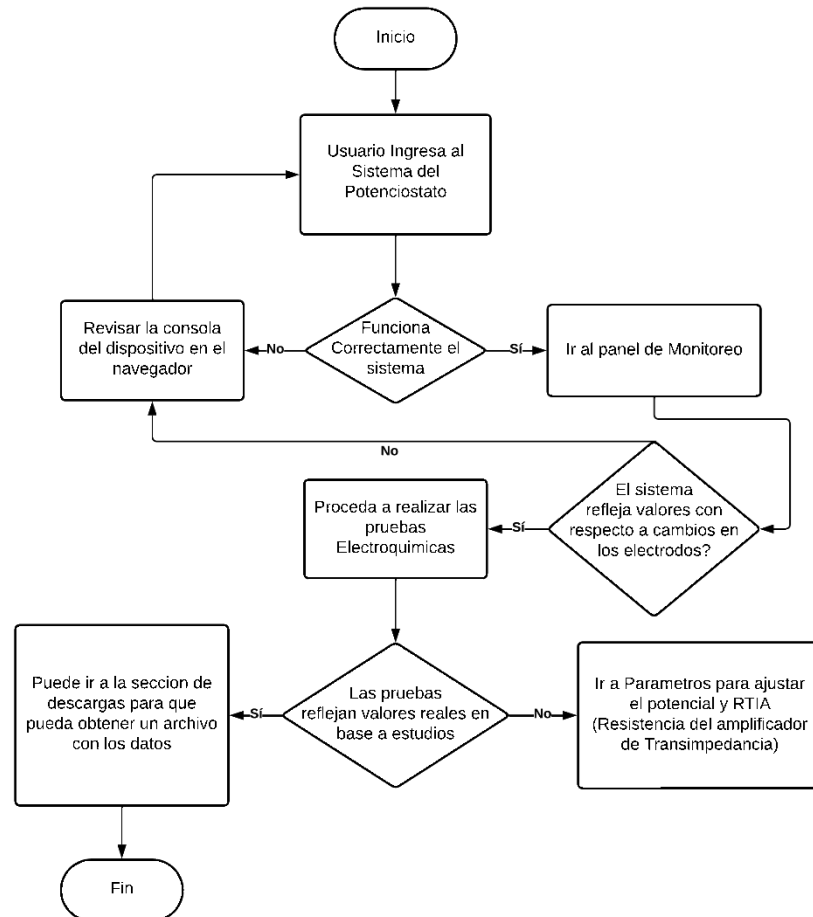


Figura 10. Diagrama de flujo de la adquisición de datos

1. Procesamiento

La tercera etapa se encarga de recibir las señales del módulo Imp91000 por comunicación I2C, debido a que también envía una señal analógica adicional, el microcontrolador no cuenta con dicha entrada por lo que es necesario contar con un conversor análogo-digital como el módulo como el ADS1115. En la Figura 11 se muestra todo el proceso.

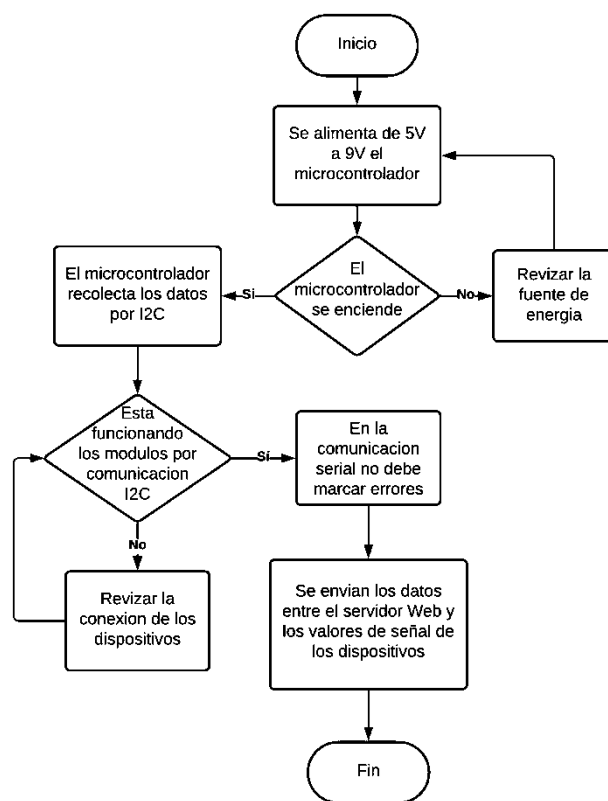


Figura 11. Diagrama de flujo del procesamiento de datos

- **Comunicación I2C.** Este es un protocolo de comunicación, tiene una señal de reloj que es el SSL o System Clock Line y SDA System Data Access que permite tener múltiples dispositivos funcionando bajo esta misma señal utilizando funciones de multiplexación, cada sensor debe tener su propia dirección I2C para su correcto funcionamiento, con el beneficio de no necesitar de muchos pines para la conexión de varios dispositivos, siempre y cuando no sea una frecuencia excesivamente alta superando los 10MHz.
- **Tratamiento de las señales.** El microcontrolador se programa para realizar los modos de operación como es la voltamperimetría cíclica, voltamperimetría normal de pulso, voltamperimetría de onda cuadrada y cronoamperimetría, las cuales realizan procesos matemáticos para el análisis, estas señales se grafican de acuerdo con parámetros de voltaje, potencia y microcorrientes.
- **Seguridad (NFC).** El microcontrolador trabaja junto a un módulo NFC, este dispositivo utiliza “Tags” para enviar información, la seguridad se basa en un número

de identificación única que permite a un usuario autorizado y específico operar el equipo, se lo realiza debido a que son procesos complejos los cuales una mala manipulación puede degradar o dejar obsoleto el equipo.

A continuación, en la Figura 12 se muestra cómo es el proceso de activación del Potenciostato mediante el tag NFC, posteriormente que esté aceptado el UID de cada tag, el LMP91000 junto con todo el resto del sistema, como sus funciones y servidor se activan por completo para acceder al enlace donde se encuentra la interfaz web para realizar las configuraciones y pruebas electroquímicas que se requieran.

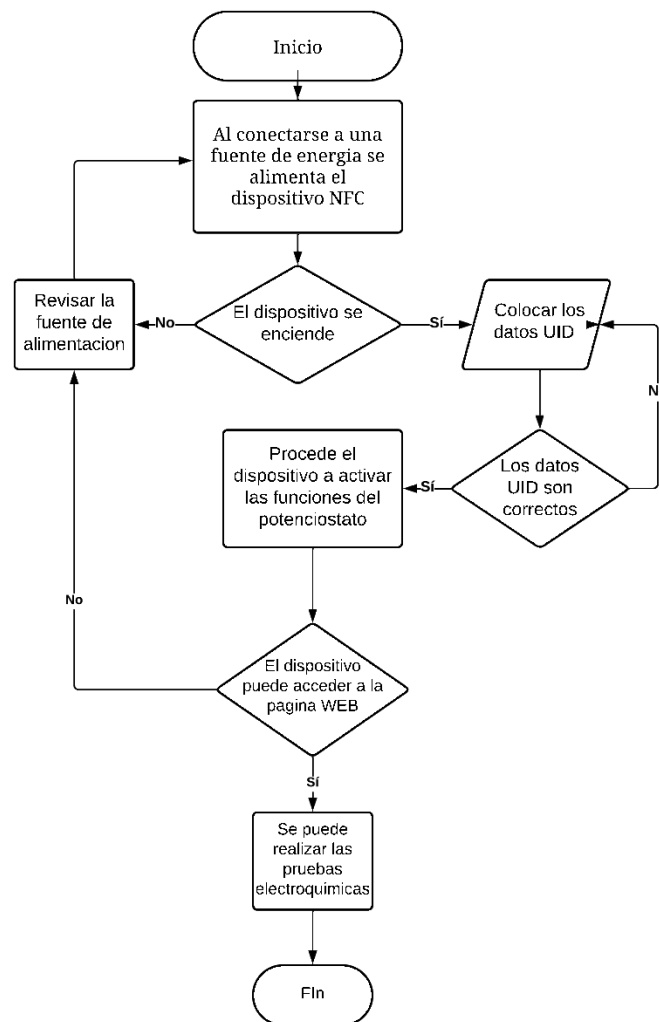


Figura 12. Diagrama de flujo del funcionamiento del NFC

- **Envío de Datos.** Finalmente, el microcontrolador al contar con un módulo Wifi envía los valores de las señales a través de la red inalámbrica. El módulo ESP32 crea

un servidor web, mediante las funciones get, post, delete que se utiliza en Javascript en el cliente, ya sea para pedir, publicar o borrar la instrucción dada.

- **Alimentación.** Se requiere de una fuente de 5V a 9V para el funcionamiento del sistema, el dispositivo puede funcionar con un par de baterías LIPO que se encuentran dentro del potencióstato que brindan 6,3V de voltaje nominal, como el dispositivo es de uso medio, esto quiere decir que se lo enciende, se realizan las pruebas y se lo apaga, la carga de las baterías dura 72 horas aproximadamente. Además, se puede conectar por cable serial para alimentarlo por medio de un Arduino Mega que únicamente es para esta función.

m. Visualización de Datos

Los datos del microcontrolador van a un servidor local por medio de websockets como protocolo de comunicación basado en TCP (Transfer Control Protocol), el servidor contará con “plotly” la cual es una librería open source para facilitar el proceso de visualización y análisis de los datos, el usuario final puede acceder desde cualquier tipo de dispositivo como laptops, smartphones o computadoras de escritorio ya que solo necesita un navegador web para funcionar. El proceso de visualización se muestra en la Figura 13.

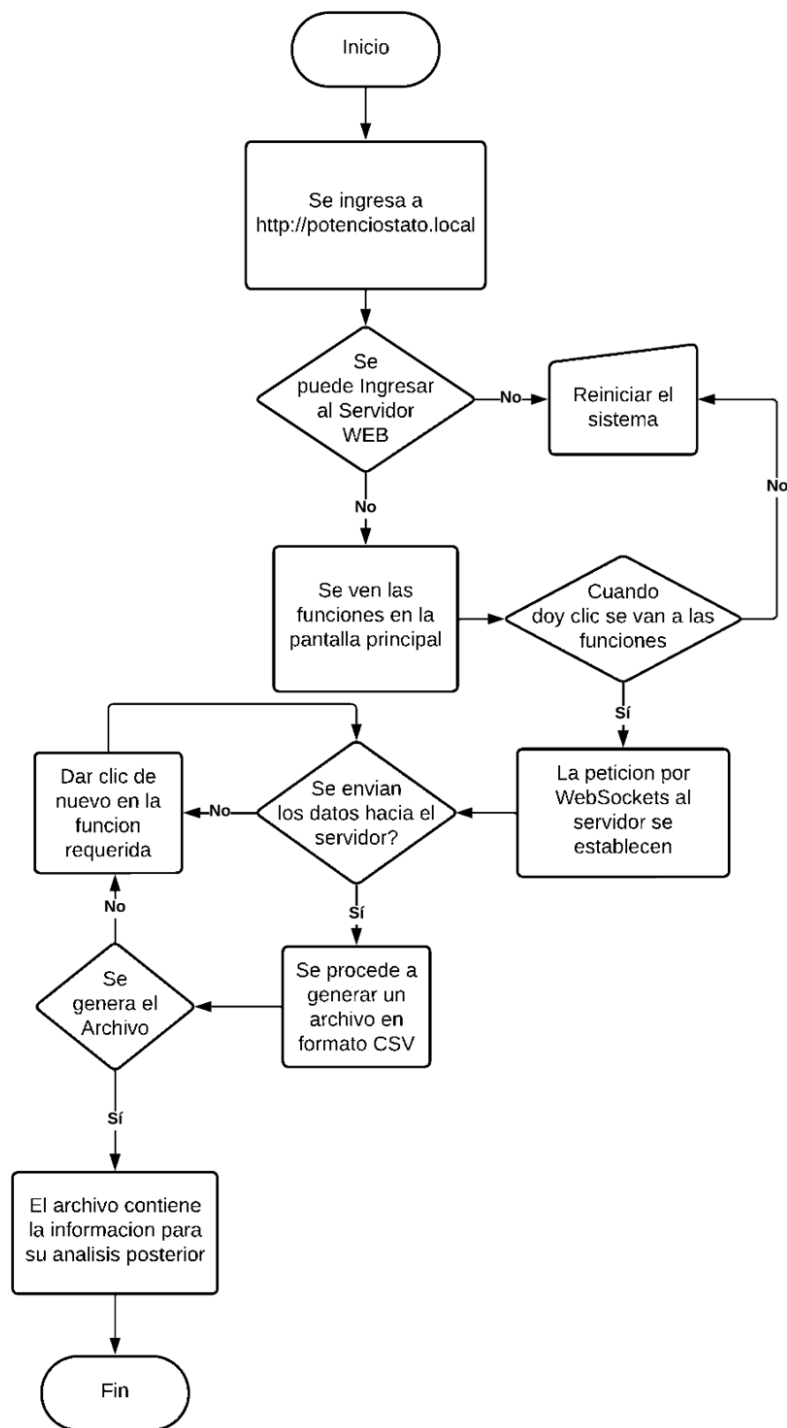


Figura 13. Diagrama de flujo de la visualización de datos

3.2.2 Componentes electrónicos

El siguiente trabajo de investigación está desarrollado con hardware libre y de fácil acceso en internet, permitiendo el desarrollo de un potencioestado funcional. Estos

componentes, aunque varían de acuerdo con el tipo y tecnología del potenciostato, son necesarios para la construcción de uno, a continuación, se detalla un potenciostato comercial para tener en cuenta sus características y funciones.




n. Potenciostato CS150

Es necesario conocer las características generales de un potenciostato comercial para entender sus funciones y estructuras básicas para la construcción de un potenciostato para las pruebas electroquímicas que se requieren para el electrodo de quitina/GO. El potenciostato CS150 es un modelo versátil y rentable que ofrece alto rendimiento y precisión, así como rápidos generadores de funciones digitales y circuitos de adquisición de datos de alta velocidad. Como se puede observar en la Figura A1 que es parte de los anexos, este potenciostato también cuenta con hardware y software avanzados para aplicaciones de corrosión, análisis de baterías, sensores, ciencias biológicas y química ambiental. El dispositivo se puede utilizar para una variedad de propósitos, incluida la medición de la corrosión por picaduras, la reducción de dióxido de carbono, la electrocatálisis, las pruebas de carga y descarga de baterías y otras aplicaciones, mediante el empleo de técnicas básicas como potenciostáticas (IT), CV, LSV, dinámica potente (Diagrama de Taffel) y MCD.

o. Sensor AFE LMP91000EVM

Se han encontrado en el mercado varias alternativas de chips que cumplen la función de potenciostatos, en la Tabla 2 se coloca la información más relevante y que comparten los distintos chips, para el desarrollo del dispositivo, se seleccionó el LMP91000EVM debido a que cuenta con todo lo necesario para obtener los resultados, desde capacitores y resistencias para reducir el ruido que puede presentarse, además de su costo beneficio también su accesibilidad y disponibilidad facilitó su importación hacia el Ecuador.

Tabla 2. Comparación de los potencióstos AFE (Analog Front End)

Parámetros	LMP91000EVM	LMP91000	EmStat Pico Core
			
Número de Canales.	1	1	2
Características.	Temperatura, TIA.	Temperatura, TIA.	TIA, Frec Dinámica
Temperatura en la que operan.	-40 a 85	-40 a 85	-25 a 70
V min.	2,7 V	2,7 V	-1,7 V
V máx.	5,25 V	5,25 V	2 V
Interfaz.	I2C	I2C	SPI
Precio.	100\$	5\$	250\$
País.	USA	USA	Países Bajos

La adquisición del módulo de evaluación LMP91000EVM por encima del chip LMP91000 se debe por procesos de construcción, ya que cuenta con normas FCC (FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION) parte 15 y Canadian ICES-003 como se muestra en la Figura A2. Estas normas especifican que los dispositivos que emiten energía de radiofrecuencia deben cumplir con ciertos límites para minimizar las interferencias perjudiciales. La FCC Parte 15, distingue entre los dispositivos de Clase A, diseñados para entornos comerciales, y los dispositivos de Clase B, diseñados para instalaciones residenciales, estableciendo diferentes límites para cada clase. Ambas clases de dispositivos deben aceptar cualquier interferencia recibida, incluyendo interferencias que puedan causar una operación no deseada. Por otro lado, la normativa canadiense ICES-003 no hace esta distinción entre entornos comerciales y residenciales, pero también establece límites para las emisiones de radiofrecuencia de los dispositivos. Por lo tanto, el LMP91000EVM, al cumplir con ambas normativas, ha sido diseñado y probado para minimizar las interferencias perjudiciales de radiofrecuencia en una variedad de entornos, tanto comerciales como residenciales. Sin embargo, si se producen interferencias, el usuario puede tener que tomar medidas para corregirlas. Es importante destacar que cualquier cambio o modificación no aprobado expresamente podría anular la autoridad del usuario para operar el equipo.




Estas normas dictan que, para minimizar las interferencias dañinas, los dispositivos que emiten energía de radiofrecuencia deben cumplir ciertas restricciones según estos

estándares. Los dispositivos Clase A para uso comercial y los dispositivos Clase B diseñados para uso residencial tienen límites diferentes establecidos por la Parte 15 de la FCC como se observa en la Figura A3. Se debe reconocer cualquier interferencia recibida por ambos dispositivos, incluida cualquier posibilidad de funcionamiento no deseado. Por el contrario, la norma canadiense ICES 003 no diferencia entre uso comercial y doméstico; también establece estándares para las emisiones de radiofrecuencia de los dispositivos como está indicado en la Figura A4. Entonces, el LMP91000EVM fue diseñado y probado para cumplir con ambos estándares, con el objetivo de disminuir la interferencia de radiofrecuencia en diversos entornos, incluidas aplicaciones comerciales y residenciales. Si hay interferencias, el usuario puede estar obligado a corregir el problema. Sin embargo, cualquier modificación o cambio no aprobado explícitamente podría provocar daños en el equipo. Es importante entender con qué normas trabaja ya que las ondas electromagnéticas pueden generar ruido en el dispositivo e interferencia con el microcontrolador y el dispositivo NFC.

p. Microcontrolador

Debido a las necesidades de enviar los datos a través de la red, se requiere un dispositivo que ya cuente con la tecnología compatible, de la misma manera se debe contar con entradas digitales y analógicas, los dispositivos disponibles y sus características más relevantes están detallados en la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación de los microcontroladores

Parámetros	Módulo ESP32	Módulo Heltec esp32	Módulo ESP8266
			
CPU Flash	“Espressif” Dual Core 32 bits 8MB	“Xtensa” Dual Core 32 bits 8MB	“Tensilica Xtensa” LX106 96 KB
Voltaje de operación	3,3V	3,3V	3,3V
Pantalla	No	0,96 pulgadas	No
Wifi	Si	Si	Si
Bluetooth	Si	No	No
USB	USB C	Micro USB	Micro USB
GPIO	17	36	16
ADC	12 bits	8 bits	8 bits
Pines analógicos	2	6	2
Pines Digitales	12	16	10
V externo	5V	3,3V	3,3V
V Batería func.	3,7V	3,7V	3,7V
Precio	100\$	5\$	250\$
País	USA	USA	Países Bajos




Los microcontroladores listados en la Tabla 3, presentan similitudes en sus parámetros, sin embargo, se opta por usar el módulo ESP32, desarrollado por la empresa Espressif Systems, debido a su capacidad de almacenamiento y la tecnología de comunicación que maneja, como está especificado en la Figura A5, facilitando el monitoreo de datos y comunicación con otros dispositivos como pantallas mediante la conexión i2c.

q. Dispositivo NFC

Los dispositivos NFC se han vuelto indispensables y en este caso, se los va a usar por motivo de seguridad, ya que los equipos de laboratorio solo son accesibles a personal capacitado o profesores. Se ha colocado el módulo PN532, el cual al contar con tres tipos de comunicación UART, I2C y SPI como se muestra en la Figura A6, lo vuelve muy práctico para utilizarlo con el microcontrolador seleccionado, se ha establecido la comunicación I2C ya que necesita menos pines, además que permite habilitar el modo “P2P_NFC”, el cual permite leer tags personalizados como en este caso para

poder acceder al funcionamiento del dispositivo. Los dispositivos disponibles están detallados en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación de los Dispositivos NFC.



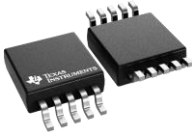
Parámetros	Módulo PN532	Módulo NFC DFR0231	Módulo NFC RDM8800
			
Voltaje de Operación	3,3V - 5V DC	3,3V – 5V DC	3,3V – 5V DC
Frecuencia de operación	13,56 MHz	13,56MHz	13,56MHz
Chip	PN532	DFR0231	RDM8800
Interfaces	SPI, I2C, UART	UART	UART
Transferencia de datos	Max 10Mbit/s	Max 8Mbit/s	Max 8Mbit/s
Normativa	ISO/IEC 14443A/MIFARE	ISO 14443A/MIFARE	ISO14443/A/B
Precio	12\$	25\$	30\$
País	USA	USA	USA

r. Conversores

Convertor ADC

El convertor ADC, se encarga de la adecuación de la señal emitida por los electrodos hacia el microcontrolador, se evalúa el tipo de comunicación y el número de canales de ingreso del convertor. Para efecto de selección se muestran los módulos que han sido tomados en cuenta para análisis en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparación de Características de los ADC

Parámetros	ADS1115	ADS8866	ADC161S626
			
Resolución	16 bits	16 bits	16 bits
Canales de Entrada	4	2	2
Voltaje Operación	2,7V a 5,5V	2,7V a 3,6V	2,7V a 5,5V
Rango de temperatura	-40°C a+ 125°C	-40°C a+ 85°C	-40°C a+ 85°C
Comunicación	I2C	SPI	SPI
Velocidad Muestreo	8 Hz a 860 Hz	100 KHz	1 MHz a 5MHz
SNR	89 dB a 93,2 dB	93 dB	89 dB a 93,2dB
Costo	\$ 12,50	\$ 5,41	\$ 17,62

Se selecciona el módulo ADS115, debido a que los módulos ADS8866 y ADC161S626 carecen de comunicación I2C, necesaria para comunicación entre módulos del dispositivo; además, no cuentan con los canales de entrada necesarios para el proyecto, se muestra las características más a profundidad en la Figura A7.

s. *Conversor DAC*

El conversor DAC desempeña la función de adecuar la señal de referencia utilizado por el potencióstato. Para esta comparación se torna en cuenta los módulos detallados en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación de los DAC

Parámetros	DAC Interno ESP32	DAC53508	DAC43204
			
Resolución	12 bits	10 bits	8 bits
Comunicación	SPI	SPI	SPI
Tiempo de estabilización	6 us	10 us	20 us
Voltaje operación	2,7V a 5,5V	1,8V a 5,5V	1,8V a 5,5V
Rango salida	0 a 5,5V	1,8V a 5,5V	1,8V a 5,5V
Rango de temperatura de funcionamiento	40 a 125	41 a 125	42 a 125
País compra	Ecuador	USA	USA
Costo	\$ 9,00	\$ 11,81	\$ 4,72

Se selecciona el módulo interno del propio microcontrolador debido a que presenta una resolución de 12 bits con comunicación SPI, a la vez, el tiempo de estabilización es menor en comparación de los otros módulos, como se muestra en la figura de anexo A5 del módulo ESP32.

t. *Respaldo Energético*

Para garantizar la autonomía del potencióstato, se requiere de alguna fuente externa. La batería LIPO 18650 al tener un voltaje nominal de 3,7 V permite abastecer de energía al dispositivo por bastante tiempo, se elige a esta por la capacidad de 2800mAh siendo mucho mayor que las otras baterías comparadas, la comparación se muestra en la Tabla 7 y las características más a detalle en la Figura A8.

Tabla 7. Comparación de tipos de baterías

Parámetros	Batería 18650 LIPO	Batería LIPO 752535	Batería LIPO 104050
			
Voltaje nominal	3,5V	7,4V	3,7V
Voltaje de carga completa	3,7V	8,32V	4,1V
Voltaje descarga de corte	2,5 V	6,8V	2,75V
Corriente	2800 mAh	500 mAh	100 mAh
Potencia	8,14Wh	3,7Wh	3,7Wh
Ciclos de vida	>600	>500	>600
País compra	Ecuador	Ecuador	Ecuador
Costo	\$4,50	\$10,00	\$5,00

u. Módulo Relé

Para complementar la integridad del dispositivo también se ha decidido ocupar seguridad por hardware, es decir un dispositivo electromecánico para activar o desactivar el suministro de energía al dispositivo LMP91000EVM, cuando el usuario coloque el NFC Tag correcto, el módulo relé se activa, permitiendo su uso y asegurando que este protegido de una posible mala manipulación de alguien sin autorización.

En resumen, para la elaboración del potencióstato, después de haber comparado varios elementos electrónicos en base a costo/beneficio y utilidad, se seleccionaron los siguientes:

- LMP91000 EVM (Chip Potencióstato en módulo de evaluación)
- ESP32 (conexión WiFi y DAC 12 bits para la conversión de señal digital-análogo)
- Módulo PN532 (seguridad NFC)
- ADS1115 (ADC 16 bits para la conversión de señal análogo- digital)
- Batería 18650 LIPO (2800 mAh)

3.2.3 Construcción del dispositivo

En la Figura 14, se observa el desarrollo de un módulo que contiene el microchip LMP91000, se realiza de esta manera para facilitar el uso ya que viene en un encapsulado SMD, el cual tiene dimensiones muy pequeñas, también cuenta con conectores que facilitan la entrada y salida de las señales, de esta manera facilitando la manipulación desde un protoboard para pruebas de encendido e interacción con los demás módulos.

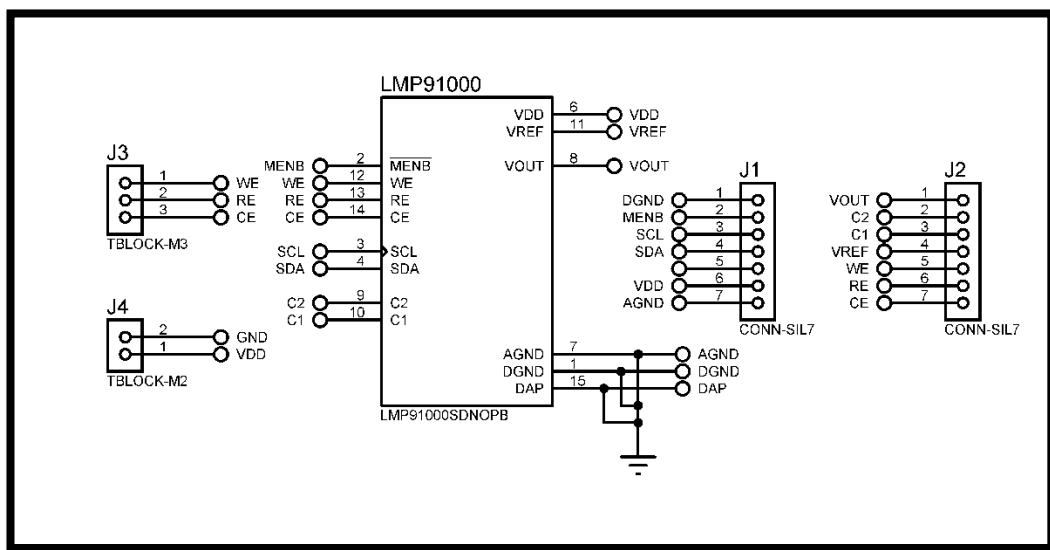


Figura 14. Esquema de la placa para el chip LMP91000

En la Figura 15 y Figura 16, se observa el diseño de la placa para el chip LMP91000, se las realiza utilizando el programa proteus, las pistas cuentan con una medida de 1,2mm de ancho, en una PCB de fibra de vidrio FR4.

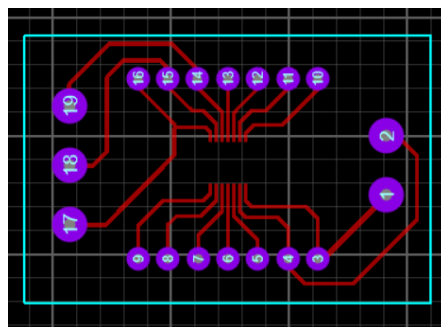


Figura 15. Diseño en PCB

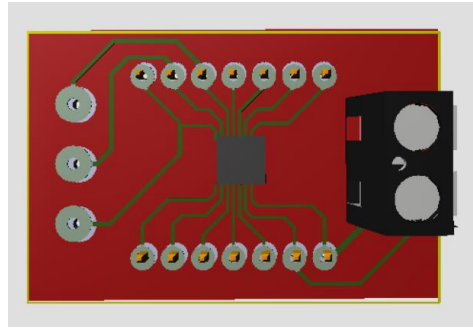


Figura 16. Diseño tridimensional

En la Figura 17, se observa el esquema de todos los componentes que se van a utilizar, se tienen desde una pantalla de 2,42 pulgadas, el módulo Imp91000, el microcontrolador ESP32, el ADC115 y un botón de “Reset” para deshabilitar el funcionamiento del potencióstato teniendo que introducir el tag NFC de nuevo.

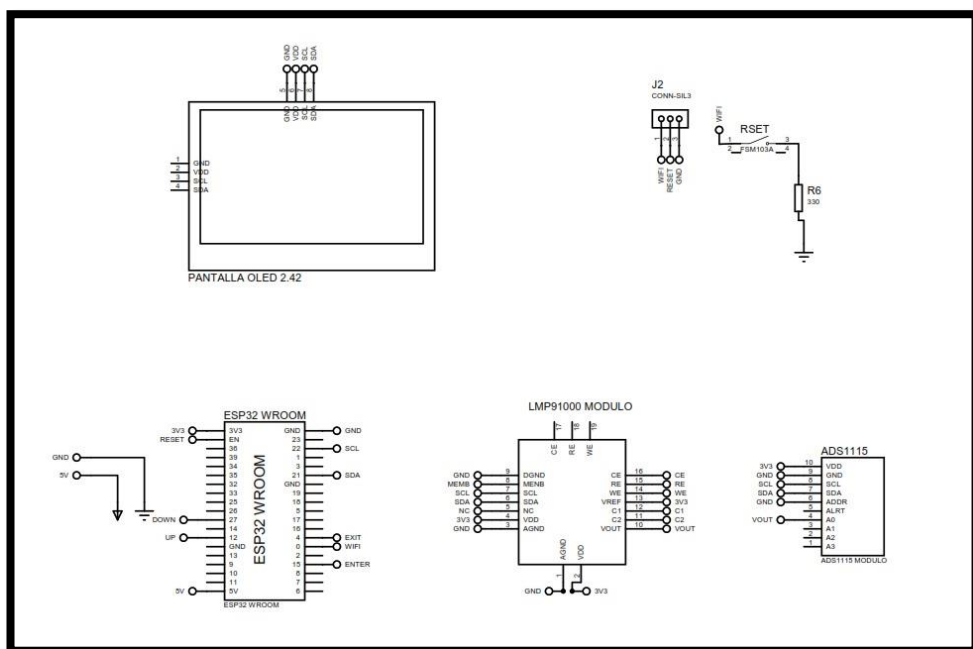


Figura 17. Esquema del sistema

El módulo con el chip LMP91000 desarrollado, sirve como parte principal del dispositivo, con el módulo funcionando, se procede a diseñar la placa que cumple con el objetivo de la manipulación directa a través de un botón físico de este módulo, que posteriormente será sustituido por el módulo de desarrollo LMP91000EVM. En la Figura 18 y Figura 19, se observa el diseño de la placa para la parte frontal del potencióstato.

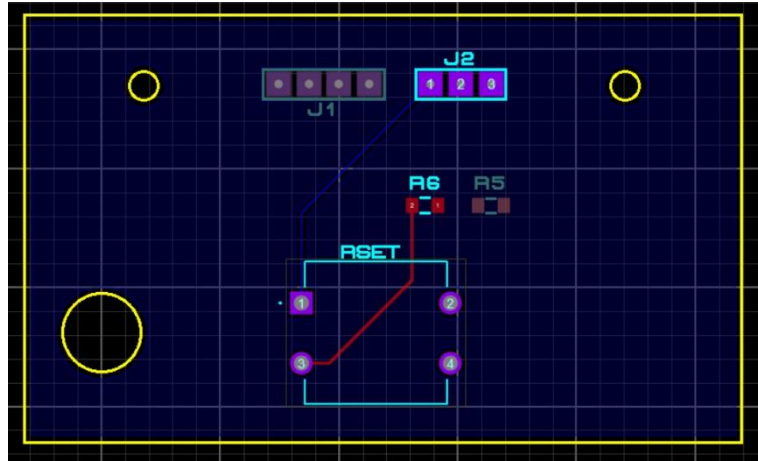


Figura 18. Diseño en PCB del sistema

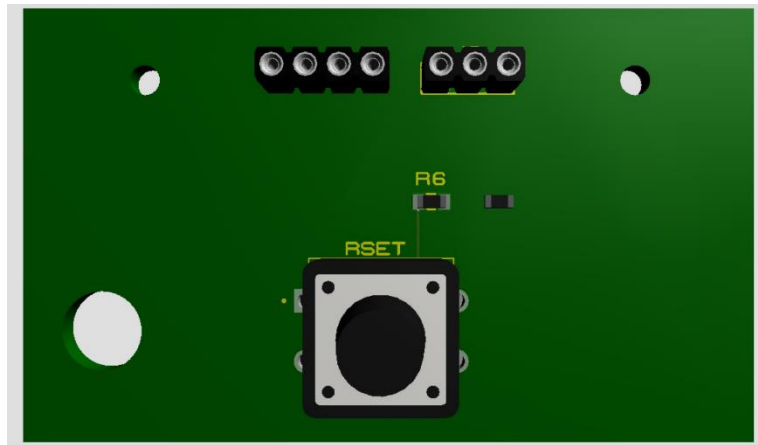


Figura 19. Diseño en 3D del sistema

Para la carcasa, se desarrolló el diseño en el software Solidworks como se muestra en la Figura A9, luego, por método de corte láser en MDF de 3mm ya que a diferencia de otros materiales por ejemplo impresión 3D, el costo es bajo del material, el proceso de diseño y de construcción es más rápido y existe mayor cantidad de softwares y recursos para el diseño, el proceso de corte se encuentra en la Figura A10.

Los demás sensores van a irse conectando de manera modular a una placa de baquelita donde la ESP32 va a estar soldada a esta como se muestra en la Figura A11. En la Figura A12 se muestra la posición de los pines del microcontrolador, se ocupa un shield donde ya viene soldado con todos los componentes para funcionar solo conectándole a una fuente de 3,7V hasta 5V DC.

Luego de haber realizado la carcasa, pruebas en protoboard y los diseños de los circuitos, se procede a la ubicación de estos con los sensores dentro de la carcasa. La parte interna y resultante del potencióstato se muestra en la Figura 20.

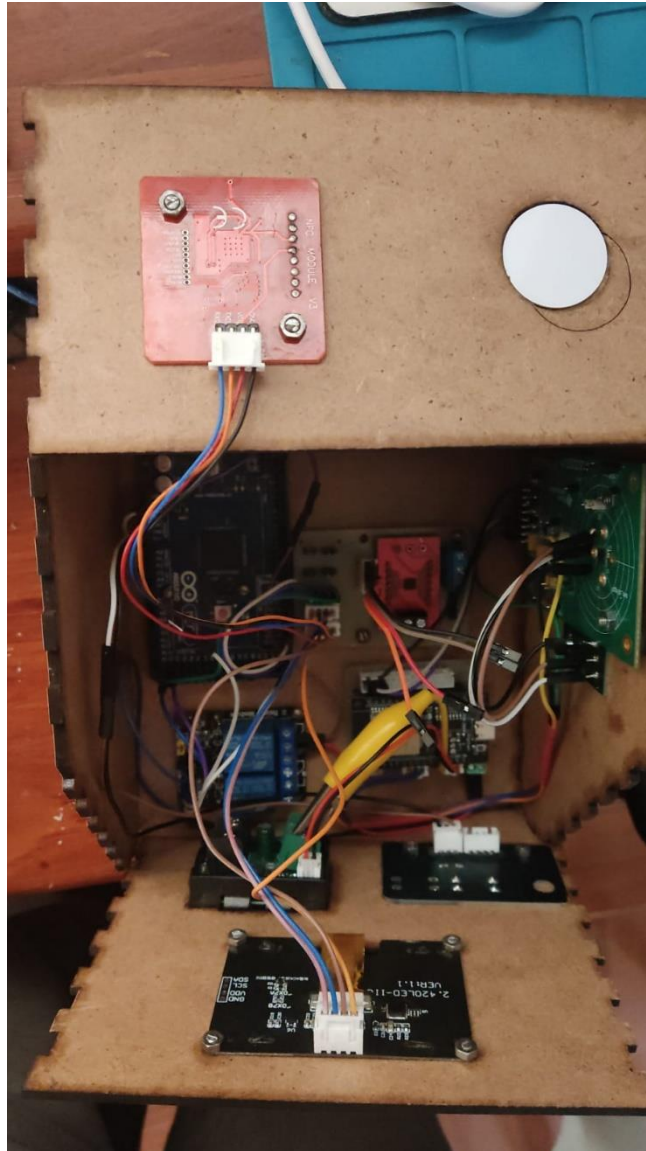


Figura 20. Parte interna del potencióstato

Después de tener el circuito del potencióstato, se procede con la programación de los métodos, en la Figura 21, se observa el código de ejemplo Voltametría cíclica para el dispositivo LMP91000:

```
#include <LMP91000.h>
#include <Wire.h>

LMP91000 pstat = LMP91000();

int rate = 200;
int settling_time = 50;
```

Figura 21. Librerías y variables para la función de Voltametría cíclica

En la parte de anexos, desde la Figura A13 hasta la Figura A23, se pueden observar las librerías necesarias para desarrollar el proyecto hasta los cuatro métodos electroquímicos.

En la Figura 22, se observa la Voltametría cíclica que genera desde el monitor serial tomando los datos en una gráfica de las dos señales, tanto de la corriente como del potencial con respecto al tiempo.

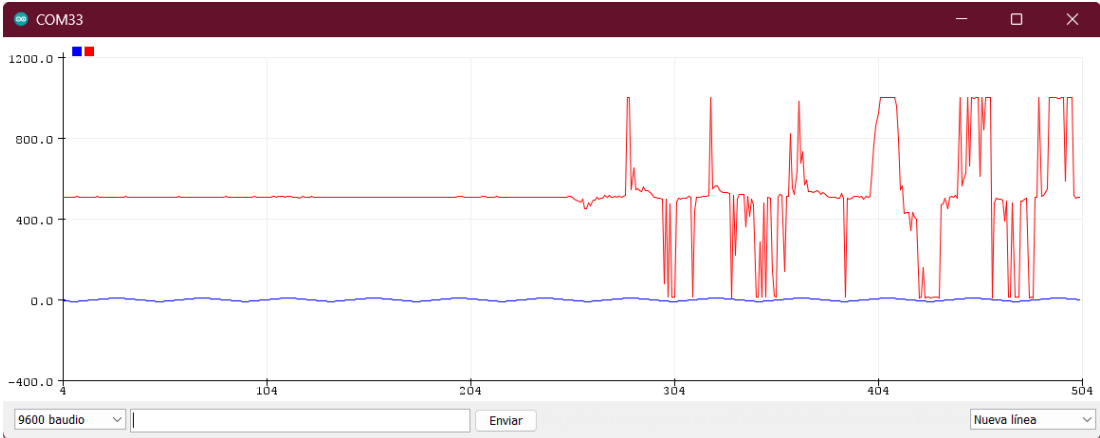


Figura 22. Señales adquiridas del sistema (Voltametría cíclica)

En la Figura 23 se muestra la placa del potencióstato comercial desarrollado y ensamblado por Texas Instrument, el LMP91000EVM.



Figura 23. Módulo profesional LMP91000

En la Figura 24, se observa el diagrama de flujo del sistema en general con su respectiva descripción de funcionalidad, el cual parte desde el ingreso o registro con el sistema de seguridad NFC, después toma los datos del sensor AFE LMP91000, pasa al microcontrolador donde primero es convertida la señal por el ADC de 16 bits para el análisis de esos datos, después se grafican y se visualizan desde el servidor local que se aloja en el propio microcontrolador.

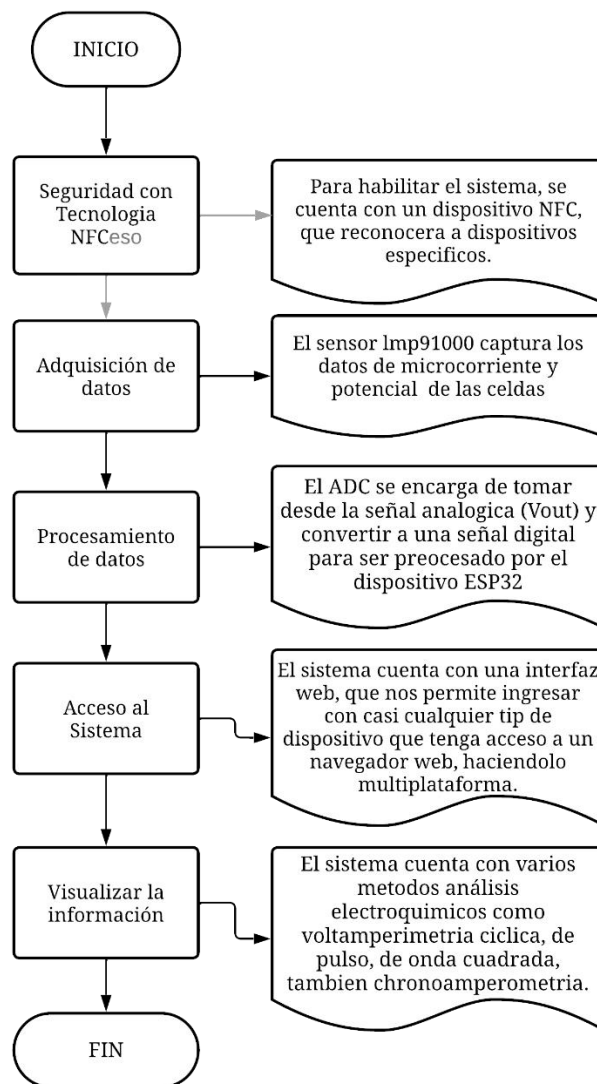


Figura 24. Diagrama de flujo del sistema

En la Figura 25 se muestra el potencióstato en funcionamiento, en este caso se lo conectó a un computador, aunque puede funcionar en un smartphone, para mostrar que puede funcionar cableado y de manera totalmente inalámbrica; también se muestran las conexiones que este ofrece para conectarlas con la celda electroquímica.

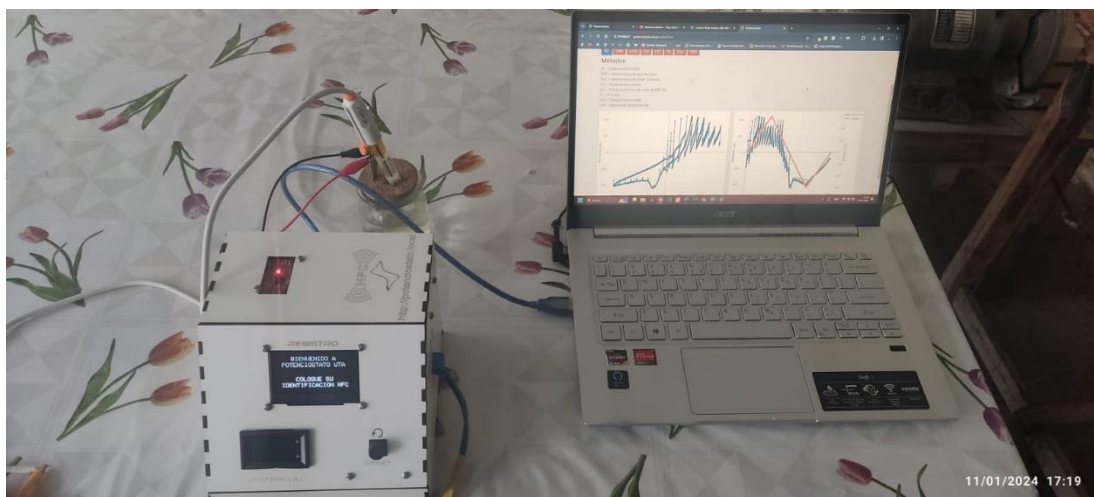


Figura 25. Potenciostato en funcionamiento

En la Figura 26, se observa de una manera más clara las tres conexiones a electrodos que dispone el dispositivo, tanto para un electrodo de referencia, un contraelectrodo y un electrodo de trabajo. También se observa la celda electroquímica realizada a un recipiente con tapa de corcho por los requerimientos del electrodo de quitina/GO ya que este requería de una sujeción ligera y con pizas de electrónica no era factible sostenerlo por lo que se atravesó el corcho y con una pinza de laboratorio de química se logró sostener a este electrodo para las pruebas electroquímicas, también se puede visualizar la celda en la Figura A24.



Figura 26. Parte de atrás del potenciostato

En la Figura 27 y en la Figura 28, se pueden observar los textos que muestra la pantalla incorporada en el dispositivo. La primera pantalla aparece al apenas alimentar con corriente al dispositivo, en este estado el potenciostato no va a funcionar, es decir, los

análisis electroquímicos, el acceso al servidor donde se encuentra la interfaz de usuario no van a estar disponibles ya que se requiere el UID que se encuentra en los tags NFC que sólo las personas autorizadas lo tendrán.

En la segunda pantalla se observa que el tag NFC ha sido validado y es posible acceder a la interfaz de usuario mediante un smartphone compatible con la tecnología NFC sin importar la marca pero que posea esta tecnología para acercarlo al logo de NFC, o si no se dispone de un celular con esta característica, se puede acceder al sitio “potenciostato.local” y se abre la interfaz con todas sus funcionalidades.



Figura 27. Texto inicial del potenciostato



Figura 28. Segundo texto del potenciostato

En la Figura 29 se observa la parte superior del potenciostato, el tag NFC debe ser colocado encima del módulo NFC o en el “led rojo”, de esa manera se accede a la

segunda pantalla donde se deberá colocar el smartphone encima de la palabra “NFC” y en ese instante será redirigido a la interfaz de usuario.

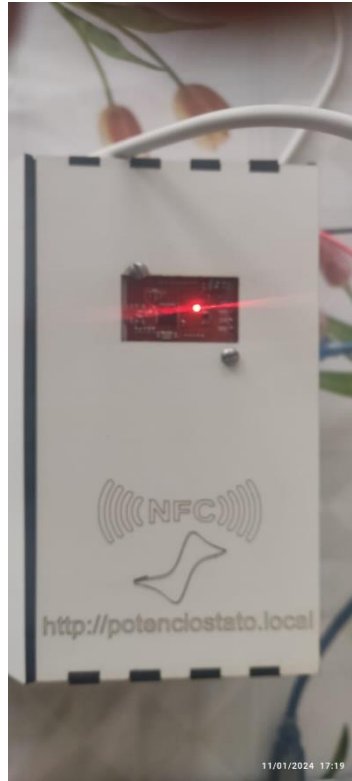


Figura 29. Parte superior del potenciostato

En la Figura 30 se observa la pantalla de potencial presente en el dispositivo, esta muestra los niveles de voltaje, amperaje y potencia en la que el potenciostato está trabajando en el instante que empiece a ser requerido con alguna prueba electroquímica.



Figura 30. Pantalla de potencial del Potenciostato

3.2.4 Electrodo de quitina/GO

En la Figura 31, se observa el electrodo de quitina/grafito-grafeno que se ha desarrollado a partir del material del grupo de investigación de Nanotecnología Aplicada con el proyecto de investigación con Resolución Nro. UTA-CONIN-2023-0066-R perteneciente a la Facultad de Civil y Mecánica.

Se usaron las siguientes proporciones de quitina y grafito-grafeno para la realización del electrodo: 1,509g de Quitina y 0,855g de grafito-grafeno. Se utilizaron estas cantidades siguiendo los criterios establecidos por el equipo de investigación, que se basan en las propiedades químicas y electroquímicas del material. Se utilizó una balanza electrónica para pesar, como se muestra en la Figura A25.

Estas cantidades se disuelven en 20ml de agua destilada y se van añadiendo 25ml de etanol al 75% en una gota por segundo para formar una mezcla de estos dos materiales usando un agitador magnético que se muestra en la Figura A27, esta se deja destilar Figura A28, hasta que solo sea una pasta Figura A29, por último, se comprime con un molde para darle la forma de una pastilla.



Figura 31. Electrodo de quitina/GO

En la Figura A30 se muestra un molde en acrílico para las primeras muestras del electrodo de quitina y grafeno, dimensiones de 1cm de diámetro para las circulares y de 3mm x 1,5cm para la muestra rectangular de 1mm de grosor. Aunque estas resultaron muy quebradizas ya que la idea al principio era encajar estos electrodos en una celda electroquímica, pero al ser muy delgadas no resistieron las pruebas, por

consiguiente, se decidió usar una prensa metálica que está en la Figura A31 donde entraba mayor cantidad de mezcla y los electrodos resultantes fueron de mayor grosor aproximadamente de 4mm de espesor en comparación a los primeros y estos siendo más resistentes, como se observa en la Figura A32.

Se debía introducir la mezcla con cierto grado de humedad para que pueda acoplarse muy bien al molde y al momento de secarse se compacte lo mejor posible; pero una vez realizados los electrodos fueron trasladados a un horno industrial del laboratorio para secarlos a una temperatura de 140 grados centígrados por 3 horas. El horno en cuestión se muestra en la Figura A33.

De igual manera, para realizar las pruebas, siguiendo el mismo proceso y cantidad de quitina, se realizaron electrodos de quitina como se muestra en la Figura A34.

En la Figura 32, se puede observar el electrodo de quitina/grafito-grafeno por microscopia electrónica de barrido, utilizando el equipo de la Facultad de Civil y Mecánica. Se visualizan microfibras de quitina adheridas al grafito-grafeno distribuidas de forma irregular a un aumento de 309X. Las longitudes de las microfibras de quitina de 41,1 μm y de 941 μm de largo y aglomeraciones adheridas al material de grafito-grafeno de 103,2 μm , 143,6 μm y 295,4 μm de diámetro promedio. El equipo y la muestra se muestran en el anexo Figura A35 y en el anexo Figura A36 respectivamente.

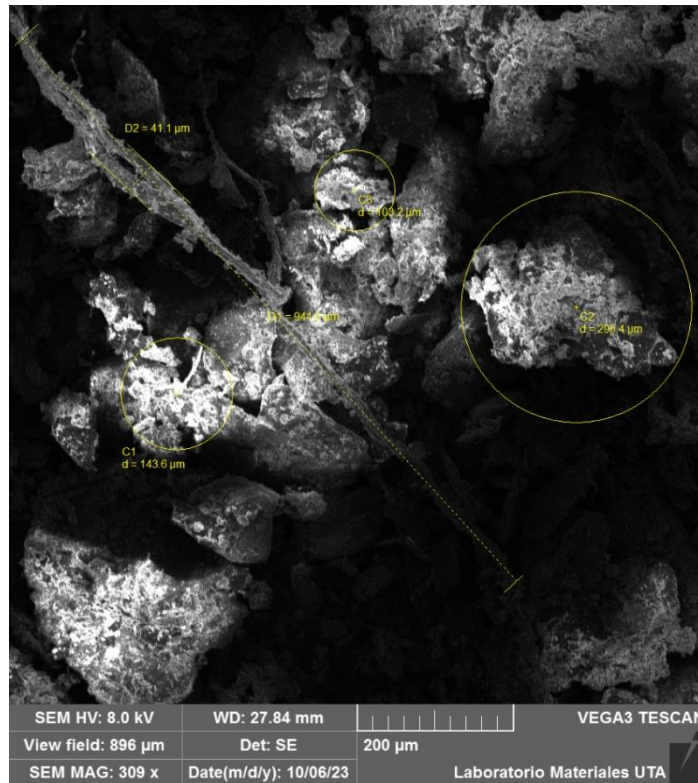


Figura 32. SEM del electrodo de quitina/GO.

Se accedió a una termobalanza para tener una mejor apreciación del electrodo de quitina/GO, esta se muestra en la Figura A37. Se tomaron tres muestras para el análisis: el electrodo de quitina/GO, una muestra de quitina y una muestra del grafito-grafeno. Al realizar los análisis en esta termobalanza que usa el método de termogravimetría, es decir, por evaporación del agua la muestra pierde peso, como resultado se obtiene el porcentaje de humedad final de la muestra, el tiempo de secado donde este dispositivo de manera automática determina un punto final cuando esta detecta un peso constante de la muestra y la temperatura de secado la cual se calentó la muestra.

El porcentaje de humedad se calcula con la ecuación (4):

$$\%H = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

$\%H$ es el porcentaje de humedad final;

P_i es el peso inicial de la muestra húmeda; y,

P_f es el peso final de la muestra seca.

Para el electrodo de quitina/GO, se pesa 0,5969 gramos, y al colocar en la termobalanza resultan 0,587 gramos, al finalizar el proceso, duró un tiempo de 02:36 minutos a 100° centígrados con un porcentaje de humedad de la muestra del 6,30% como se muestra en la Figura A38.

Para la muestra de quitina, se pesa 1,1222 gramos, y al colocar en la termobalanza resultan 1,097 gramos, al finalizar el proceso, duró un tiempo de 03:30 minutos a 80° centígrados con un porcentaje de humedad de la muestra del 6,29% como se muestra en la Figura A39.

Para la muestra de grafito-grafeno, se pesa 0,8841 gramos, y al colocar en la termobalanza resultan 0,561 gramos al finalizar el proceso, duró un tiempo de 02:42 minutos a 120° centígrados con un porcentaje de humedad de la muestra del 4,80% como se muestra en la Figura A40.

3.2.5 Interfaz gráfica para el control del Potenciostato

La sección de descarga que se visualiza en la Figura 33 permite al usuario tener los datos del último análisis que se ha realizado en formato CSV que puede ser analizado con el programa Excel.



Figura 33. Sección de Descarga del último análisis en formato .CSV

Igualmente, en la sección de sistema se pueden hacer cambios individuales por cada archivo, ya que puede actualizarse el archivo específico, en la Figura 34 se observa tanto los archivos HTML, CSS y también los JavaScript.



Figura 34. Sección de subida de archivos, (Actualización manual de los archivos de la memoria flash)

Otra subsección de las opciones de sistema es la configuración Wifi, como se observa en la Figura 35 se puede colocar hasta tres redes distintas, así cuando no se encuentre el dispositivo en un laboratorio con una red conocida, esta se pueda configurar con una nueva, cuando el dispositivo no se logra conectar está configurado para que al ingresarse a la dirección por default 192.168.4.1, se visualice un portal para colocar una nueva.



Figura 35. Sección del portal Wifi para ingresar credenciales

En el área de Sistema también cuenta con una subsección de Firmware, la cual se puede subir vía OTA (Over the Air), lo cual con una red wifi se le puede actualizar siempre que se haya hecho el compilado en el sistema Platformio, en la Figura 36 se observa un botón para colocar el archivo del firmware en formato .bin que se genera desde la

plataforma mencionada anteriormente, además también en caso quiera darle algunos cambios al estilo de la plataforma también se genera un archivo con todas las nuevas características.



Figura 36. Sección para actualizar el Firmware generado desde Platformio

La sección de Sistema que se observa en la Figura 37 abarca un botón para reiniciar el dispositivo en caso se haya configurado mal algún proceso de barrido, teniendo que mostrar de nuevo el tag NFC; al colocar demasiados ciclos o saturar la memoria flash con datos, puede que se demore demasiado o no concluya el proceso.



Figura 37. Sección para reiniciar el dispositivo

La sección de ayuda permite que el usuario final tenga conocimientos para operar el dispositivo, cuenta con instrucciones generales de operación, la Figura 38 detalla el proceso de calibración de los electrodos, parámetros básicos para cada método de barrido, también incluye enlaces externos los cuales sirven de guía para los procesos voltamperimétricos, también información sobre el valor de resistencia del amplificador de transimpedancia.



Figura 38. Sección de Ayuda para la operación del potenciostato

En la Figura 39 se muestra información sobre la versión del software, al usar Platformio se puede ir dando un seguimiento de revisión, además de colocar la información básica de los autores.



Figura 39. Sección acerca de los investigadores

3.2.6 Métodos de barrido del Potenciostato

Para el desarrollo del potenciostato se tiene algunos métodos de barrido para obtener los datos de voltamperimetría, los cuales se puede observar en la Figura 40, en la lista se enumeran como: Voltametría Cíclica, Voltametría Normal de Pulso, Voltametría de Onda Cuadrada y Cronoamperometría, además de esas técnicas también se tienen

opciones que permiten calibrar y corregir el ruido que genera en los procesos. Se muestra un manual de usuario en anexos desde la Figura A42.



Figura 40. Métodos de barrido del potenciostato

En la Figura 50 se realiza la Voltametría Cíclica en el potenciostato, se puede observar los puntos que representa un valor de corriente por cada valor de tensión, en donde la corriente se encuentra calculada en microamperios y el potencial en milivoltios. Observando un rango de voltaje (-200, 200) mV y una intensidad de (-30, 60) μ A.

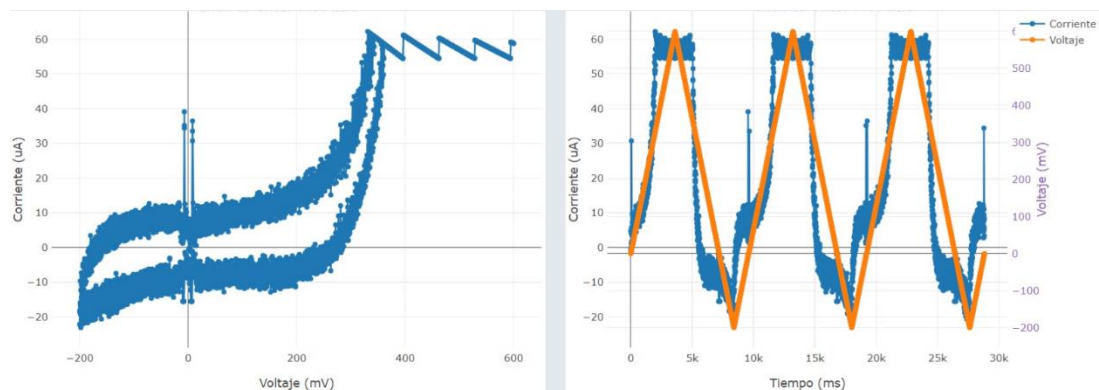


Figura 41. Resultado de la Voltametría Cíclica

La Voltametría normal de pulso utiliza un proceso digital para obtener los resultados, estos datos no son transformados por el DAC interno, sino que el ADC externo los provee, en la Figura 42 se aprecia los valores de corriente por cada paso de voltaje que marca en el barrido.

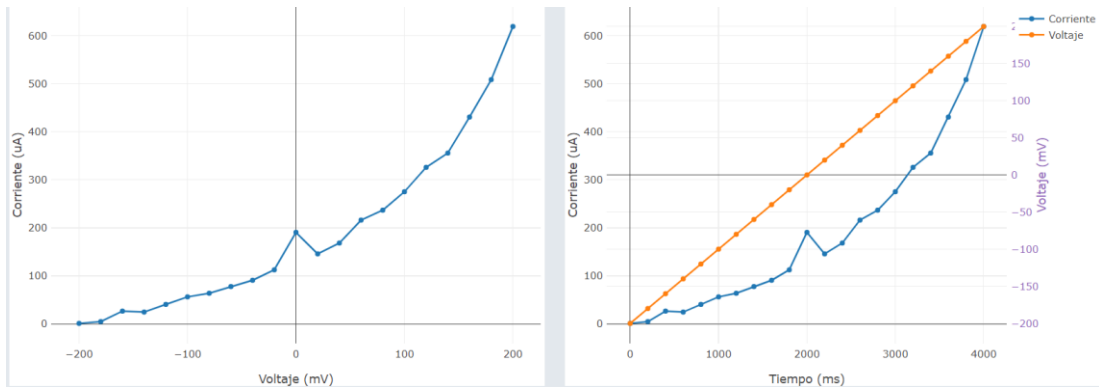


Figura 42. Resultado de la Voltametría Normal de Pulso

En la Figura 43 se observa el resultado de este análisis electroquímico donde es utilizado para pruebas capacitivas de materiales. Estos son los métodos más utilizados para realizar baterías u otros dispositivos como capacitores, observando un rango de voltaje (-200, 200) mV y una intensidad de (-70, 160) μA .

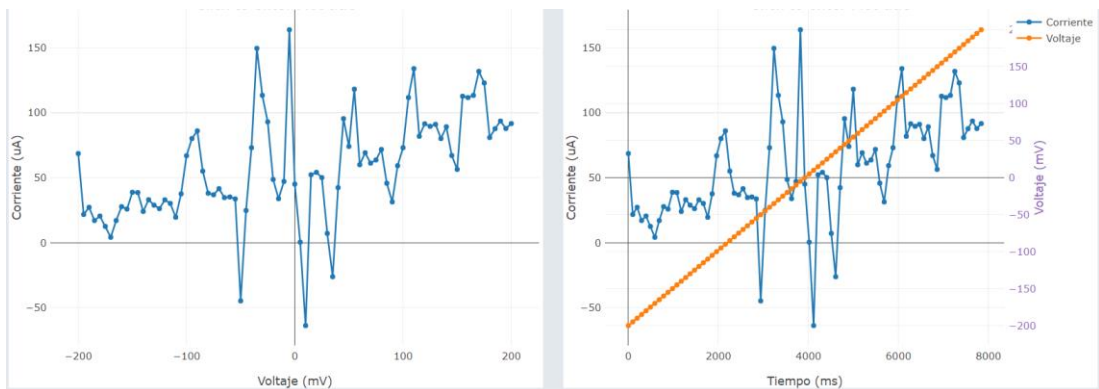


Figura 43. Resultado de la Voltametría de Onda Cuadrada

La Figura 44 muestra el resultado de la corriente y su comportamiento en un determinado tiempo, es un análisis más directo para saber si existe un proceso de reducción u oxidación en el electrodo de trabajo. Determinando la intensidad de corriente que fluye por el material.

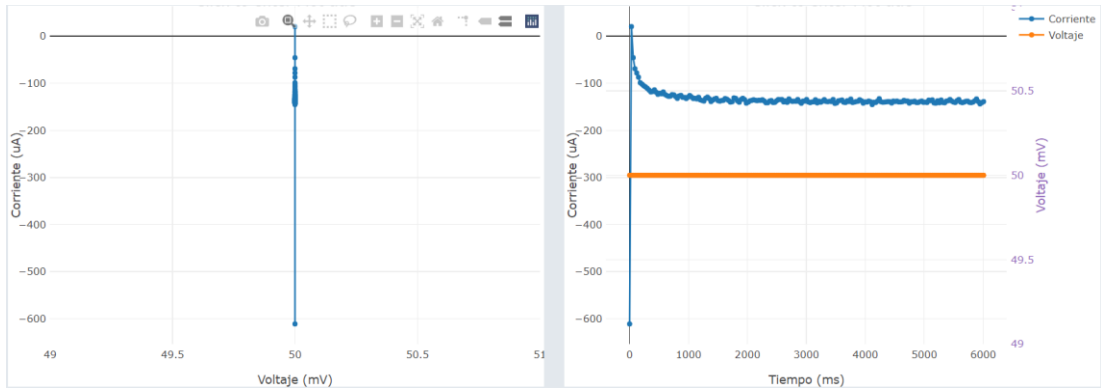


Figura 44. Resultado de la Cronoamperometría

En la Figura 45 se observa la prueba que permite corregir y reducir un poco el ruido que se genera en la resistencia del amplificador de Transimpedancia, este se encarga del barrido de cronoamperometría en un determinado tiempo.

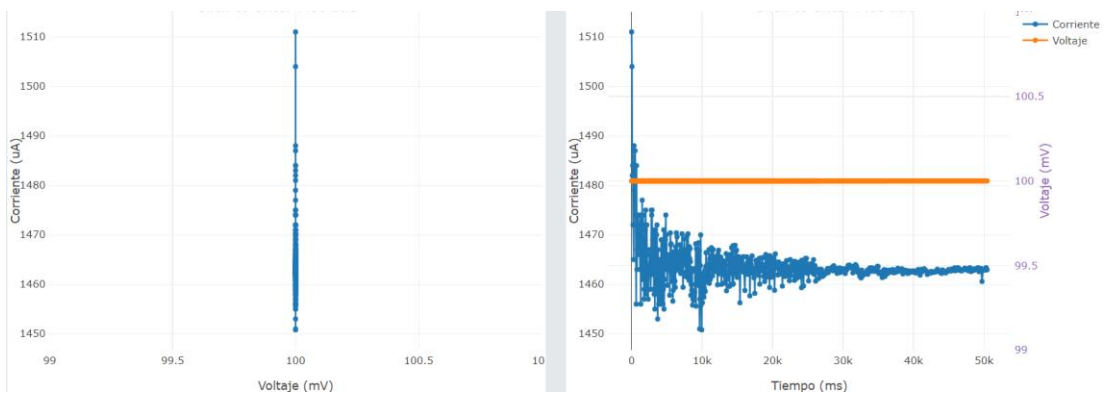


Figura 45. Resultado de la prueba de corrección de polarización (BIAS)

En la Figura 46 se obtiene el resultado de las curvas de corriente con respecto al potencial, aquí se determina en que posiciones las corrientes son más elevadas y cuando se reducen considerablemente.

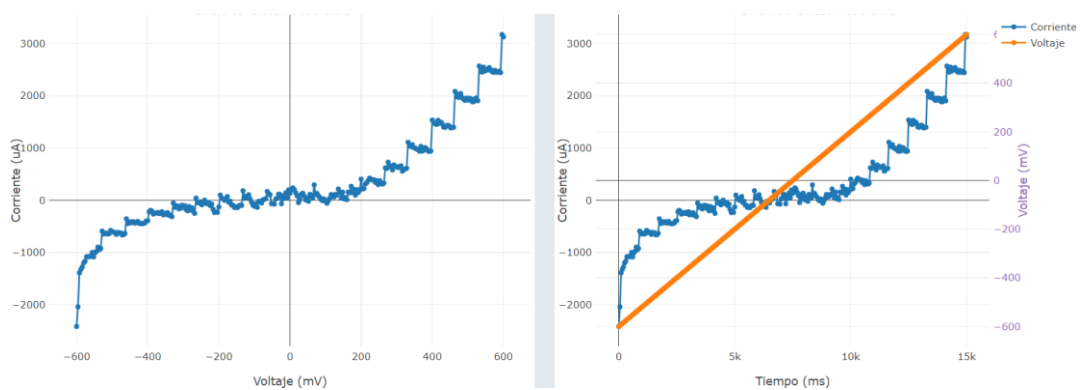


Figura 46. Resultado de la Curva de Corriente - Voltaje

El dispositivo cuenta con la posibilidad de colocar parámetros específicos para cada uno de los métodos de barrido, en la Figura 47 se observa dos botones, uno para reiniciar los parámetros por default, mientras que en botón de enviar es para guardar la nueva configuración, se debe recordar que al guardarse en la memoria volátil del dispositivo esta se reiniciará cada vez que el dispositivo también lo haga, se tiene algunas secciones las cuales son:

General: Se tienen las opciones de la resistencia del amplificador de transimpedancia, con la opción de que el ciclo termine en el potencial del cual inicio, de ahí el punto cero que se refiere al origen, no necesariamente que el valor sea 0 mV.

Voltimetría de Onda Cuadrada: Se puede colocar tanto el voltaje de inicio como el final, además del pulso de amplificación y un voltaje por pasos, este último mientras más bajo demorará en obtener los resultados, pero se verán mucho más claros, mientras que si utiliza pasos largos será mucho más rápido el barrido, pero con menos precisión.

Voltimetría Cíclica: esta sección cuenta con más parámetros, como el número de ciclos, inicio y fin de voltaje, el cual inicia con un valor de 0 mV y termina con un valor de 0 mV, el potencial del electrodo de trabajo Ag/AgCl tiene la configuración entre el voltaje máximo y mínimo del proceso, el voltaje por pasos y la velocidad de escaneo del proceso.

Curva de Corriente – Voltaje: cuenta con voltaje mínimo y máximo, el tiempo de retardo entre cada medición y el número de puntos a tomar, mientras más puntos el resultado demorara más.

Ruido DC: Este es la prueba de corrección de BIAS, aquí toma varios puntos y compara si existe saltos de voltaje considerable en la resistencia del amplificador de Transimpedancia.

Voltimetría de Pulso Normal: Tiene parámetros de voltaje máximo, mínimo, que tan ancho el pulso y amplitud, así como un periodo de lectura y uno de suspenso o silencio entre muestra.

Calibración: Tiempo en ms, para esta prueba se debe desconectar los tres electrodos y poner en corto el electrodo de referencia y el contraelectrodo.

Cronoamperometría: Se tienen parámetros de Voltaje inicial, tiempo de silencio, y dos pasos donde cada uno tiene su potencial y su tiempo determinado, así como muestras por cada paso.

General	Voltametría Cíclica	Curva I-V	Voltametría de Pulso Normal	Chronoamperometría
TIA gain (Ganancia del Amplificador de Transimpedancia) 350 kOhm	# Ciclos 3	Inicio Voltaje (mV) -200	Inicio voltaje (mV) -200	Voltaje Inicial (mV) 50
<input checked="" type="radio"/> 0 al final. <input type="radio"/> No 0 al final.	Inicio Voltaje (mV) 0	Fin Voltaje (mV) 200	Pulso amp. (mV) 20	Tiempo de silencio (ms) 2000
Voltametría de Onda Cuadrada	Fin Voltaje (mV) 0	Tiempo de retardo (ms) 50	Ancho de Pulso (ms) 50	1er Paso de Voltaje (mV) 50
Inicio voltaje (mV) -200	Max. Voltaje (mV) 100	# de Puntos 701	Fin voltaje (mV) 200	1er Paso de Tiempo (mS) 2000
Fin Voltaje (mV) 200	Min. Voltaje (mV) -100	Ruido DC	Periodo de Pulso (ms) 200	2do paso de Voltaje (mV) 50
Pulso ampl. (mV) 20	Voltaje por Pasos (mV) 5	Voltaje de Bias (mV) 100	Tiempo de silencio (ms) 1000	2do Paso de Tiempo (ms) 2000
Voltaje por Pasos (mV) 5	Velocidad de escaneo (mV/s) 100	# de Puntos 100	Calibración	# de Muestras por Paso 100

Figura 47. Sección de configuración del potenciostato

En la siguiente Figura 48 se visualiza una prueba en tiempo real para poder establecer parámetros y ver su comportamiento, por lo general es para hacer análisis y si existen cambios por cada que se genere un cambio, un proceso muy indispensable para conocer si el dispositivo tiene una sensibilidad alta o no.

Figura 48. Sección del panel de control del potenciostato

En la Figura 49 se genera el grafico en tiempo real de alcance va midiendo tanto los valores de corriente como los valores de potencial en tiempo real, por ejemplo, si se colocan o se agregan una solución en una base, se podrá percatar que los valores de

corriente van subiendo según la cantidad que aumenten o reduzcan en el análisis electroquímico.

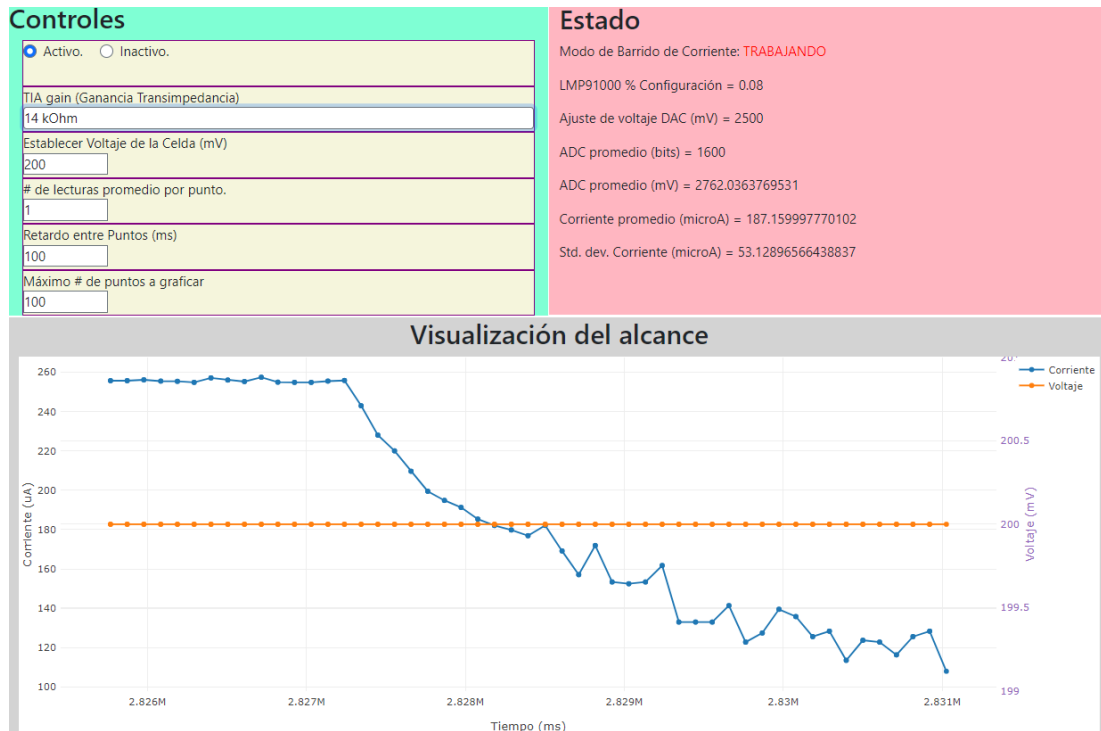


Figura 49. Visualización del alcance en base al control de parámetros.

3.2.7 Resultados de pruebas electroquímicas con electrodo de oro

Se utilizó un electrodo de trabajo oro, un electrodo de referencia de Cloruro de plata (Ag/AgCl) y un contraelectrodo de platino. Los parámetros ingresados para la medición de la voltamperometría se muestran en la Tabla 8 basados en Luminita, 2015, estos también se pueden consultar en la sección de ayuda, siguiendo los enlaces externos para tener aún más detalles, ya que el sistema se basa en un estudio donde utilizan las variables que se obtienen desde el sensor LMP91000, de ahí que también pueda existir limitaciones en ciertos aspectos, como por ejemplo el voltaje máximo de 600 mV como resultado se observa la gráfica de histéresis con un rango de intensidad de corriente (-90, 280) μ A.

Tabla 8. Parámetros de ajuste para la medición de la Voltamperimetría.

N. Ciclos	V Inicial	V Final	Max mV	Min mV	Pasos mV	Vel Muestra
2	0 mV	0 mV	600 mV	-600	1 mV	60 mV

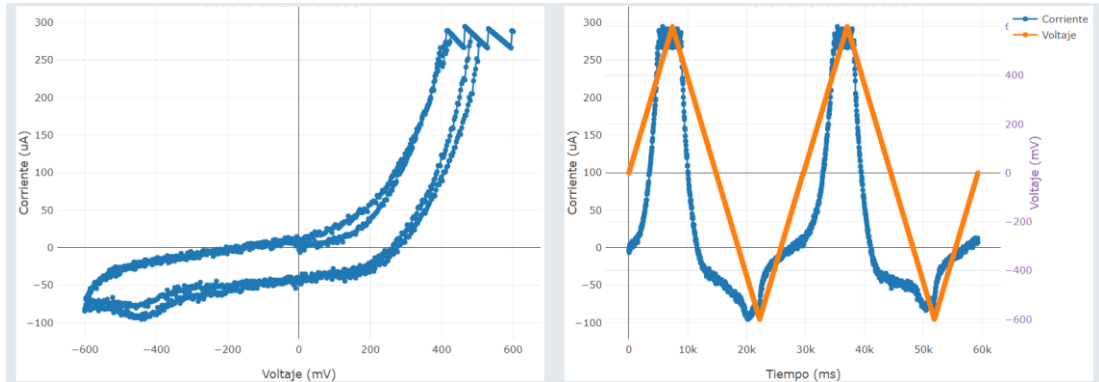


Figura 50. Resultado de la Voltametría Cíclica con electrodo de trabajo de Oro en solución de Ácido ascórbico

En la Figura 51 se visualiza el comportamiento de la Voltametría normal de pulso donde se colocan los parámetros descritos en la Tabla 9, cuyos valores están relacionados con la prueba de Voltametría Cíclica. En este método se caracteriza por pulsos crecientes que se superponen debido a un potencial de corriente continua, no utiliza ciclos, además cuenta con un tiempo de silencio para la medición del escalón entre cada impulso.

Tabla 9. Parámetros para la medición de la Voltamperimetría normal de pulso

Inicio voltaje (mV)	Pulso amp. (mV)	Ancho de Pulso (ms)	Fin voltaje (mV)	Periodo de Pulso (ms)	Tiempo de silencio (ms)
-600	20 mV	50 mV	600 mV	200	1000 mV

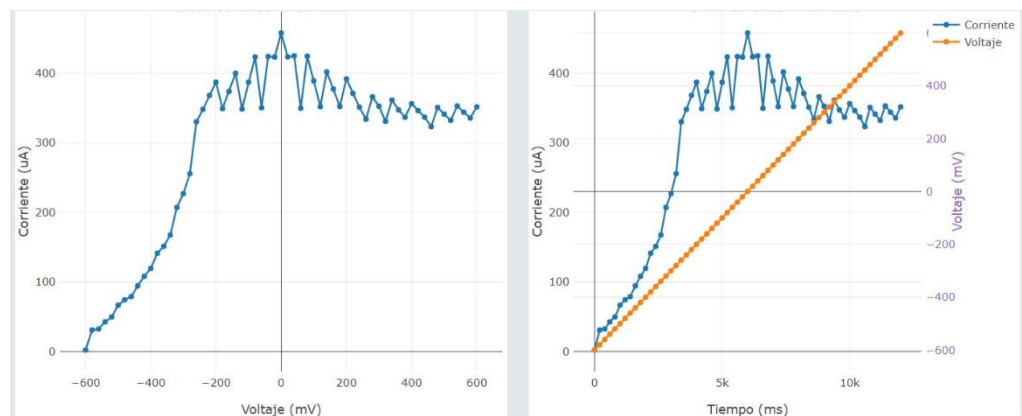


Figura 51. Resultado de la Voltametría normal de pulso con electrodo de trabajo de Oro en solución de Ácido ascórbico

En la Figura 52 se visualiza el comportamiento de la Voltametría de onda Cuadrada donde se colocan los parámetros descritos en la Tabla 10, cuyos valores están relacionados con la prueba de Voltametría Cíclica. En este método se establece pulsaciones hacia adelante y atrás gracias al diferencia del potencial entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo a usa una frecuencia constante.

Tabla 10. Parámetros para la medición de la Voltametría de onda Cuadrada

Inicio (mV)	voltaje	Fin (mV)	Voltaje	Pulso (mV)	ampl.	Voltaje por Pasos	Frecuencia (Hz)
-600		600		20		30	10

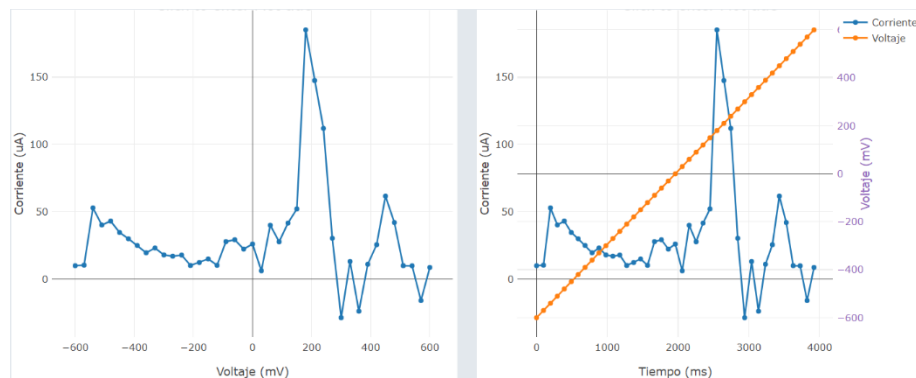


Figura 52. Resultado de la Voltametría de onda Cuadrada con electrodo de trabajo de Oro en solución de Ácido ascórbico

En la Figura 53 se visualiza el comportamiento de la Cronoamperometría donde se colocan los parámetros descritos en la Tabla 11, cuyos valores toman valores de corriente a través de pasos de tiempo. En este método usa tiempos de silencio y hasta un numero de pasos para observar como la corriente satura al electrodo en un determinado tiempo.

Tabla 11. Parámetros de ajuste para la medición de la Voltamperometría

V Inicial	Tiempo de silencio (ms)	1er Paso de Voltaje. (mV)	1er Paso de Tiempo (ms)	2do paso de Voltaje (mV)	2do Paso de Tiempo (ms)	# de Muestras por Paso
50 mV	2000 ms	50 mV	2000 ms	50 mV	2000 ms	100

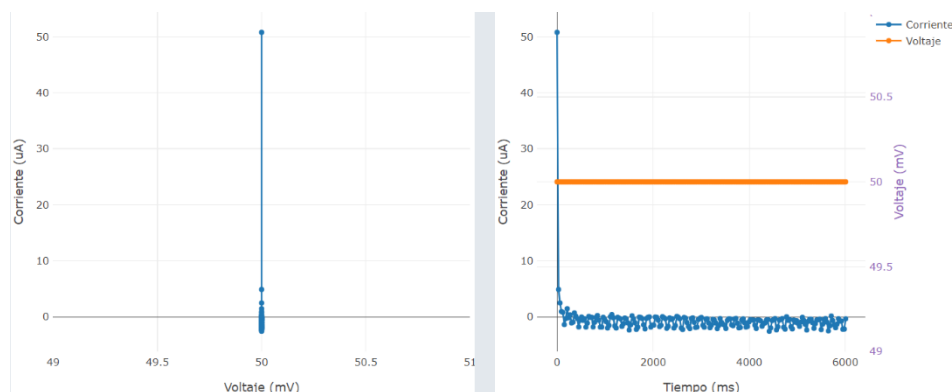


Figura 53. Resultado de la Cronoamperometría con electrodo de trabajo de Oro en solución de Ácido ascórbico

3.2.8 Comparación del resultado

v. *Resultado de la prueba de Voltametría Cíclica en Electrodo de Trabajo de Oro (Au)*

Se trabajó a las mismas condiciones del trabajo de Luminita, 2015, tanto de los electrodos como el electrolito para observar la eficiencia del equipo buscando de esta forma el porcentaje de error con respecto al análisis como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Materiales para las pruebas electroquímicas.

Material propio		Material de Referencia	
Electrodo de Trabajo	Lámina de Oro	Electrodo de Trabajo	Alambre de Oro
Electrodo de Referencia	Cloruro de plata Ag/AgCl (3 mm plata)	Electrodo de Referencia	Cloruro de plata Ag/AgCl (8 mm plata)
Contraelectrodo	Alambre de Platino	Contraelectrodo	Electrodo de platino
Solución	Acido Ascórbico 99% o 0,05 molar	Solución	Acido Ascórbico 99% o 0,05 molar

A mismas condiciones del experimento a replicar basado en el artículo de la autora Luminita, 2015, establece un voltaje mínimo de -600 mV, un voltaje máximo de 500 mV, aplicando una resistencia de Transimpedancia de 35 KΩ, con un total de 100 puntos, a una velocidad de 50 mV/s. El resumen de los resultados se presenta en la Tabla 13 y la tabla completa se muestra en el anexo Tabla 28. La gráfica de comparación de estos puntos se encuentra en la Figura 54.

A continuación se realiza el cálculo del error utilizando la ecuación (5), se considera el cálculo del error porcentual en base al experimento, el valor promedio de los errores arroja un valor del 8% de error con respecto al análisis del artículo, cabe recalcar que los elementos pueden variar en su composición y dimensiones, además del error debido a su construcción y fabricante, aun así es un valor que resulta en un 92% de confiabilidad, suficiente para determinar los distintos comportamientos que sufren los materiales al ser expuesto a análisis electroquímicos.

$$\text{Error Porcentual} = \frac{(V_A - V_E)}{V_E} * 100\% \quad (5)$$

Tabla 13. Tabla resumen de Voltametría Cíclica de 100 puntos con respecto a datos de referencia

Resultado del Potenciostato UTA 2023 VS Potenciostato Artículo de la autora Luminita, 2015.						
Índice	Corriente μA	Voltaje V	Tiempo ms	Corriente (Artículo)	Promedio de Muestras	Error %
0	-40	0,0000	0	-45	-42,5	3%
1	-38	0,0025	16	-46	-42	4%
99	-40	0,0000	1584	-47	-43,5	4%
100	-40	0,0000	1600	-47	-43,5	4%
Promedio del Error Porcentual						8%

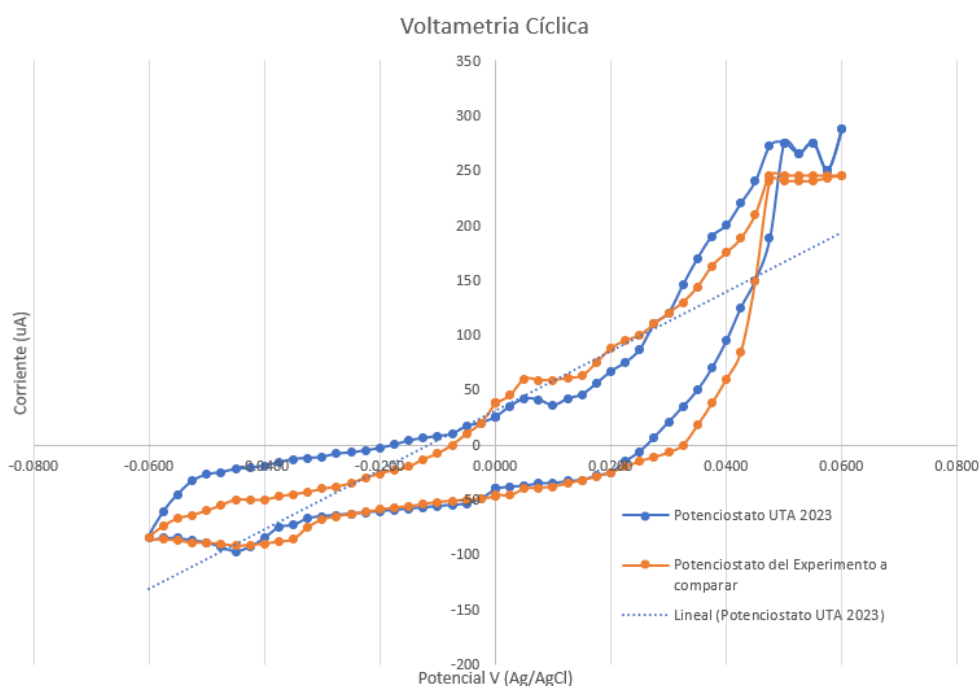


Figura 54. Comparación de resultados entre el potenciostato desarrollado y el de referencia.

La técnica utilizada en este análisis de resultado en electrodo de trabajo de oro (Au) es la Voltametría cíclica comparando el funcionamiento del potenciostato desarrollado en esta investigación con las variables de potencial e intensidad de corriente de la publicación de Luminita, 2015, “Simultaneous Determination of Ascorbic and Uric Acids in Urine Using an Innovative Electrochemical Sensor Based on β -Cyclodextrin” para así comprobar el funcionamiento y exactitud del potenciostato desarrollado.

w. Resultado Electrodo de Quitina

- **Voltametría cíclica.** Se establecen parámetros como se puede ver en la Tabla 14, los cuales cuentan con valores de voltaje para su operación, de igual manera en la Figura 55 se observa que no genera una Voltametría cíclica ya que es un biopolímero y no presenta conductividad.

Tabla 14. Parámetros Voltametría

N. Ciclos	V Inicial	V Final	Max mV	Min mV	Pasos mV	Vel Muestra
3	0 mV	0 mV	600 mV	-600	5 mV	100 mV

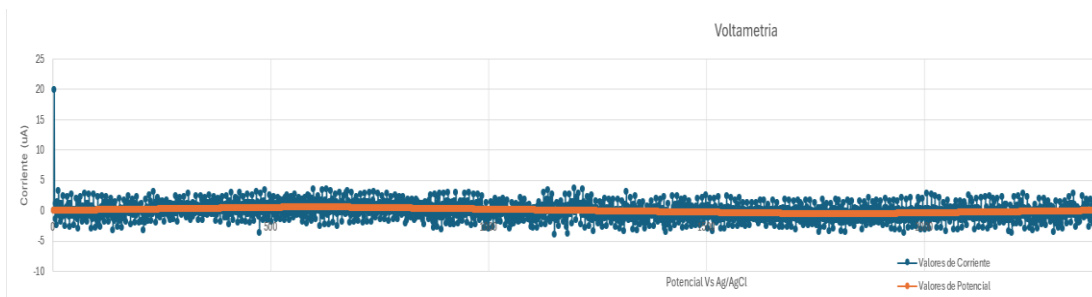


Figura 55. Voltametría cíclica

- **Voltametría Normal de Pulso.** Para los análisis de la Voltametría Normal de Pulso se establece los parámetros de la Tabla 15, y como resultado se obtuvo que la cantidad de corriente es nula tal y como se ve en la Figura 56.

Tabla 15. Parámetros Voltametría Normal de Pulso

Inicio voltaje (mV)	Pulso amp. (mV)	Ancho de Pulso (ms)	Fin voltaje (mV)	Periodo de Pulso (ms)	Tiempo de silencio (ms)
-600 mV	20 mV	50 ms	600 mV	200 mV	1000 ms

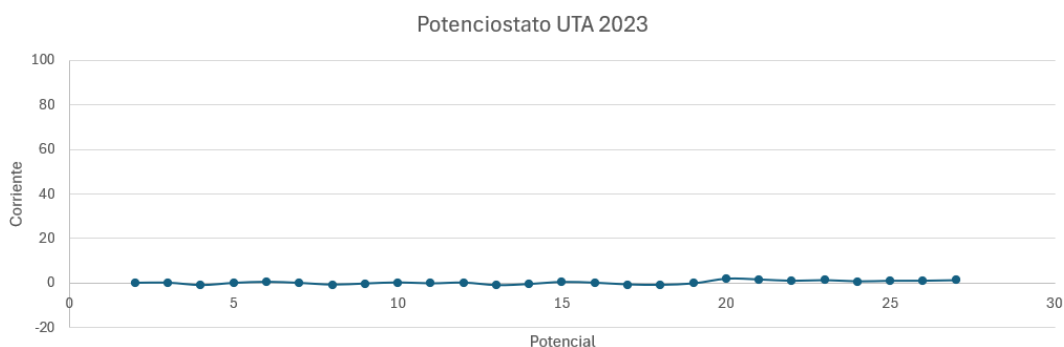


Figura 56. Voltametría Normal de Pulso.

- **Voltametría de Onda Cuadrada.** Para los análisis de la Voltametría de Onda Cuadrada se establece los parámetros de la Tabla 16, y como resultado se obtuvo que la cantidad de corriente es nula tal y como se ve en la Figura 57.

Tabla 16. Parámetros Voltametría de Onda Cuadrada

V Inicial	V Final	Pulso amplitud mV	Voltaje por Pasos (mV)	Frecuencia (Hz)
-600 mV	600 mV	50 mV	5 mV	10

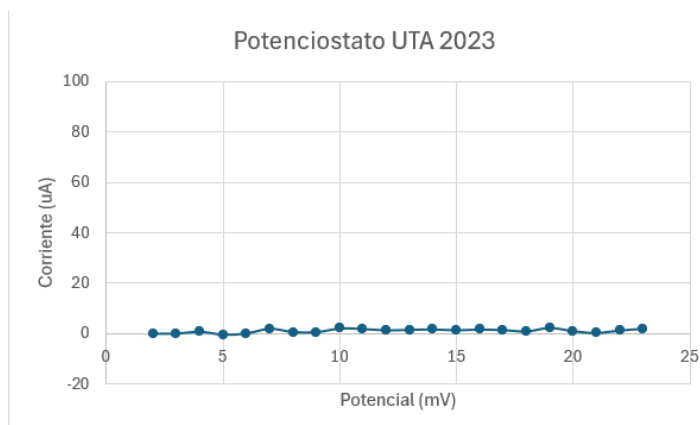


Figura 57. Voltametría de Onda Cuadrada

- **Cronoamperometría.** Para los análisis de la Voltametría de Onda Cuadrada se establece los parámetros de la Tabla 17, y como resultado se obtuvo que la cantidad de corriente es nula tal y como se ve en la Figura 58.

Tabla 17. Parámetros Cronoamperometría.

V Inicial	Tiempo de silencio (ms)	1er Paso de Voltaje. (mV)	1er Paso de Tiempo (ms)	2do paso de Voltaje (mV)	2do Paso de Tiempo (ms)	# de Muestras por Paso
50 mV	2000 ms	50 mV	2000 ms	50 mV	2000 ms	100

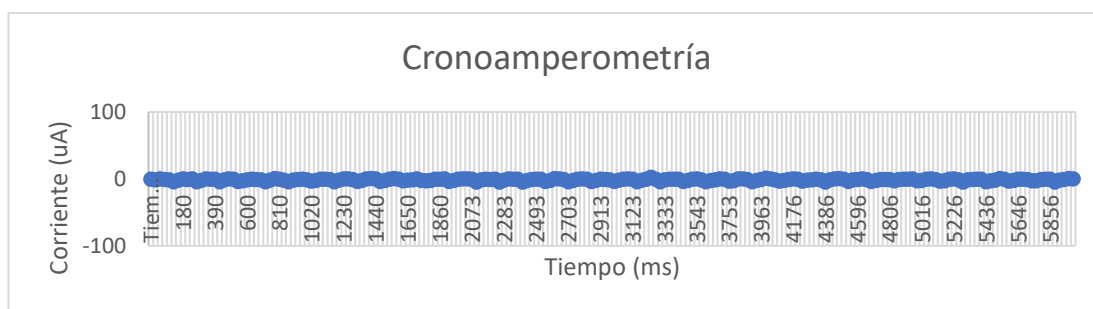


Figura 58. Cronoamperometría

x. Resultado Electrodo de Quitina mezclado con ácidos

- **Voltametría cíclica.** Se establecen parámetros como se puede ver en la Tabla 18, los cuales cuentan con valores de voltaje para su operación, de igual manera en la Figura 59 se observa que no genera una Voltametría cíclica ya que es un biopolímero y no presenta conductividad.

Tabla 18. Parámetros Voltametría

N. Ciclos	V Inicial	V Final	Max mV	Min mV	Pasos mV	Vel Muestra
3	0 mV	0 mV	600 mV	-600	5 mV	100 mV

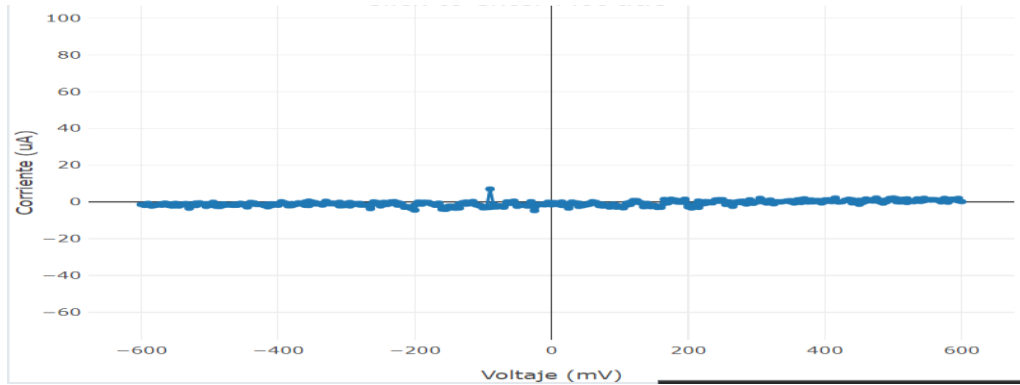


Figura 59. Voltametría cíclica

- **Voltametría Normal de Pulso.** Para los análisis de la Voltametría Normal de Pulso se establece los parámetros de la Tabla 19, y como resultado se obtuvo que la cantidad de corriente es nula tal y como se ve en la Figura 60.

Tabla 19. Parámetros Voltametría Normal de Pulso

Inicio voltaje (mV)	Pulso amp. (mV)	Ancho de Pulso (ms)	Fin voltaje (mV)	Periodo de Pulso (ms)	Tiempo de silencio (ms)
-600 mV	20 mV	50 ms	600 mV	200 mV	1000 ms

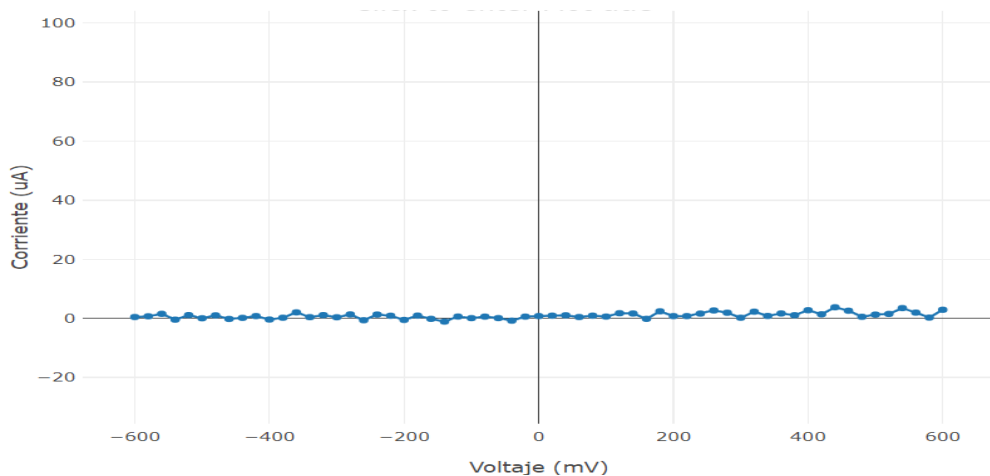


Figura 60. Voltametría Normal de Pulso.

- **Voltametría de Onda Cuadrada.** Para los análisis de la Voltametría de Onda Cuadrada se establece los parámetros de la Tabla 20, y como resultado se obtuvo que la cantidad de corriente es nula tal y como se ve en la Figura 61.

Tabla 20. Parámetros Voltametría de Onda Cuadrada

V Inicial	V Final	Pulso amplitud mV	Voltaje por Pasos (mV)	Frecuencia (Hz)
-600 mV	600 mV	50 mV	5 mV	10

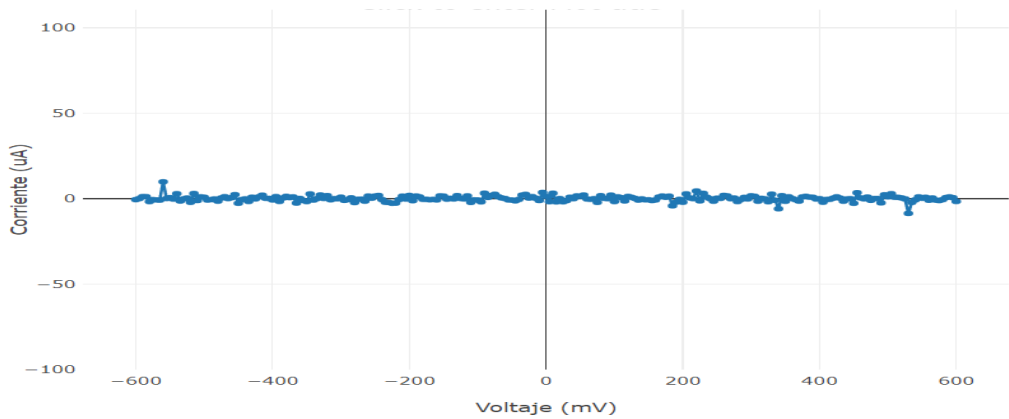


Figura 61. Voltametría de Onda Cuadrada.

- **Cronoamperometría.** Para los análisis de la Voltametría de Onda Cuadrada se establece los parámetros de la Tabla 21, y como resultado se obtuvo que la cantidad de corriente es nula tal y como se ve en la Figura 62.

Tabla 21. Parámetros Cronoamperometría.

V Inicial	Tiempo de silencio (ms)	1er Paso de Voltaje. (mV)	1er Paso de Tiempo (ms)	2do paso de Voltaje (mV)	2do Paso de Tiempo (ms)	# de Muestras por Paso
50 mV	2000 ms	50 mV	2000 ms	50 mV	2000 ms	100

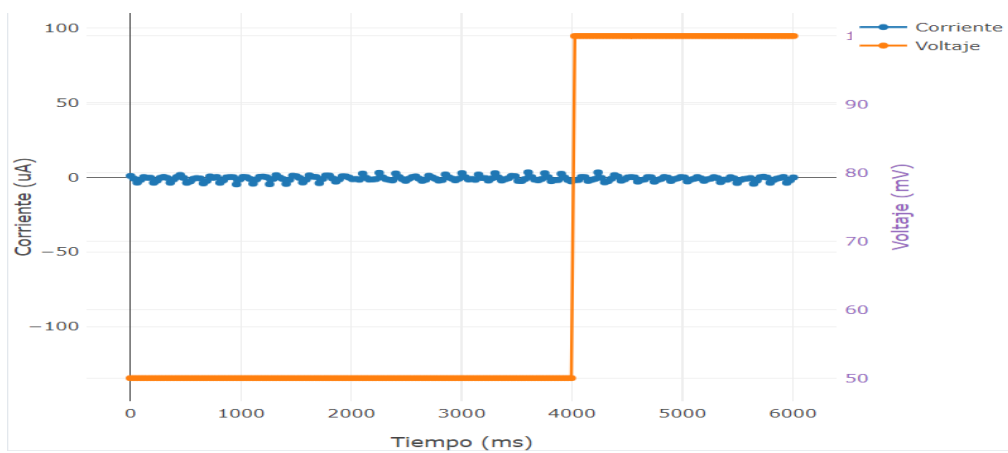


Figura 62. Cronoamperometría

y. **Resultado del Electrodo Quitina/GO**

- **Voltametría cíclica.** Se establecen parámetros como se puede ver en la Tabla 22, los cuales cuentan con valores de voltaje para su operación, de igual manera en la Figura 63 se observa que si se genera una Voltametría cíclica ya que es un material conductor.

Tabla 22. Parámetros Voltametría

N. Ciclos	V Inicial	V Final	Max mV	Min mV	Pasos mV	Vel Muestra
3	0 mV	0 mV	600 mV	-600	5 mV	100 mV

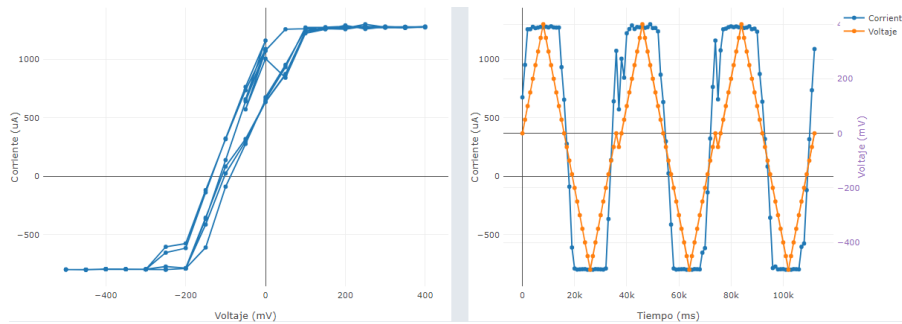


Figura 63. Voltametría cíclica

- **Voltametría Normal de Pulso.** Para los análisis de la Voltametría Normal de Pulso se establece los parámetros de la Tabla 23, y como resultado se obtuvo que la cantidad de corriente es nula tal y como se ve en la Figura 64.

Tabla 23. Parámetros Voltametría Normal de Pulso

Inicio voltaje (mV)	Pulso amp. (mV)	Ancho de Pulso (ms)	Fin voltaje (mV)	Periodo de Pulso (ms)	Tiempo de silencio (ms)
-200 mV	20 mV	50 ms	200 mV	200 mV	1000 ms

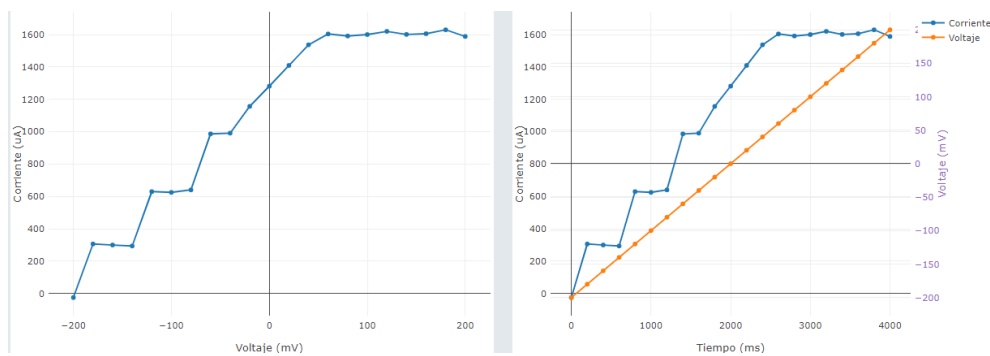


Figura 64. Voltametría Normal de Pulso.

- **Voltametría de Onda Cuadrada.** Para los análisis de la Voltametría de Onda Cuadrada se establece los parámetros de la Tabla 24, y como resultado se obtuvo que la cantidad de corriente es nula tal y como se ve en la Figura 65.

Tabla 24. Parámetros Voltametría de Onda Cuadrada

V Inicial	V Final	Pulso amplitud mV	Voltaje por Pasos (mV)	Frecuencia (Hz)
-200 mV	200 mV	50 mV	5 mV	10

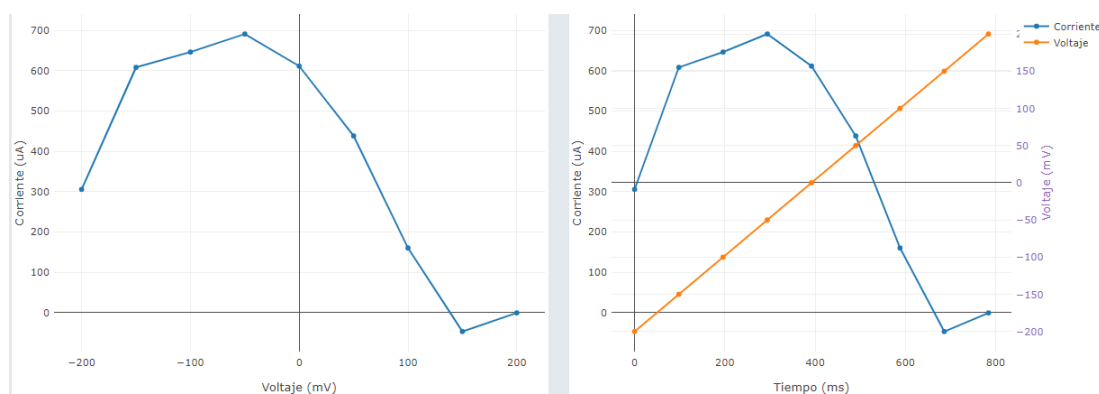


Figura 65. Voltametría de Onda Cuadrada.

- **Cronoamperometría.** Para los análisis de la Voltametría de Onda Cuadrada se establece los parámetros de la Tabla 25, y como resultado se obtuvo que la cantidad de corriente toma valores de corriente de hasta 960 μA , indicando que es un buen conductor eléctrico y como se ve en la Figura 66.

Tabla 25. Parámetros Cronoamperometría.

V Inicial	Tiempo de silencio (ms)	1er Paso de Voltaje. (mV)	1er Paso de Tiempo (ms)	2do paso de Voltaje (mV)	2do Paso de Tiempo (ms)	# de Muestras por Paso
50 mV	2000 ms	50 mV	2000 ms	50 mV	2000 ms	100

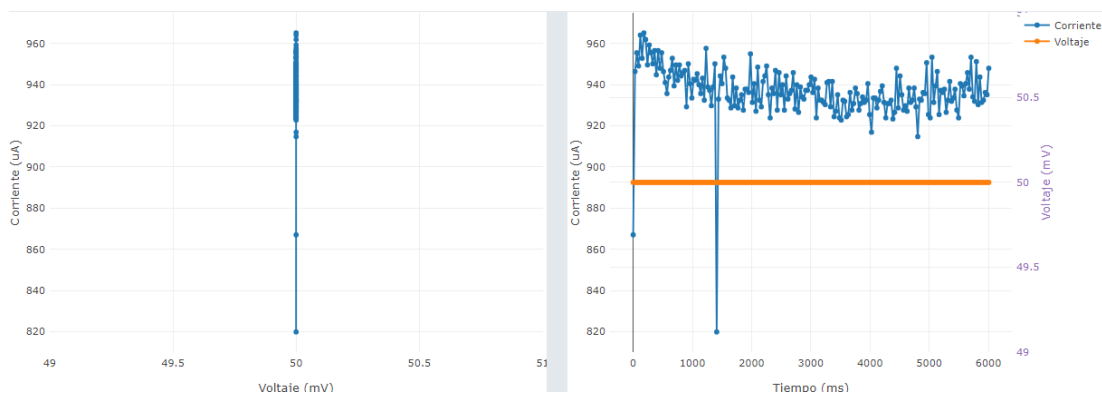


Figura 66. Cronoamperometría.

3.2.9 Presupuesto

Para el desarrollo del potenciostato, se consideran los componentes electrónicos de más fácil acceso, pero de la mejor calidad y se detallan a continuación en la Tabla 26.

Tabla 26. Presupuesto del desarrollo del potenciostato

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO \$	TOTAL \$
1	LMP91000EVM	1	99	99
2	Chips LMP91000	3	5	15
3	Módulo ADC	1	12	12
4	Módulo NFC	1	15	15
5	Módulo ESP32	1	15	15
6	Pantalla Oled	1	20	20
7	Otros materiales	1 kit	40	40
8	Corte Laser	1	20	20
Subtotal				236
IVA (12%)				28,32
TOTAL				264,32

Para realizar las pruebas electroquímicas, se requieren de los electrodos y de la solución, los compuestos para crear el electrodo de quitina/GO fueron provistos, se detallan a continuación lo demás en la Tabla 27.

Tabla 27. Presupuesto de los electrodos

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO \$	TOTAL \$
1	Contraelectrodo Platino	1	130	130
2	Electrodo de Cloruro de plata	1	35	35
3	Electrodo de Quitina/GO	-	-	-
4	Ácido Ascórbico	1oz	2	2
5	Insumos extra		10	10
Subtotal				175
IVA (12%)				21
TOTAL				196

Costos de diseño. Para calcular un valor aproximado del potenciómetro, se parte del tiempo que se ha requerido para su diseño, se toma en cuenta el valor referencial a un salario básico unificado en Ecuador, estipulado en \$460,00, mediante acuerdo Ministerial No MDT-2023-175 del 17 de diciembre de 2023; también se toma en cuenta el salario de un Ingeniero en Telecomunicaciones y se lo estima según seguimiento a graduados FISEI 2021 en \$500,00. Con estos datos actuales, el tiempo de trabajo en horas y 8 horas laborables en 23 días por mes, se tiene la ecuación (6).

$$\begin{aligned} \text{Salario}_{\text{hora}} & \qquad \qquad \qquad (6) \\ & = \frac{\text{Salario}_{\text{mensual}}}{\text{Días}_{\text{Laborables}} * \text{Horas}_{\text{Laborables}}} \end{aligned}$$

$$\text{Salario}_{\text{hora}} = \frac{500}{23 * 8}$$

$$\text{Salario}_{\text{hora}} = \$2,72$$

Se desarrolló todo el sistema desde armado del dispositivo, programación, interfaz en un tiempo de 720 horas obteniendo lo siguiente:

$$\text{Diseño} = 720 * 2,72 = 1958,4\$$$

Costo total del proyecto en materiales:

$$\text{Costo total materiales} = 264,32 + 196 = 460,32\$$$

Costo total del proyecto con mano de obra:

$$\text{Costo total proyecto} = 460,32 + 1958,4 = 2418,72\$$$

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El uso de materiales idóneos permite contar con una mejor precisión de cálculo, el sensor ADC1115 que permite tener 16 bits de resolución de una señal, brinda una medición de hasta microamperios μA , existen alternativas que pueden aumentar hasta los 24 bits, llegando a mediciones de hasta los pico amperios, pero carecen de velocidad de procesamiento; los 8Hz hasta 860Hz son suficientes para realizar las pruebas, el DAC con el que cuenta la ESP32 ha evolucionado en sus últimas versiones permitiendo una conversión con una precisión de 12 bits a una frecuencia máxima de 1,8 KHz.
- En la Voltametría cíclica se obtuvo una eficiencia del 92% en relación de potencial eléctrico con respecto a la corriente medida en el equipo construido mediante la tecnología NFC con relación al equipo de Luminita, 2015, indicado por la literatura, existiendo un margen de error pequeño en el circuito del potenciostato construido, además se realizaron otras pruebas electroquímicas como son: Voltametría normal de pulso, Voltametría de onda cuadrada y Cronoamperometría.
- La fabricación del electrodo de Quitina/GO permitió analizar su comportamiento en los cuatro tipos de pruebas, determinando su eficiencia, potencial e intensidad de corriente, la Voltametría cíclica en el electrodo muestra que se tiene un valor de corriente de 1335 μA a un potencial de 100 mV, concluyendo que en poco potencial eléctrico se alcanza la saturación del electrodo e indicando que es un buen conductor eléctrico. En la Voltametría normal de pulso la corriente es el resultado de una serie de pulsos de potencial cada vez más grandes se compara con la corriente a un voltaje de "línea de base" constante con un voltaje inicial desde -200 hasta 200 mV alcanzando hasta una corriente de 1600 μA . En el proceso de Voltametría de onda cuadrada la corriente resultante va desde en el electrodo de trabajo depende del potencial entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo pulsa hacia adelante máxima

de 697 μA y hacia atrás con una corriente mínima de -54 μA a una frecuencia constante de 10 Hz. Y un resultado de Cronoamperometría donde en menos de 100 ms se satura con una corriente variante entre 910 μA a 968 μA .

- Se diseñó una interfaz intuitiva con todas las opciones necesarias para un fácil manejo de la misma, permitiendo ejecutar los cuatro métodos electroquímicos como lo son Voltametría Cíclica, Voltametría normal de pulso, Voltametría de onda cuadrada y Cronoamperometría; test de corrección de ruido de BIAS, calibración y depuración en consola, además de un sistema automático de descarga de los datos sin procesar en un archivo con formato .csv para su respectivo análisis electroquímico, también cuenta con un apartado de ayuda donde se encuentra material bibliográfico de referencia y los valores máximos y mínimos para los parámetros configurables para las pruebas electroquímicas como TIA gain (Ganancia del Amplificador de Transimpedancia) [$\text{k}\Omega$], el número de ciclos [mV], voltaje inicial y final [mV], voltaje máximo [mV], voltaje mínimo [mV], voltaje por pasos [mV], velocidad de escaneo [mV/s], tiempo de retardo [ms], número de puntos, pulso amplificado [mV], ancho de pulso [ms], fin voltaje [mV], período de pulso [ms], tiempo de silencio [ms], 1er y 2do paso de voltaje [mV], 1er y 2do paso de tiempo [ms], número de muestras por paso; con modificación del sistema de credenciales para la comunicación inalámbrica y por último un panel que cuenta un proceso en tiempo real para el monitoreo y verificar que el equipo tenga respuesta con respecto a los electrodos.

4.2 Recomendaciones

- Hacer una prueba de corrección de BIAS y una de Calibración cada que se va a desarrollar uno de los métodos electroquímicos, ya que permite bajar el ruido que genera el dispositivo, así también con el test ver si no existen interferencias físicas, como que por ejemplo no esté haciendo buen contacto los distintos electrodos, ya que en los test de podría observar un resultado fuera del común, o que indique ausencia de los mismos.

- El análisis en la voltamperimetría cíclica, por lo general el propio desarrollador Texas Instrument recomiendan utilizar el valor de resistencia del TIA en $35\text{K}\Omega$, ya que su valor de corriente tendrá un mejor rango de visualización, teniendo en cuenta que a mayor resistencia el valor de la corriente se reducirá, de ahí que en ese valor mencionado de la resistencia obtendrá un resultado de aproximadamente $200\ \mu\text{A}$, mientras que si se escogiese el valor de $350\text{K}\Omega$ se obtendría valores de hasta $80\ \mu\text{A}$.
- Al momento de realizar las pruebas, por procesos de oxidación y reducción la solución puede verse afectada, por lo que cada vez que se vayan a realizar nuevas pruebas, se debe realizar una nueva solución o sino los resultados de las pruebas electroquímicas se verán afectados con ruidos indeseado.
- Es indispensable considerar el dispositivo como un prototipo que se ha validado mediante análisis generales, cuyos resultados son consistentes con los reportados en la literatura científica. Para demostrar la fiabilidad del dispositivo, se recomienda utilizar electrodos más estandarizados, como un electrodo de trabajo de oro (Au), un contraelectrodo de platino (Pt), un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) y una solución de ácido ascórbico para el proceso redox.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. Corrtest, «Professional Manufacturer of Potentiostat Instrument in China,» Wuhan Corrtest Instrument Corp., Ltd, [En línea]. Available: <https://www.corrtestinstruments.com/en/service1.html>. [Último acceso: 02 Noviembre 2023].
- [2] «Biomaterials Market Size and Share Analysis by Type, Application - Global Industry Revenue Estimation and Demand Forecast to 2030,» PRESCIENT & STRATEGIC INTELLIGENCE, [En línea]. Available: <https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/biomaterials-market>. [Último acceso: 02 Noviembre 2023].
- [3] M. Quince , «Global Electrochemical Instruments Market - Market Size & Forecasting to 2030,» Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5447933/global-electrochemical-instruments-market>. [Último acceso: 02 Noviembre 2023].
- [4] «Global Potentiostat Market 2024-2028,» 19 Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://www.giiresearch.com/report/infi1373491-global-potentiostat-market.html>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [5] «Global Potentiostat Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2023 - 2028),» [En línea]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-potentiostat-market>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [6] F. Han, «Tissue Engineering and Regenerative Medicine: Achievements, Future, and Sustainability in Asia,» 24 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2020.00083/full>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [7] «Tissue Engineering and Regenerative Medicine,» [En línea]. Available: <https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/tissue-engineering-and-regenerative-medicine>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [8] J. Lv, «Chitin and chitin-based biomaterials: A review of advances in processing and food applications.,» 22 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://europepmc.org/article/MED/36876773>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [9] I.-H. Cho, «Electrochemical biosensors: perspective on functional nanomaterials for on-site analysis,» 04 Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://biomaterialsres.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40824-019-0181-y>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [10] «Bionanomaterial-based electrochemical biosensing platforms for biomedical applications,» [En línea]. Available: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ay/d0ay00171f>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [11] E. Randviir, «A review of electrochemical impedance spectroscopy for bioanalytical sensors,» [En línea]. Available:

- <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/ay/d2ay00970f>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [12] S. Verbridge, «Tissue Engineering & Regenerative Medicine Research Program,» [En línea]. Available: <https://www.nidcr.nih.gov/grants-funding/grant-programs/tissue-engineering-regenerative-medicine>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [13] D. Uday, «Applications of Chitin in Medical, Environmental, and Agricultural Industries,» 25 Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2077-1312/9/11/1173>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [14] P. Baharlouei, «Chitin and Chitosan: Prospective Biomedical Applications in Drug Delivery, Cancer Treatment, and Wound Healing,» 17 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/1660-3397/20/7/460>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [15] A. Villa , «MODIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE QUITINA MEDIANTE MÉTODOS FÍSICOS Y QUÍMICOS PARA SU HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA MEDIANTE QUITINASAS DE *Lecanicillium lecanii*,» 23 Enero 2015. [En línea]. Available: <https://bindani.izt.uam.mx/concern/tesiuams/qf85nb438>. [Último acceso: 23 Noviembre 2023].
- [16] C. Chang, «Novel hydrogels prepared via direct dissolution of chitin at low temperature: structure and biocompatibility,» 2011. [En línea]. Available: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/jm/c0jm03075a>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [17] V. Bali, «Potentiostats Market Report 2023 (Global Edition),» 01 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://www.cognitivemarketresearch.com/potentiostats-market-report>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [18] C. Pelc, «Quitina, ¿qué es y cómo beneficia a la salud?,» MedicalNewsToday, 16 Septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.clikisalud.net/salud-general-quitina-que-es-como-beneficia-salud/>. [Último acceso: Octubre 2023].
- [19] K. Chica , «Diseño y construcción de un prototipo de potenciostato portátil que permita medir el nivel de oxidación del hierro.,» 2022. [En línea]. Available: <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/56140>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [20] S. Chia-Hung Lee y P. Burke, «NanoStat: An open source, fully wireless potentiostat,» 2022. [En línea]. Available: <https://shorturl.at/prQ05>. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [21] M. Amayreh y W. Hourani, «Voltammetric Determination of Ascorbic Acid in Pharmaceutical Formulations Using Modified Iodine-Coated Platinum Electrode,» UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, 01 Julio 2021. [En línea]. Available: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/vitae/article/view/346228>. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [22] R. Ikram, «Recent Advances in Chitin and Chitosan/Graphene-Based Bio-Nanocomposites for Energetic Applications,» 25 Septiembre 2021. [En línea].

- Available: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/19/3266>. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [23] A. Romero, «Estado del arte: Quitosano, un biomaterial versátil. Estado del Arte desde su obtención a sus múltiples aplicaciones,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70764230002>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [24] X. Li y H. Cheng, «Facile Construction of Chitin/Graphene Nanocomposite Sponges for Efficient Hemostasis,» 2020. [En línea]. Available: <https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acssuschemeng.0c04721>. [Último acceso: 30 Noviembre 2023].
- [25] F. Luminata, «Simultaneous Determination of Ascorbic and Uric Acids in Urine Using an Innovative Electrochemical Sensor Based on β -Cyclodextrin,» Enero 2015. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/266137706_Simultaneous_Determination_of_Ascorbic_and_Uric_Acids_in_Urine_Using_an_Innovative_Electrochemical_Sensor_Based_on_b-Cyclodextrin. [Último acceso: Diciembre 2023].
- [26] F. Zinola, ELECTROQUÍMICA FUNDAMENTAL Y APLICACIONES, Montevideo: DIRAC, 2007.
- [27] R. Fernández , Fundamentos de teoría electroquímica, València: Editorial Universitat Politècnica de València, 2020.
- [28] L. Sanz, Desarrollo y Aplicación de Nuevos Electrolitos de Cloruro de Cobre en Baterías de Flujo Redox, 2014.
- [29] «Voltametría,» [En línea]. Available: https://ocw.uca.es/pluginfile.php/2202/mod_resource/content/1/Leccion%2015%20Principios%20de%20Voltametría.pdf. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [30] «Curvas de Tafel o Curvas de Polarización.,» [En línea]. Available: <https://idoc.pub/documents/curvas-de-tafel-o-curvas-de-polarizacion-qn85qqmryn1>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [31] «CORROSIÓN,» [En línea]. Available: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8229/1/CorrTema3.pdf>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [32] R. Ortíz, «TÉCNICAS ELECTROANALÍTICAS VOLTAMPEROMETRÍA,» 2006. [En línea]. Available: http://webdelprofesor.ula.ve/ciencias/rmhr/Index_archivos/GuiAIV2.pdf. [Último acceso: 23 Noviembre 2023].
- [33] V. Vetere, «Reacciones de oxidación-reducción,» [En línea]. Available: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/150016/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [34] K. Scott, «Chapter 1: Introduction to Electrolysis, Electrolysers and Hydrogen Production,» 25 Noviembre 2019. [En línea]. Available:

- <https://books.rsc.org/books/edited-volume/789/chapter/525233/Introduction-to-Electrolysis-Electrolysers-and>. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [35] . L. González, «Diseño y Montaje de un Potenciostato/Galvanostato basado en Convertidor DC/DC,» Junio 2015. [En línea]. Available: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23199/TFG_Luis_Javier_Gonzalez-Calero_Rey_2015.pdf. [Último acceso: 03 Noviembre 2023].
- [36] «Corriente eléctrica,» [En línea]. Available: <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-2/pages/9-1-corriente-electrica>. [Último acceso: 04 Noviembre 2023].
- [37] «Parámetros del potenciostato explicados,» 31 Enero 2022. [En línea]. Available: <https://instrumentosdemedida.es/parametros-del-potenciostato-explicados/>. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [38] D. Askeland, *Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Santa Fe: Cengage Learning, 2017.
- [39] J. Shackelford, *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*, Pearson Educación S.A, 2010.
- [40] D. Hull, *Materiales compuestos*, Barcelona: Reverté S.A., 1987 .
- [41] J. Silva, *Materiales y nanomateriales. Principios, aplicaciones y técnicas de caracterización*, Riobamba: ESPOCH, 2022.
- [42] «Materiales y materias primas Nanomateriales,» [En línea]. Available: <https://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/nanomateriales.pdf>. [Último acceso: 04 Noviembre 2023].
- [43] R. Seymour, *Introducción a la química de los polímeros*, Barcelona: Reverté S.A., 2021.
- [44] P. González, «Biomateriales: Diseño, producción y caracterización,» 2015. [En línea]. Available: <http://rgbiomat.webs.uvigo.gal/wp-content/uploads/2015/09/Biomateriales.pdf>. [Último acceso: 05 Noviembre 2023].
- [45] . P. Mira, «Quitina,» 04 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.elgencurioso.com/diccionario/quitina/>. [Último acceso: 30 Noviembre 2023].
- [46] B. Alberts y . A. Johnson, *Biología molecular de la célula*, Barcelona: Omega, 2004.
- [47] Y. Torres, «Síntesis y caracterización de quitina a partir de exoesqueletos de camarón para su uso como material de refuerzo,» [En línea]. Available: http://eprints.uanl.mx/10565/1/66_sintesis_y_caracterizacion.pdf. [Último acceso: 06 Noviembre 2023].
- [48] B. Salas, «ÓXIDO DE GRAFENO: SÍNTESIS, PROPIEDADES Y APLICACIONES,» 10 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.php/ciencia/771-cyt-numero-67/1545-oxido-de-grafeno-sintesis-propiedades-y-aplicaciones>. [Último acceso: 30 Noviembre 2023].

- [49] F. Aguirre, «Síntesis y caracterización de capas conductoras de Oxido de grafeno (GO): propiedades vibracionales bajo condiciones extremas de presión y temperatura,» Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7850/Francisco%20Aguirre%20Yague.pdf?sequence=1>. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [50] ELECTROQUÍMICA FUNDAMENTAL Y APLICACIONES, Montevideo: Edición DIRAC, 2007.
- [51] J. Ávila y J. Genescá, «Más allá de la herrumbre,» 2002. [En línea]. Available: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_5.htm. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [52] «¿Por qué utilizar láminas de platino para la electrónica de alta tecnología?,» XRF SCIENTIFIC, [En línea]. Available: <https://es.xrfscientific.com/por-que-utilizar-laminas-de-platino-para-la-electronica-de-alta-tecnologia/>. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [53] «Energy-dispersive X-ray spectroscopy,» [En línea]. Available: <https://www.thermofisher.com/ec/en/home/materials-science/eds-technology.html>. [Último acceso: 08 Noviembre 2023].
- [54] «Thermo Scientific FTIR spectrometer and microscope resources,» [En línea]. Available: <https://www.thermofisher.com/ec/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/molecular-spectroscopy/fourier-transform-infrared-spectroscopy/resources/ftir-spectroscopy-academy.html>. [Último acceso: 08 Noviembre 2023].
- [55] H. Saputra, «Electrochemical sensors: basic principles, engineering, and state of the art,» 11 Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00706-023-03113-z>. [Último acceso: 25 Noviembre 2023].
- [56] Diciembre 2014. [En línea]. Available: <https://acortar.link/0L9Rpe>. [Último acceso: 25 Noviembre 2023].
- [57] «LMP91000 Micro-Power Chemical & Gas Sensor AFE Overview,» 02 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.ti.com/es-mx/video/3870860141001>. [Último acceso: 25 Noviembre 2023].
- [58] M. Edenhauser, «Node-RED: IoT Projects With ESP32, MQTT And Docker,» Noviembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.tutorialspoint.com/node-red-iot-projects-with-esp32-mqtt-and-docker/index.asp>. [Último acceso: 25 Noviembre 2023].
- [59] «Node-RED: IoT projects with ESP32, MQTT and Docker,» Abril 2023. [En línea]. Available: <https://www.udemy.com/course/node-red-iot-projects-with-esp32/>. [Último acceso: 25 Noviembre 2023].
- [60] «Node-RED and ESP32 Project,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.udemy.com/course/nodered-esp32/>. [Último acceso: 25 Noviembre 2023].

- [61] INTECO, «La tecnología NFC: Aplicaciones y gestión de seguridad,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/122547423/La-tecnologia-NFC-aplicaciones-y-gestion-de-seguridad>. [Último acceso: 06 Noviembre 2023].
- [62] «N532 NFC RFID Module — A Quick Introduction,» 24 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.electroschematics.com/nfc-rfid-module-pn532/>. [Último acceso: 25 Noviembre 2023].
- [63] «Introducing PN532 NFC RFID with Arduino Guide,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/12/09/introducing-pn532-nfc-rfid-with-arduino-guide/>. [Último acceso: 25 Noviembre 2023].

ANEXOS

En la Figura A37 se muestra las características del potencioestado comercial CS150.

 **Wuhan Corrtest Instruments Corp., Ltd**
Email: sales2@corrtest.com.cn, Mob./whatsapp: +86 13469965984
Website: www.corrtest.com.cn/en

CS150 Potentiostat/Galvanostat contains a fastdigital function generator, high-speed data acquisition circuitry, a potentiostat and a galvanostat. With high performance in stability and accuracy with advanced hardware and well-functioned software, it is a comprehensive research platform for corrosion, batteries, electrochemical analysis, sensor, life science and environmental chemistry etc. Model CS150 is a cost-effective and basic model for you. With basic methods such as potentiostatic (I-T), CV, LSV, Potentiodynamic(Tafel plot), GCD, it's suitable for various applications such as pitting corrosion measurement of surgical implants of medicine field, the carbon dioxide reduction, the electro-catalysis, battery charge and discharge tests, etc.



Applications

- Reaction mechanism of Electrosynthesis, electrodeposition (electroplating), anodic oxidation
- Electrochemical analysis and sensor;
- Corrosion study of metals in water, concrete and soil etc;
- Fast evaluation of corrosion inhibitor, water stabilizer, coating and cathodic protection efficiency.
- New energy materials (Li-ion battery, solar cell, fuel cell, supercapacitors), advanced functional materials, photoelectronic materials

Standard supply list for potentiostat Model CS150

Instrument host CS150-1
C5 studio software(Testing & data analysis)*1
Power cable*1
USB cable *1
Electrode cable *2
Dummy cell*1
**If you need electrodes and cells, please kindly contact us for purchase.

Service

1. Warranty period: 5 years
2. Provide installation guidance and manual, software installation video.

Figura A1. Hoja de datos del Potencioestado CS150

En la Figura A2 se muestra en la hoja de datos del LMP91000EVM las normativas de cumplimiento como la normativa FCC parte 15 y la Canadian ICES-003.

For EVMs annotated as FCC – FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION Part 15 Compliant

Caution

This device complies with part 15 of the FCC Rules. Operation is subject to the following two conditions: (1) This device may not cause harmful interference, and (2) this device must accept any interference received, including interference that may cause undesired operation.

Changes or modifications not expressly approved by the party responsible for compliance could void the user's authority to operate the equipment.

FCC Interference Statement for Class A EVM devices

This equipment has been tested and found to comply with the limits for a Class A digital device, pursuant to part 15 of the FCC Rules. These limits are designed to provide reasonable protection against harmful interference when the equipment is operated in a commercial environment. This equipment generates, uses, and can radiate radio frequency energy and, if not installed and used in accordance with the instruction manual, may cause harmful interference to radio communications. Operation of this equipment in a residential area is likely to cause harmful interference in which case the user will be required to correct the interference at his own expense.

FCC Interference Statement for Class B EVM devices

This equipment has been tested and found to comply with the limits for a Class B digital device, pursuant to part 15 of the FCC Rules. These limits are designed to provide reasonable protection against harmful interference in a residential installation. This equipment generates, uses and can radiate radio frequency energy and, if not installed and used in accordance with the instructions, may cause harmful interference to radio communications. However, there is no guarantee that interference will not occur in a particular installation. If this equipment does cause harmful interference to radio or television reception, which can be determined by turning the equipment off and on, the user is encouraged to try to correct the interference by one or more of the following measures:

- Reorient or relocate the receiving antenna.
- Increase the separation between the equipment and receiver.
- Connect the equipment into an outlet on a circuit different from that to which the receiver is connected.
- Consult the dealer or an experienced radio/TV technician for help.

For EVMs annotated as IC – INDUSTRY CANADA Compliant

This Class A or B digital apparatus complies with Canadian ICES-003.

Changes or modifications not expressly approved by the party responsible for compliance could void the user's authority to operate the equipment.

Concerning EVMs including radio transmitters

This device complies with Industry Canada licence-exempt RSS standard(s). Operation is subject to the following two conditions: (1) this device may not cause interference, and (2) this device must accept any interference, including interference that may cause undesired operation of the device.

Figura A2 Hoja de datos del LMP91000EVM

En la Figura A3 se muestra la normativa FCC parte 15.

Pt. 15	47 CFR Ch. I (10-1-22 Edition)
cost and that individuals with disabilities can access.	15.202 Certified operating frequency range.
	15.203 Antenna requirement.
	15.204 External radio frequency power amplifiers and antenna modifications.
	15.205 Restricted bands of operation.
	15.207 Conducted limits.
	15.209 Radiated emission limits; general requirements.
	15.211 Tunnel radio systems.
	15.212 Modular transmitters.
	15.213 Cable locating equipment.
	15.214 Cordless telephones.
	RADIATED EMISSION LIMITS, ADDITIONAL PROVISIONS
	15.215 Additional provisions to the general radiated emission limitations.
	15.216 [Reserved]
	15.217 Operation in the band 160-190 kHz.
	15.219 Operation in the band 510-1705 kHz.
	15.221 Operation in the band 325-1705 kHz.
	15.223 Operation in the band 1.705-10 MHz.
	15.225 Operation within the band 13.110-14.010 MHz.
	15.227 Operation within the band 26.96-27.28 MHz.
	15.229 Operation within the band 40.66-40.70 MHz.
	15.231 Periodic operation in the band 40.66-40.70 MHz and above 70 MHz.
	15.233 Operation within the bands 43.71-44.49 MHz, 46.50-46.98 MHz, 48.75-49.51 MHz and 49.66-50.0 MHz.
	15.235 Operation within the band 49.82-49.90 MHz.
	15.236 Operation of wireless microphones in the bands 54-72 MHz, 76-88 MHz, 174-216 MHz, 470-698 MHz and 614-698 MHz.
	15.237 Operation in the bands 72.0-73.0 MHz, 74.6-74.8 MHz and 75.2-76.0 MHz.
	15.239 Operation in the band 88-108 MHz.
	15.240 Operation in the band 433.5-434.5 MHz.
	15.241 Operation in the band 174-216 MHz.
	15.242 Operation in the bands 174-216 MHz and 470-668 MHz.
	15.243 Operation in the band 890-940 MHz.
	15.245 Operation within the bands 902-928 MHz, 2435-2465 MHz, 5785-5815 MHz, 10500-10550 MHz, and 24075-24175 MHz.
	15.247 Operation within the bands 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz, and 5725-5850 MHz.
	15.249 Operation within the bands 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz, 5725-5875 MHz, and 24.0-24.25 GHz.
	15.250 Operation of wideband systems within the band 5925-7250 MHz.
	15.251 Operation within the bands 2.9-3.26 GHz, 3.267-3.332 GHz, 3.339-3.3458 GHz, and 3.359-3.4 GHz.
PART 15—RADIO FREQUENCY DEVICES	
Subpart A—General	
Sec.	
15.1 Scope of this part.	
15.3 Definitions.	
15.5 General conditions of operation.	
15.7 [Reserved]	
15.9 Prohibition against eavesdropping.	
15.11 Cross reference.	
15.13 Incidental radiators.	
15.15 General technical requirements.	
15.17 Susceptibility to interference.	
15.19 Labeling requirements.	
15.21 Information to user.	
15.23 Home-built devices.	
15.25 Kits.	
15.27 Special accessories.	
15.29 Inspection by the Commission.	
15.31 Measurement standards.	
15.32 Test procedures for CPU boards and computer power supplies.	
15.33 Frequency range of radiated measurements.	
15.35 Measurement detector functions and bandwidths.	
15.37 Transition provisions for compliance with this part.	
15.38 Incorporation by reference.	
Subpart B—Unintentional Radiators	
15.101 Equipment authorization of unintentional radiators.	
15.102 CPU boards and power supplies used in personal computers.	
15.103 Exempted devices.	
15.105 Information to the user.	
15.107 Conducted limits.	
15.109 Radiated emission limits.	
15.111 Antenna power conduction limits for receivers.	
15.113 Power line carrier systems.	
15.115 TV interface devices, including cable system terminal devices.	
15.117 TV broadcast receivers.	
15.118 Cable ready consumer electronics equipment.	
15.119 [Reserved]	
15.120 Program blocking technology requirements for television receivers.	
15.121 Scanning receivers and frequency	

Figura A3. Normativa FCC parte 15

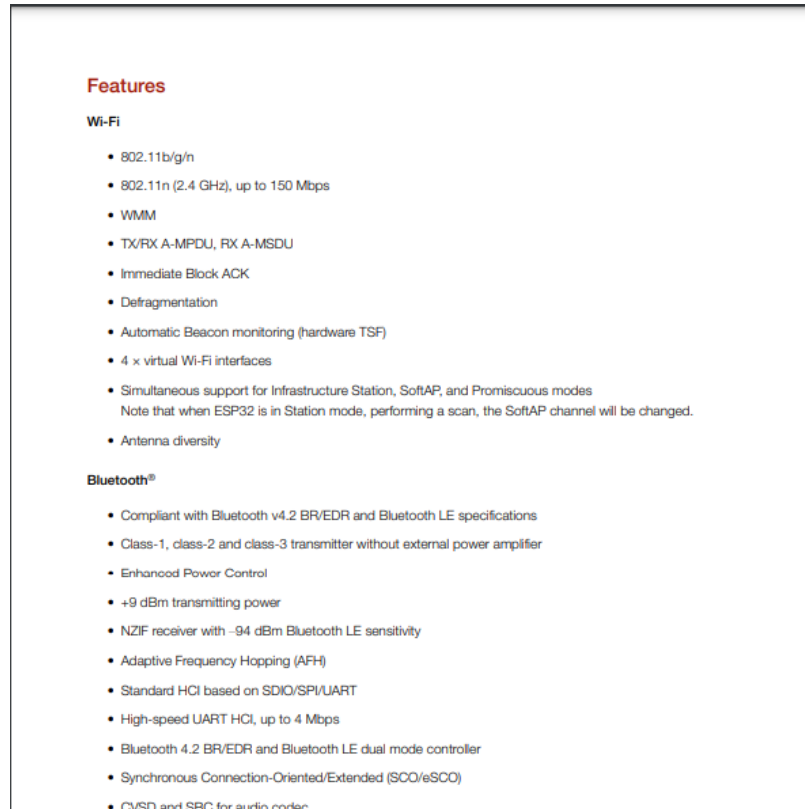
En la Figura A4 se muestra la normativa Canadian ICES-003.

Spectrum Management and Telecommunications
Interference-Causing Equipment Standard

Information Technology Equipment (including Digital Apparatus)

Figura A4. Normativa Canadian ICES-003

En la Figura A5 se muestra las funcionalidades del módulo ESP32.



Features

Wi-Fi

- 802.11b/g/n
- 802.11n (2.4 GHz), up to 150 Mbps
- WMM
- TX/RX A-MPDU, RX A-MSDU
- Immediate Block ACK
- Defragmentation
- Automatic Beacon monitoring (hardware TSF)
- 4 x virtual Wi-Fi interfaces
- Simultaneous support for Infrastructure Station, SoftAP, and Promiscuous modes
Note that when ESP32 is in Station mode, performing a scan, the SoftAP channel will be changed.
- Antenna diversity

Bluetooth®

- Compliant with Bluetooth v4.2 BR/EDR and Bluetooth LE specifications
- Class-1, class-2 and class-3 transmitter without external power amplifier
- Enhanced Power Control
- +9 dBm transmitting power
- NZIF receiver with -94 dBm Bluetooth LE sensitivity
- Adaptive Frequency Hopping (AFH)
- Standard HCI based on SDIO/SPI/UART
- High-speed UART HCI, up to 4 Mbps
- Bluetooth 4.2 BR/EDR and Bluetooth LE dual mode controller
- Synchronous Connection-Oriented/Extended (SCO/eSCO)
- CVSD and SBC for audio codec

Figura A5. Hoja de datos ESP32

En la Figura A6 se muestra las funcionalidades del módulo PN532.



We have updated this module to version 3. Compared with V2, V3 have the following improvement:

1. **Smaller:** the size now is as small as 42.7mm*40.4mm*4mm
2. **Easy to change mode:** with a small SMD toggle Switch, it becomes very easy to change among IIC, SPI and HSU modes
3. **Longer distance:** the reading distance becomes 5~7cm, compared with 4~6 cm of last version
4. **Add software to support NFC with Android Phone**

Features

1. Support IIC, SPI and HSU (High Speed UART)
2. RFID reader/writer mode support
 - Mifare 1k, 4k, Ultralight, and DesFire cards
 - ISO/IEC 14443-4 cards such as CD978X, CD light, DesFire, P5CN072 (SMX)
 - Innovation Jewel cards such as IRT5001 card
 - FelICo cards such as RCS_860 and RCS_854
3. Plug and play, Arduino compatible
4. Built in PCB Antenna, with 5cm~7cm communication distance
5. On-board level shifter, Standard 5V TTL for I2C and UART, 3.3V TTL SPI
6. Work as RFID reader/writer
7. Work as 1443-A card or a virtual card
8. Support NFC with Android phone
9. Small size: 43mm*41mm*4mm

Figura A6. Funcionalidades módulo PN532

En la Figura A7 Se muestra la portada del documento de información del ADC1115.

ADS1113, ADS1114, ADS1115
SBAS444D - MAY 2009 - REVISED JANUARY 2018

ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I²C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator

1 Features

- Ultra-Small X2QFN Package: 2 mm × 1.5 mm × 0.4 mm
- Wide Supply Range: 2.0 V to 5.5 V
- Low Current Consumption: 150 µA (Continuous-Conversion Mode)
- Programmable Data Rate: 8 SPS to 860 SPS
- Single-Cycle Settling
- Internal Low-Drift Voltage Reference
- Internal Oscillator
- I²C Interface: Four Pin-Selectable Addresses
- Four Single-Ended or Two Differential Inputs (ADS1115)
- Programmable Comparator (ADS1114 and ADS1115)
- Operating Temperature Range: -40°C to +125°C

2 Applications

- Portable Instrumentation
- Battery Voltage and Current Monitoring
- Temperature Measurement Systems
- Consumer Electronics
- Factory Automation and Process Control

3 Description

The ADS1113, ADS1114, and ADS1115 devices (ADS111x) are precision, low-power, 16-bit, I²C-compatible, analog-to-digital converters (ADCs) offered in an ultra-small, leadless, X2QFN-10 package, and a VSSOP-10 package. The ADS111x devices incorporate a low-drift voltage reference and an oscillator. The ADS1114 and ADS1115 also incorporate a programmable gain amplifier (PGA) and a digital comparator. These features, along with a wide operating supply range, make the ADS111x well suited for power- and space-constrained, sensor measurement applications.

The ADS111x perform conversions at data rates up to 860 samples per second (SPS). The PGA offers input ranges from ±256 mV to ±6.144 V, allowing precise large- and small-signal measurements. The ADS1115 features an input multiplexer (MUX) that allows two differential or four single-ended input measurements. Use the digital comparator in the ADS1114 and ADS1115 for under- and overvoltage detection.

The ADS111x operate in either continuous-conversion mode or single-shot mode. The devices are automatically powered down after one conversion in single-shot mode; therefore, power consumption is significantly reduced during idle periods.

Device Information ⁽¹⁾		
PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
ADS111x	X2QFN (10)	1.50 mm × 2.00 mm
	VSSOP (10)	3.00 mm × 3.00 mm

(1) For all available packages, see the package option addendum at the end of the data sheet.

Simplified Block Diagrams

Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

Figura A7. Diagrama general del ADC y características principales

En la Figura A8 se muestra las características de la batería LIPO.



LIR18650 Datasheet
Li-ion Battery
Edition: NOV. 2010

5. BASIC CHARACTERISTICS

5.1 Capacity (25±5°C)	Nominal Capacity: 2600mAh (0.52A Discharge, 2.75V) Typical Capacity: 2550mAh (0.52A Discharge, 2.75V) Minimum Capacity: 2500mAh (0.52A Discharge, 2.75V)
5.2 Nominal Voltage	3.7V
5.3 Internal Impedance	≤ 70mΩ
5.4 Discharge Cut-off Voltage	3.0V
5.5 Max Charge Voltage	4.20±0.05V
5.6 Standard Charge Current	0.52A
5.7 Rapid Charge Current	1.3A
5.8 Standard Discharge Current	0.52A
5.9 Rapid Discharge Current	1.3A
5.10 Max Pulse Discharge Current	2.6A
5.11 Weight	46.5±1g
5.12 Max. Dimension	Diameter(Ø): 18.4mm Height (H): 65.2mm
5.13 Operating Temperature	Charge: 0 ~ 45°C Discharge: -20 ~ 60°C
5.14 Storage Temperature	During 1 month: -5 ~ 35°C During 6 months: 0 ~ 35°C

Figura A8. Hoja de datos de la batería LIPO18650

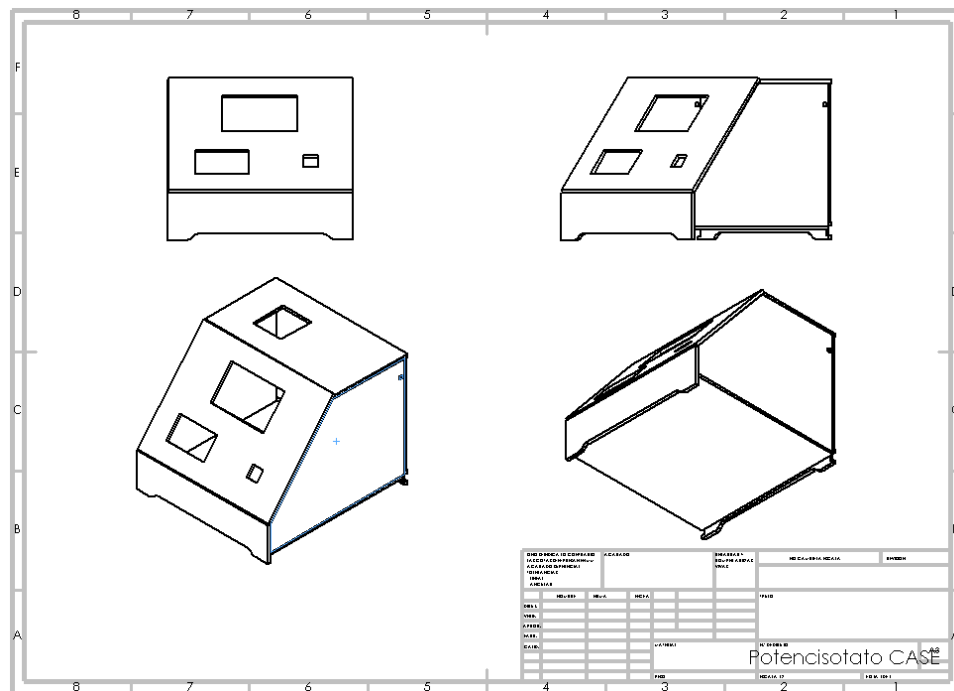


Figura A9. Carcasa en software de diseño

En la Figura A10 se muestra el corte laser para la creación de la carcasa del potenciosotato, se corta sobre MDF y con un modelo creado en SolidWorks.

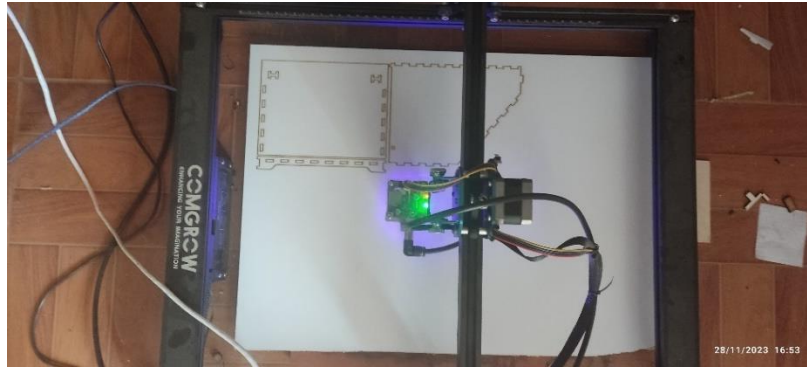


Figura A10. Corte laser en MDF de 3mm

En la Figura A11 se muestra la creación de una baquelita en FR4 para la construcción del potenciómetro, la cual también está realizada en laser para mayor precisión.

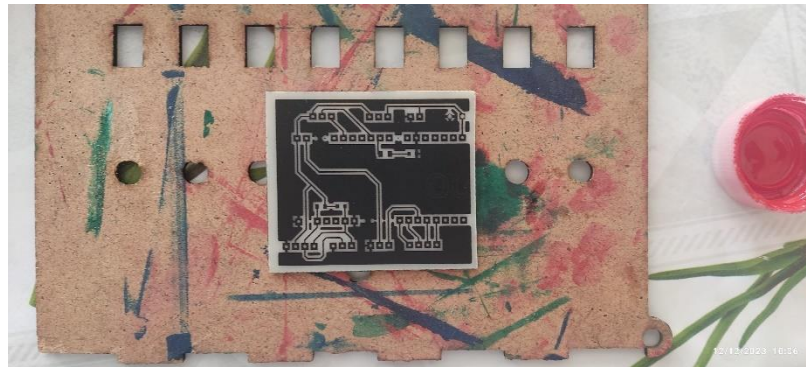


Figura A11. Baquelita del microcontrolador para el potenciómetro



Figura A12. Microcontrolador ESP32

En la Figura A13 se muestra el uso de las distintas librerías usadas para el desarrollo del software para el potenciómetro.

```

//Librerías Utilizadas
#include <Wire.h>
#include <WiFi.h>
#include "Arduino.h"
#include <ESPAsyncWebServer.h>
#include <ESPmDNS.h>
#include <SPIFFS.h>
#include <AsyncJson.h>
#include "wifi_credentials.h"
#include "LMP91000.h"
#include "WebSocketsServer.h"
#include "DNSServer.h"

// #include <OTA.h>
#include <Update.h>

```

Figura A13. Librerías

En la Figura A14 se muestra las distintas variables con las cuales se ha programado el dispositivo.

```

// Información específica del microcontrolador (pinouts, Vcc, etc.)
const uint16_t opVolt = 3300; // 3300 mV
const uint8_t adcBits = 12; // El ADC del ESP32 es de 12 bits
const uint16_t dacResolution = pow(2, 8) - 1; // El DAC del ESP32 es de 8 bits, lo que equivale a 12.9 mV para una ref

// Control de pines para el LMP91000
const uint8_t dac = 25; // Pin DAC para la referencia Vref del LMP91000.
const uint8_t MENB = 5; // Pin MENB para habilitar el LMP91000.

// Pines de entrada analógica para leer voltajes
const uint8_t LMP_C1 = 27; // Nota: C1, C2 no están conectados al microcontrolador en BurkeLab ESP32Stat Rev 3.5
const uint8_t LMP_C2 = 39; // Nota: C1, C2 no están conectados al microcontrolador en BurkeLab ESP32Stat Rev 3.5
const uint8_t LMP = 35; // Pin ADC para leer Vout. Pin 35 en BurkeLab ESP32Stat Rev 3.5

// Calibración del ADC del ESP32 (ver rutina de calibración)
float a_coeff = -146.63; // Coeficientes codificados en duro, pero pueden actualizarse con la rutina de calibración.
float b_coeff = 7.64; // Coeficientes codificados en duro, pero pueden actualizarse con la rutina de calibración.

// Para BurkeLab ESP32Stat Rev 3.5, pin LED "blinky".
int LEDPIN = 26;

```

Figura A14. Variables globales

En la Figura A15 se muestra los distintos métodos de barridos que se ocupara en el dispositivo, son funciones de barrido hasta métodos de calibración o corrección.

```

// Control global del modo (tipo de barrido)
enum Sweep_Mode_Type
{
    dormant, // no barrido
    NPV,     // voltametría pulsada normal
    CV,      // voltametría cíclica
    SQV,     // voltametría de onda cuadrada
    CA,      // cronoamperometría
    IV,      // curva IV
    CAL,     // calibrar
    DCBIAS, // sesgo de corriente continua en un punto fijo
    CTLPANEL, // interfaz tipo panel de control
    MISC_MODE // varios
};
Sweep_Mode_Type Sweep_Mode = dormant;

// Parámetros de barrido (para ser establecidos por el usuario a través de formularios HTML, pero con valores predeter
// (inicializados a sus valores predeterminados)
// Parámetros generales de barrido:
int sweep_param_lmpGain = 7; // (índice) ajuste de ganancia para LMP91000
bool sweep_param_setToZero = true; // Booleano

```

Figura A15. Funciones de barrido

En la Figura A16 Se muestra Los parámetros Iniciales del método de barrido de Voltamperimetría Cíclica

```

// Parámetros de barrido CV:
// runCV(sweep_param_lmpGain, sweep_param_cycles_CV, sweep_param_startV_CV,
// sweep_param_endV_CV, sweep_param_vertex1_CV, sweep_param_vertex2_CV, sweep_param_stepV_CV,
// sweep_param_rate_CV, sweep_param_setToZero);
int sweep_param_cycles_CV = 3; // (#) número de repeticiones del escaneo
int sweep_param_startV_CV = 0; // (mV) voltaje para comenzar el escaneo
int sweep_param_endV_CV = 0; // (mV) voltaje para detener el escaneo
int sweep_param_vertex1_CV = 100; // (mV) borde del escaneo
int sweep_param_vertex2_CV = -100; // (mV) borde del escaneo
int sweep_param_stepV_CV = 5; // (mV) incremento de voltaje
int sweep_param_rate_CV = 100; // (mV/seg) velocidad de escaneo

```

Figura A16. Parámetros de barrido Voltametría Cíclica

En la Figura A17 se muestra la función para determinar la Voltametría Cíclica e imprime los datos por comunicación serial.

```

void runCVandPrintToSerial()
// runCVandPrintToSerial
{
//#####VOLTAMETRIA CICLICA#####

// //void runCV(uint8_t lmpGain, uint8_t cycles, int16_t startV,
// //          int16_t endV, int16_t vertex1, int16_t vertex2,
// //          int16_t stepV, uint16_t rate, bool setToZero)
//
// runCV(LMPgain, 1, -100, 100, -100, 100, 1, 50, true);

Serial.println(F("Voltaje,Corriente")); // el array final
for (uint16_t i = 0; i < arr_samples; i++)
{
  Serial.print(volts[i]);
  Serial.print(F("\t"));
  Serial.println(amps[i]);
}
}

```

Figura A17. Función para Voltametría Cíclica e impresión de datos

```

// Parámetros de barrido NPV:
// runNPV(sweep_param_lmpGain, sweep_param_startV_NPV, sweep_param_endV_NPV,
//        sweep_param_pulseAmp_NPV, sweep_param_pulseAmp_NPV, sweep_param_period_NPV,
//        sweep_param_quietTime_NPV, uint8_t range, sweep_param_setToZero)
int sweep_param_startV_NPV = -200; // (mV) voltaje para comenzar el escaneo
int sweep_param_endV_NPV = 200; // (mV) voltaje para detener el escaneo
int sweep_param_pulseAmp_NPV = 20; // amplitud del pulso
int sweep_param_width_NPV = 50; // ancho del pulso
int sweep_param_period_NPV = 200; // periodo del pulso
int sweep_param_quietTime_NPV = 1000; // tiempo de espera

```

Figura A18. Código de parámetros de barrido NPV

```

void ejecutarNPVyImprimirPorSerial()
// ejecutarNPVyImprimirPorSerial
{
//#####VOLTAMETRIA DE PULSO NORMAL#####
LMPgainGLOBAL = 7;
ejecutarNPV(LMPgainGLOBAL, -200, 500, 10, 50, 200, 500, 6, true);
// Ejecutar Voltametría de Pulso Normal con ganancia 350000, -200 a +500 mV, paso de 10 mV, ancho de pulso de 50 mic
// periodo de 200 microsegundos, tiempo de espera de 500 microsegundos, rango en microamperios // {micro o mili??}

Serial.println(F("Voltaje,Corriente")); // el array final
for (uint16_t i = 0; i < arr_samples; i++)
{
  Serial.print(volts[i]);
  Serial.print(F("\t"));
  Serial.println(amps[i]);
}
}

```

Figura A19. Código de impresión de Voltaje y Corriente

```

// Parámetros de barrido SWV:
// runSwV(sweep_param_lmpGain, sweep_param_startV_SwV, sweep_param_endV_SwV,
//        sweep_param_pulseAmp_SwV, sweep_param_stepV_SwV, sweep_param_freq_SwV, sweep_param_setToZero)
int sweep_param_startV_SwV = -200; // (mV) voltaje para comenzar el escaneo
int sweep_param_endV_SwV = 200; // (mV) voltaje para detener el escaneo
int sweep_param_pulseAmp_SwV = 20; // amplitud del pulso
int sweep_param_stepV_SwV = 5; // (mV) incremento de voltaje
int sweep_param_freq_SwV = 10; // frecuencia del pulso

```

Figura A20. Código de parámetros de barrido SWV

```

void ejecutarSWyImprimirPorSerial()
// ejecutarSWyImprimirPorSerial (hacia adelante)
{
  // #####VOLTAJES DE ONDA CUADRADA (Hacia adelante - Oxidación)#####
  // ejecutarSW(LMPgain, -400, 500, 50, 1, 31.25, true);

  Serial.println(F("Voltaje,Corriente"));
  for (uint16_t i = 0; i < arr_samples; i++)
  {
    Serial.print(volts[i]);
    Serial.print(F(","));
    Serial.println(amps[i]);
  }
}

void ejecutarSWInversoImprimirPorSerial()
// ejecutarSWInversoImprimirPorSerial (inverso)
{
  // #####VOLTAJES DE ONDA CUADRADA (Inverso - Reducción)#####
  // ejecutarSW(LMPgain, -30, -500, 50, 66, 62.5, true);
  Serial.println(F("Voltaje,Corriente"));
  for (uint16_t i = 0; i < arr_samples; i++)
  {
    Serial.print(volts[i]);
    Serial.print(F(","));
    Serial.println(amps[i]);
  }
}

```

Figura A21. Código para imprimir por serial

```

// Parámetros de barrido CA:
// runAmp(sweep_param_lmpGain, sweep_param_pre_stepV_CA, sweep_param_quietTime_CA,
//       sweep_param_V1_CA, sweep_param_t1_CA, sweep_param_V2_CA, sweep_param_t2_CA,
//       sweep_param_samples_CA, uint8_t range, sweep_param_setToZero)
int sweep_param_pre_stepV_CA = 50; // (mV) voltaje de pre-paso
int sweep_param_quietTime_CA = 2000; // tiempo de espera
int sweep_param_V1_CA = 100; // (mV) voltaje 1
int sweep_param_t1_CA = 2000; // tiempo 1
int sweep_param_V2_CA = 50; // (mV) voltaje 2
int sweep_param_t2_CA = 2000; // tiempo 2
int sweep_param_samples_CA = 100; // número de muestras

```

Figura A22. Código de parámetros de barrido en CA


```

// Parámetros de barrido para prueba de ruido:
// testNoiseAtABiasPoint(sweep_param_biasV_noisetest, sweep_param_numPoints_noisetest,
// sweep_param_delayTime_ms_noisetest)
int sweep_param_biasV_noisetest = -100; // (mV) voltaje para la prueba de ruido
int sweep_param_numPoints_noisetest = 100; // número de puntos
int sweep_param_delayTime_ms_noisetest = 50; // tiempo de espera

// Parámetros de barrido para curva IV:
// testIV(sweep_param_startV_IV, sweep_param_endV_IV, sweep_param_numPoints_IV,
// sweep_param_delayTime_ms_IV)
int sweep_param_startV_IV = -200; // (mV) voltaje para comenzar la curva IV
int sweep_param_endV_IV = 200; // (mV) voltaje para detener la curva IV
int sweep_param_numPoints_IV = 701; // número de puntos
int sweep_param_delayTime_ms_IV = 50; // tiempo de espera

// Parámetros de barrido para calibración:
// calibrateDACandADCs(sweep_param_delayTime_ms_CAL)
int sweep_param_delayTime_ms_CAL = 50; // tiempo de espera

// Arreglos para curvas IV, etc.:
const uint16_t arr_samples = 5000; // usar 1000 para EIS, se puede usar 2500 para otros experimentos
uint16_t arr_cur_index = 0;
int16_t volts[arr_samples] = {0}; // curva IV individual "V"
float amps[arr_samples] = {0}; // curva IV individual "I"
int32_t time_Voltamogram[arr_samples] = {0};
int number_of_valid_points_in_volts_amps_array = 0; // el resto son todos ceros...

```

Figura A23. Código de parámetros de barrido para pruebas de ruido

En la Figura A24 se muestran los tres electrodos y la solución de ácido ascórbico para las pruebas electroquímicas.



Figura A24. Celda electroquímica para pruebas



Figura A25. Peso de Quitina 1,509g

En la Figura A26 se muestra un dispositivo de baño ultrasónico para que la quitina desarrolle fibras como enlaces con el grafeno para una mayor aleación del electrodo.



Figura A26. Dispositivo de baño ultrasónico



Figura A27. Agitador Magnético



Figura A28. Filtrado de la mezcla



Figura A29. Resultado del filtrado



Figura A30. Moldes no adecuados



Figura A31. Prensa mecánica



Figura A32. Electrodo de quitina/GO



Figura A33. Horno industrial



Figura A34. Electrodo de quitina y quitina con ácidos



Figura A35. Microscopio SEM VEGA3.



Figura A36. Muestra del electrodo de Quitina/GO para ingresar a ser analizada por el SEM.

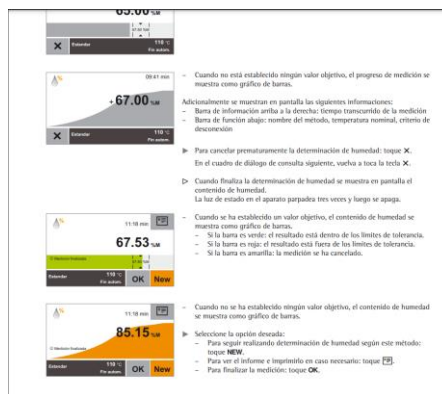


Figura A37. Termobalanza Sartorius MA160-1US y su datasheets

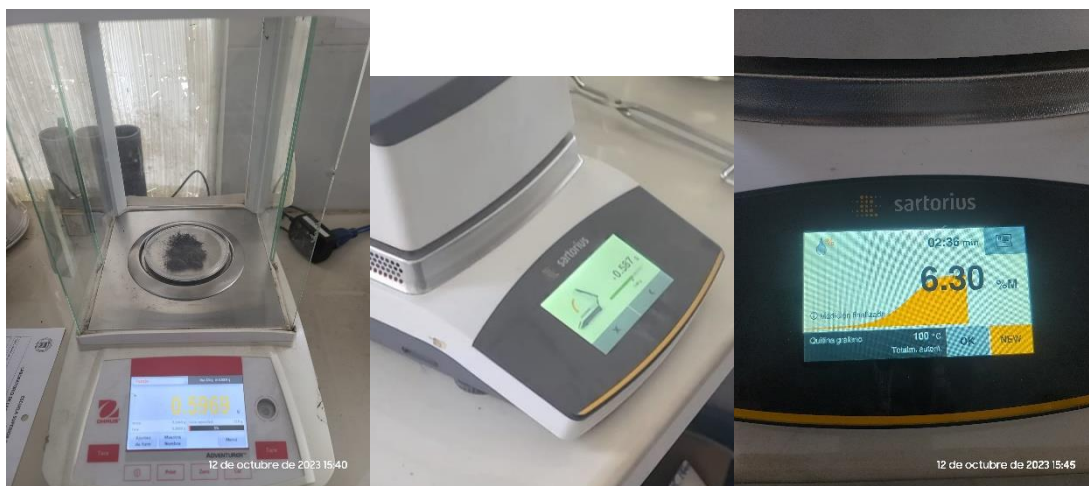


Figura A38. Muestra del electrodo de quitina/GO en termobalanza



Figura A39. Muestra de quitina en termobalanza



Figura A40. Muestra de grafito-grafeno en termobalanza

En la Figura A41 se muestra la medición de la resistencia del electrodo, además de comprobar el paso de corriente.



Figura A41. Pruebas de resistencia y paso de corriente

7 CONFIGURACIÓN INICIAL Y ÚNICA

El dispositivo cuando se realiza el primer uso, después de compilar y subir la respectiva programación, por única vez o cuando no exista algún medio Wi-Fi “conocido” procederá a mostrar esta información.

PASOS	INDICACIONES
1	Una vez encendido el dispositivo, ir desde un smartphone a “Configuraciones o ajustes”
2	Dirigirse al apartado de “Wi-Fi”
3	Seleccionar la RED llamada “Potenciostato-UTA”

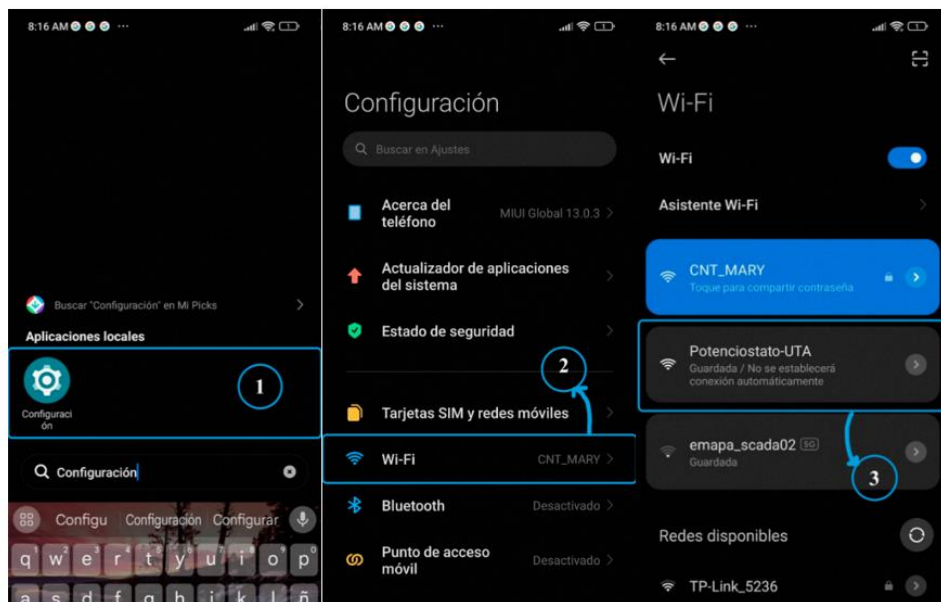


Figura A42. Manual de usuario: Configuración inicial, acceso a red “Potenciostato-UTA”

PASOS	INDICACIONES
4	Una vez conectado, damos clic en la flecha de parámetros de la RED Wi-Fi.
5	Ahí vemos la “Puerta de enlace predeterminado” Default Gateway y la copiamos.
6	Nos dirigimos a un navegador WEB, por ejemplo “Chrome”

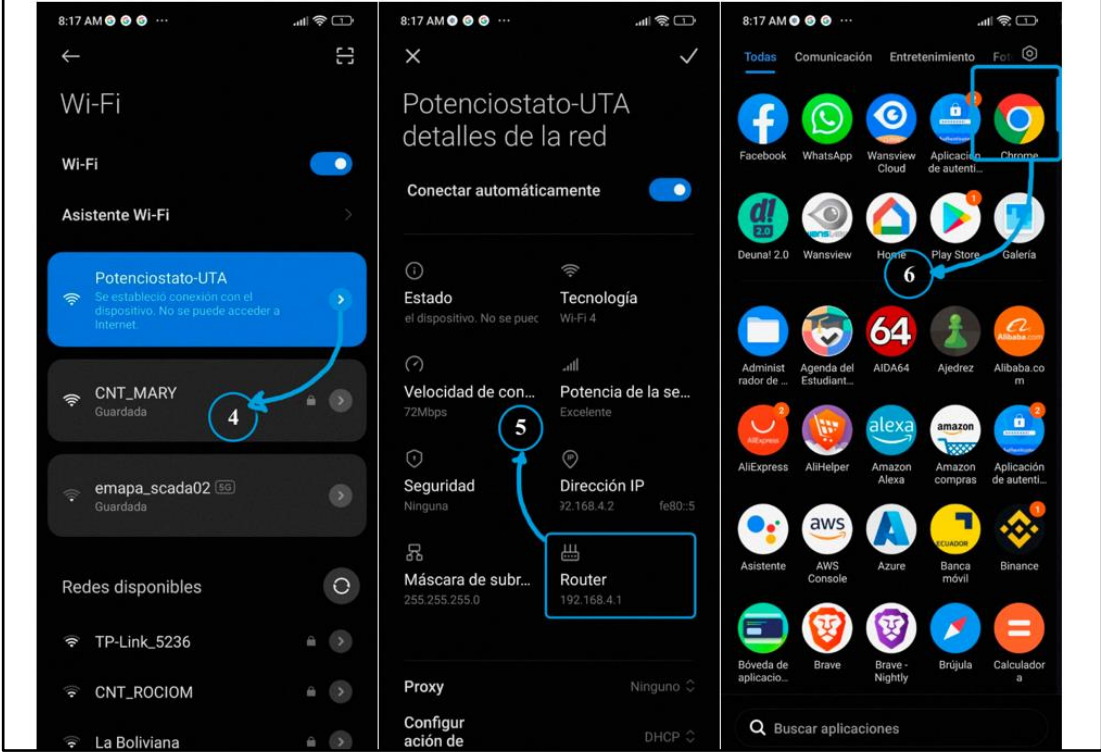


Figura A43. Manual de usuario: Configuración inicial, visualización de la puerta de enlace predeterminada

PASOS	INDICACIONES
7	Con la "Default Gateway" que copiamos, la pegamos en la barra de direcciones de Chrome.
8	Nos dirige al servidor Portal WEB, cual se encarga de realizar la conexión del dispositivo a una RED Wi-Fi disponible. Daremos clic dos veces en "Wifi Scan" para ver las redes conocidas y seleccionar una.
9	Se visualiza cada una de las redes Wi-Fi disponibles y también su intensidad en decibeles. Copiamos la que nosotros queremos.

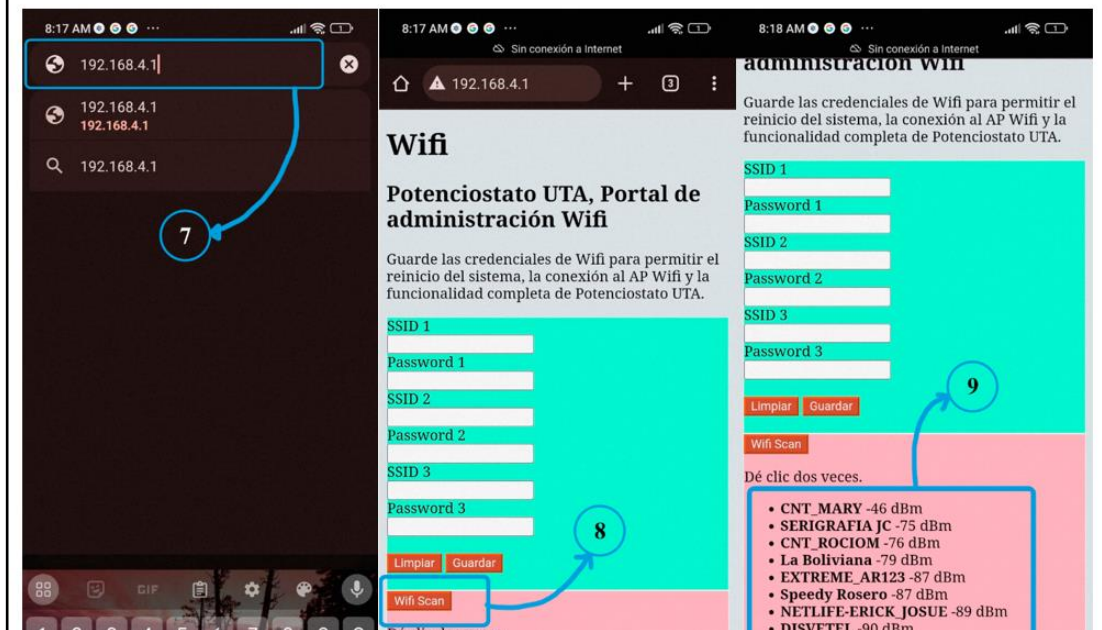


Figura A44. Manual de usuario: Configuración inicial, escaneo de redes disponibles

PASOS	INDICACIONES
10	Colocamos el SSID y también su respectiva contraseña, para acceder y vincular al dispositivo con la RED local.
11	Nos manda un mensaje indicando que las credenciales de nuestra RED se han guardado.
12	Por último, tendremos acceso al dispositivo con todas sus funciones y lista para realizar análisis electroquímicos.

Figura A45. Manual de usuario: Configuración inicial, acceso a la red y a la interfaz

8 GUÍA DEL FUNCIONAMIENTO

Al encender el potencioestado, después de haber configurado por primera vez, se presenta la siguiente pantalla con el texto: “BIENVENIDO A POTENCIOSTATO UTA COLOQUE SU IDENTIFICACION NFC”.



Se procede a ubicar el tag NFC encima del módulo NFC (led rojo) como se muestra en la imagen.



Figura A46. Manual de usuario: Guía del funcionamiento, pantalla inicial y seguridad

El potencioestado detecta y confirma el UID del tag NFC y procede a activarse mostrando el siguiente texto: “POTENCIOSTATO ACTIVADO COLOQUE SU TELEFONO SOBRE EL LOGO NFC O INGRESE AL ENLACE”.



Luego, se procede a colocar un teléfono móvil compatible con tecnología NFC en la parte superior del dispositivo en el texto “NFC”; en el caso de no contar con uno de estos dispositivos, acceder a <http://potenciostato.local> en su navegador de confianza.

Figura A47. Manual de usuario: Guía del funcionamiento, acceso a la interfaz del usuario

Al acceder a la interfaz de usuario, ya se pueden realizar pruebas electroquímicas en el potencióstato. Se procede a verificar que los tres conectores lagartos estén conectados a los tres electrodos que se van a utilizar en los experimentos electroquímicos.

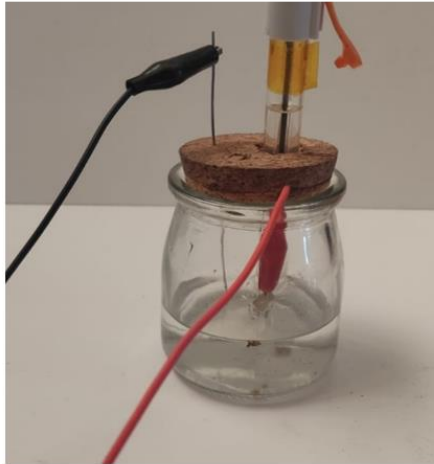


Figura A48. Manual de usuario: Guía del funcionamiento, asegurarse de conexiones antes de ejecutar alguna prueba electroquímica

10 RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

10.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Si no se enciende el dispositivo, pero sí lo hace al conectarlo a una fuente externa, es muy probable que las baterías hayan agotado su carga.

10.2 NO ESTA ENVIANDO LOS DATOS

Revisar la conexión Wifi que este en un rango prudente, ya que el dispositivo no cuenta con una antena de gran alcance.

10.3 NO SALE ETIQUETA DE TRABAJANDO

Siempre presione la opción de calibrar antes de los otros métodos, ya que al ser un proceso muy rápido se puede visualizar si se actualiza el mensaje de operación.

10.4 PRIMERO BOTÓN CALIBRAR

Siempre presionar el botón calibrar antes de ejecutar algún experimento electroquímico.

10.5 USB NO REONOCE LA TARJETA REINICIAR

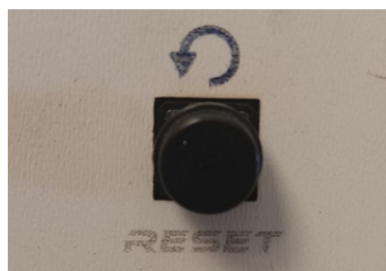


Figura A 49. Manual de usuario: Resolución de problemas

Tabla 28. Tabla completa de prueba de voltamperometría de 100 puntos con respecto a datos de referencia.

Potenciostato UTA 2023 VS Potenciostato del Experimento a comparar de la autora Luminita, 2015.						
Índices	Corriente (µA)	Voltaje_V	Tiempo_ms	Corriente Referencial	Error Absoluto	Error %
0	-40	0,0000	0	-45	-42,5	3%
1	-38	0,0025	16	-46	-42	4%
2	-37,5	0,0050	32	-40	-38,75	1%
3	-35	0,0075	48	-39	-37	2%
4	-35	0,0100	64	-38	-36,5	2%
5	-33	0,0125	80	-35	-34	1%
6	-32	0,0150	96	-32	-32	0%
7	-28	0,0175	112	-29	-28,5	1%
8	-25	0,0200	128	-25	-25	0%
9	-15	0,0225	144	-20	-17,5	3%
10	-6	0,0250	160	-15	-10,5	5%
11	7	0,0275	176	-11	-2	9%
12	21	0,0300	192	-7	7	14%
13	35	0,0325	208	0	17,5	18%
14	50	0,0350	224	18	34	16%
15	70	0,0375	240	38	54	16%
16	95	0,0400	256	60	77,5	18%
17	125	0,0425	272	85	105	20%
18	150	0,0450	288	150	150	0%
19	188	0,0475	304	240	214	26%
20	275	0,0500	320	240	257,5	18%
21	265	0,0525	336	240	252,5	13%
22	275	0,0550	352	240	257,5	18%
23	250	0,0575	368	243	246,5	4%
24	288	0,0600	384	245	266,5	22%
25	288	0,0600	400	245	266,5	22%
26	250	0,0575	416	245	247,5	3%
27	275	0,0550	432	245	260	15%
28	265	0,0525	448	245	255	10%
29	275	0,0500	464	245	260	15%
30	272	0,0475	480	245	258,5	14%
31	240	0,0450	496	210	225	15%
32	220	0,0425	512	188	204	16%
33	200	0,0400	528	175	187,5	13%
34	190	0,0375	544	163	176,5	14%
35	170	0,0350	560	144	157	13%
36	146	0,0325	576	130	138	8%
37	120,358	0,0300	592	120,298	120,328	0%
38	110	0,0275	608	110	110	0%
39	87	0,0250	624	100	93,5	7%
40	75	0,0225	640	95	85	10%
41	67	0,0200	656	88	77,5	11%
42	56	0,0175	672	75	65,5	10%
43	46	0,0150	688	63	54,5	9%
44	42	0,0125	704	61	51,5	10%
45	36	0,0100	720	59	47,5	12%

46	41	0,0075	736	59	50	9%
47	42	0,0050	752	60	51	9%
48	35	0,0025	768	45	40	5%
49	25	0,0000	784	38	31,5	7%
50	25	0,0000	800	38	31,5	7%
51	25	0,0000	816	38	31,5	7%
52	20	-0,0025	832	20	20	0%
53	17	-0,0050	848	10	13,5	4%
54	10	-0,0075	864	0	5	5%
55	8	-0,0100	880	-8	0	8%
56	6,023	-0,0125	896	-13	-3,4885	10%
57	4,002	-0,0150	912	-20	-7,999	12%
58	0,068	-0,0175	928	-23	-11,466	12%
59	-3	-0,0200	944	-26	-14,5	12%
60	-5	-0,0225	960	-30	-17,5	13%
61	-7	-0,0250	976	-35	-21	14%
62	-8	-0,0275	992	-38	-23	15%
63	-11	-0,0300	1008	-40	-25,5	15%
64	-12	-0,0325	1024	-43	-27,5	16%
65	-13	-0,0350	1040	-45	-29	16%
66	-16	-0,0375	1056	-47	-31,5	16%
67	-19	-0,0400	1072	-50	-34,5	16%
68	-21	-0,0425	1088	-50	-35,5	15%
69	-22	-0,0450	1104	-50	-36	14%
70	-25	-0,0475	1120	-55	-40	15%
71	-27	-0,0500	1136	-60	-43,5	17%
72	-33	-0,0525	1152	-64	-48,5	16%
73	-45	-0,0550	1168	-67	-56	11%
74	-61	-0,0575	1184	-74	-67,5	7%
75	-85	-0,0600	1200	-85	-85	0%
76	-85	-0,0575	1216	-86	-85,5	1%
77	-85	-0,0550	1232	-87	-86	1%
78	-87	-0,0525	1248	-89	-88	1%
79	-89	-0,0500	1264	-89	-89	0%
80	-93	-0,0475	1280	-90	-91,5	2%
81	-97	-0,0450	1296	-92	-94,5	3%
82	-93	-0,0425	1312	-91	-92	1%
83	-85	-0,0400	1328	-90	-87,5	3%
84	-75	-0,0375	1344	-88	-81,5	7%
85	-73	-0,0350	1360	-86	-79,5	7%
86	-67	-0,0325	1376	-75	-71	4%
87	-65	-0,0300	1392	-68	-66,5	2%
88	-63,85	-0,0275	1408	-65	-64,425	1%
89	-62,7	-0,0250	1424	-63	-62,85	0%
90	-61,55	-0,0225	1440	-61	-61,275	0%
91	-60,4	-0,0200	1456	-59	-59,7	1%
92	-59,25	-0,0175	1472	-57	-58,125	1%
93	-58,1	-0,0150	1488	-56	-57,05	1%
94	-56,95	-0,0125	1504	-54	-55,475	1%
95	-55,8	-0,0100	1520	-52	-53,9	2%
96	-54,65	-0,0075	1536	-51	-52,825	2%
97	-53,5	-0,0050	1552	-50	-51,75	2%
98	-49	-0,0025	1568	-49	-49	0%
99	-40	0,0000	1584	-47	-43,5	4%

100	-40	0,0000	1600	-47	-43,5	4%
Porcentaje de Error %						8%