



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACSISTEL

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

DISEÑO DE LOS ELECTRODOS DE UN SUPERCAPACITOR BIODEGRADABLE

Baque Pozo Byron Jose

Dirigido por:

Ing. Bremnen Marino Véliz Noboa, Ph.D.

La Libertad - 2026

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado, en primer lugar, a Dios y a mis queridos padres, Andrés y Ana, pilares fundamentales de mi vida. Su amor incondicional, sus innumerables sacrificios, su paciencia infinita y su confianza constante en mis capacidades han sido la brújula y el impulso necesario para alcanzar esta meta académica. Cada desvelo y cada logro a lo largo de este camino llevan impreso el fruto de su ejemplo y sus sabios consejos. De manera muy especial, se lo dedico a mi pareja, cuyo amor, apoyo incondicional y aliento constante fueron mi refugio para no rendirme en cada paso hacia la titulación.

Asimismo, dedico esta investigación a toda mi familia y a aquellas personas especiales que, con una palabra de aliento, un gesto de solidaridad o su compañía inquebrantable, estuvieron a mi lado en los momentos más desafiantes de esta etapa universitaria, convirtiéndose en mi fuente de fortaleza y motivación constante.

AGRADECIMIENTO

Quisiera expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, a través de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnologías (FACSITEL) y de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización por haberme brindado el espacio de formación profesional y las herramientas necesarias para culminar con éxito esta etapa de mi vida académica.

De manera muy especial, extendiendo mi gratitud a mi director y tutor de tesis, el **Ing. Bremnen Marino Véliz Noboa, Ph.D.**, por su valiosa dirección, su paciencia, su rigurosidad científica y su constante guía metodológica a lo largo del desarrollo de este trabajo de investigación, cuyos conocimientos fueron fundamentales para alcanzar los objetivos planteados.

Asimismo, agradezco a los señores docentes de la carrera, quienes con sus enseñanzas contribuyeron a mi crecimiento integral como futuro ingeniero, y al personal de los laboratorios por las facilidades prestadas durante la fase experimental y de caracterización.

Finalmente, a todas las instituciones compañeros y personas que de una u otra manera, colaboraron directa o indirectamente en la cristalización de este proyecto profesional, mi sincero reconocimiento.

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo de titulación denominado:

"Diseño de los Electrodo de un Súper Capacitor Biodegradable",

elaborado por el estudiante **Baque Pozo Byron Jose**,

de la carrera de **Ingeniería en Electrónica y Automatización**

de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, declaro que luego de haber orientado, estudiado y revisado, lo apruebo en todas sus partes y autorizo al estudiante que inicie los trámites legales correspondientes.



Ing. Bremnen Marino Véliz Noboa, Ph.D.
Tutor

TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Ronald Rovira, Ph.D.
DIRECTOR DE CARRERA



Ing. Sendey Vera, MSc.
DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Bremnen Marino Véliz Noboa, Ph.D.
TUTOR



Ing. Luis Chuquimarca, Ph.D.
DOCENTE GUÍA UIC



Ing. Corina Gonzabay, Mgtr.
SECRETARIA DEL TRIBUNAL

Resumen

En este trabajo de investigación planteamos el diseño, la fabricación y la caracterización integral de electrodos ecológicos destinados a supercapacitores de doble capa eléctrica (EDLC), con el propósito fundamental de mitigar la dependencia de polímeros sintéticos derivados del petróleo y disminuir de forma activa la acumulación de residuos electrónicos. Para cumplir con este objetivo, nuestro equipo desarrolló y evaluó de manera sistemática doce formulaciones experimentales (M1 a M12), ajustando de forma controlada los tipos y proporciones de aglutinantes como el fluoruro de polivinilideno (PVDF), la carboximetilcelulosa (CMC) y el almidón soluble comercial, además de incorporar aditivos conductores como grafito y grafeno combinados con carbón activado YEC-8B. Durante el proceso de preparación de las suspensiones o lechadas, la ausencia inicial de un sonicador de sonda en el laboratorio se solventó eficazmente extendiendo los tiempos de agitación mecánica y magnética, logrando así una dispersión coloidal homogénea. La deposición de las películas activas sobre los colectores de aluminio se estandarizó mediante un sistema automatizado de cuchilla dosificadora (*Doctor Blade*) adaptado al cabezal de una máquina CNC, operada mediante un macro personalizado en el firmware Klipper. Esto nos permitió garantizar un espesor promedio sumamente reproducible de 0.2867 mm ($286.67\ \mu\text{m}$) y una calidad de adherencia calificada como muy buena en las formulaciones optimizadas. La posterior caracterización morfológica y composicional mediante SEM y EDX confirmó una elevada retención de carbono activo ($\approx 80\text{--}85\%$) y una distribución uniforme de la CMC sin obstrucción de los poros activos. Asimismo, los ensayos de resistencia superficial en seco y de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) en celdas encapsuladas tipo *coin-cell* CR2032 revelaron que la variante optimizada M10 (formulada con CMC y almidón soluble) alcanzó una estabilidad óhmica sobresaliente con un promedio de $307.4\ \Omega$ y un coeficiente de variación reducido al 21.7%, superando drásticamente la alta dispersión de los aglutinantes de biomasa cruda. De igual forma, la incorporación de grafito laminar en la formulación M11 redujo la resistencia serie equivalente y mantuvo la magnitud de la impedancia por debajo de $11\ \Omega$, validando la alta eficiencia de la red de percolación tridimensional. En conjunto, nuestros resultados demuestran la viabilidad técnica, mecánica y electroquímica de sustituir los aglutinantes fluorados tradicionales por matrices biopoliméricas verdes, ofreciendo un desempeño sumamente competitivo para sistemas de almacenamiento de energía sostenibles y de bajo impacto ambiental.

Palabras clave: Supercapacitores biodegradables, carbón activado, carboximetilcelulosa, almidón soluble, espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), micrografía SEM.

Abstract

In this research work, we propose the design, fabrication, and comprehensive characterization of eco-friendly electrodes intended for electrical double-layer capacitors (EDLCs), with the fundamental purpose of mitigating dependence on petroleum-derived synthetic polymers and actively reducing the accumulation of electronic waste. To achieve this objective, our team developed and systematically evaluated twelve experimental formulations (M1 to M12), controlling the types and proportions of binders such as polyvinylidene fluoride (PVDF), carboxymethyl cellulose (CMC), and commercial soluble starch, alongside the incorporation of conductive additives such as graphite and graphene combined with YEC-8B activated carbon. During the preparation of the slurries, the initial absence of a probe sonicators in the laboratory was effectively compensated by extending mechanical and magnetic agitation times, achieving a homogeneous colloidal dispersion. The deposition of active films onto aluminum current collectors was standardized using an automated doctor blade system adapted to the head of a CNC machine, operated through a custom macro in the Klipper firmware. This allowed us to guarantee a highly reproducible average thickness of 0.2867 mm (286.67 μm) and an adhesion quality rated as very good in the optimized formulations. Subsequent morphological and compositional characterization via SEM and EDX confirmed high active carbon retention ($\approx 80\text{--}85\%$) and a uniform distribution of CMC without clogging the active pores. Furthermore, dry surface resistivity tests and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurements in encapsulated CR2032 coin-cell configurations revealed that the optimized variant M10 (formulated with CMC and soluble starch) achieved outstanding ohmic stability with an average of 307.4 Ω and a reduced variation coefficient of 21.7%, drastically outperforming the high dispersion of raw biomass binders. Similarly, the incorporation of lamellar graphite in formulation M11 reduced the equivalent series resistance and maintained the impedance magnitude below 11 Ω , validating the high efficiency of the three-dimensional percolation network. Overall, our results demonstrate the technical, mechanical, and electrochemical feasibility of substituting traditional fluorinated binders with green biopolymeric matrices, offering a highly competitive performance for sustainable, low environmental impact energy storage systems.

Keywords: Biodegradable supercapacitors, activated carbon, carboxymethyl cellulose, soluble starch, electrochemical impedance spectroscopy (EIS), SEM micrograph.

Contents

Dedicatoria	1
Agradecimiento	2
Aprobación del tutor	3
Resumen	5
Abstract	6
List of Figures	9
List of Tables	11
Nomenclatura y Abreviaturas	12
1 Introducción	13
1.1 Justificación	14
1.2 Panorama actual	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo general	16
1.3.2 Objetivos específicos	16
1.4 Fundamentos teóricos	17
1.4.1 Materiales biodegradables: alternativa sostenible para electrodos . .	18
1.4.2 Evaluación de electrodos biodegradables	19
1.4.3 Fundamentos de la espectroscopía de impedancia electroquímica . .	19
1.4.4 Capacitancia de un EDLC	22
1.4.5 Energía almacenada en un supercapacitor	22
1.4.6 Densidad de energía	22
1.4.7 Capacitancia específica	23
1.4.8 Normativas y sostenibilidad en el diseño de electrodos	23
1.5 Marco contextual	24
2 Métodos y diseño experimental	25
2.1 Métodos	25
2.1.1 Metodología exploratoria	25
2.1.2 Investigación experimental	26
2.1.3 Diseño e implementación de pruebas electroquímicas	26
2.2 Desarrollo experimental	27
2.2.1 Componentes físicos	27
2.2.2 Diseño de la planta	27
2.2.3 Instrumentos de medición y caracterización	28
2.2.4 Preparación del electrolito polimérico en gel	28
2.3 Diseño estructural	28
3 Desarrollo experimental	30
3.1 Componentes físicos	30
3.2 Fabricación del electrodo	33

4	Resultados de la caracterización integral de los electrodos fabricados	37
4.1	Caracterización de resistencia eléctrica y uniformidad de las formulaciones	38
4.2	Caracterización morfológica y elemental mediante SEM/EDX	40
4.2.1	Espesor del electrodo	40
4.2.2	Morfología superficial por SEM	40
4.2.3	Caracterización EDX (composicional)	42
4.3	Caracterización EIS (Impedancia electroquímica)	42
4.4	Análisis comparativo de resistencia eléctrica	43
5	Caracterización electroquímica avanzada de las formulaciones seleccionadas	44
5.1	Caracterización EIS y efecto de aplicación de voltaje en supercapacitores ensamblados (muestra M11)	44
5.1.1	Análisis de la magnitud y fase de la impedancia	46
5.1.2	Evolución de la capacitancia real y comportamiento en Nyquist . . .	46
6	Discusión y análisis comparativo final	47
7	Conclusiones y Recomendaciones	49
7.1	Conclusiones	49
7.2	Recomendaciones	50
	References	52
	Anexos	54

List of Figures

1	Modelos de circuitos equivalentes típicos usados para representar sistemas electroquímicos. Imagen adaptada de Lazanas y Prodromidis [3].	20
2	Ejemplo de curvas de Nyquist utilizadas en el análisis de impedancia electroquímica. Imagen adaptada de Lazanas y Prodromidis [3].	21
3	Supercapacitor tipo sándwich: esquema de ensamblaje con dos electrodos, separador y colector de corriente de aluminio.	29
4	Conectores kelvin clip utilizados para la medición electroquímica.	29
5	Adaptador para celda tipo botón (<i>coin cell</i>) CR2032 destinado a la conexión eléctrica con los instrumentos de medición.	30
6	Incorporación y mezcla del carbón activado en el aglutinante (<i>binder</i>).	34
7	Ajuste de viscosidad de la pasta de carbón activado en el mortero de laboratorio.	34
8	Diseño esquemático y dimensiones geométricas de la rasqueta dosificadora utilizada en el sistema <i>Doctor Blade</i>	35
9	Colocación de la lámina de aluminio sobre la máquina CNC y disposición de la suspensión para el extendido.	35
10	Interfaz del firmware Klipper para el control automatizado del sistema <i>Dr. Blade</i>	36
11	Ejecución del barrido automatizado sobre la lámina de aluminio mediante la rasqueta dosificadora en la máquina CNC.	36
12	Láminas de aluminio recubiertas con las diferentes formulaciones durante la fase de reposo y estabilización a temperatura ambiente.	37
13	Micrografía SEM de la muestra M10 sin sustrato de aluminio a 6700× de aumento. Se observa una distribución granular típica del carbón activado YEC-8B entrelazado por la matriz polimérica biodegradable [22].	41
14	Micrografía SEM de la muestra M11 sin sustrato de aluminio a 6600× de aumento. Se evidencia la incorporación intersticial de láminas de grafito como aditivo conductor tridimensional [21].	41
15	Comparación de la magnitud de la impedancia ($ Z $) en función de la frecuencia para el ensamblado 1 con electrodos de la muestra M11, antes y después de aplicar voltaje.	44
16	Comparación del ángulo de fase en función de la frecuencia para el Ensamblado 1 con electrodos de la muestra M11, antes y después de la inducción de voltaje.	45
17	Evolución de la capacitancia real (C') frente a la frecuencia del Ensamblado 1 (muestra M11) en ambas condiciones operativas.	45
18	Diagramas de Nyquist comparativos del ensamblado 1 (muestra M11) antes y después de inducir voltaje.	46
19	Diagramas de Nyquist comparativos del ensamblado 1 (muestra M11) antes y después de inducir voltaje.	47
20	Inicialización de librerías principales y ventana principal de la interfaz gráfica en PyQt5 para el control del medidor LCR.	54
21	Configuración de lata de datos, elementos de la interfaz y botones de control del barrido en la aplicación.	54
22	Diseño del panel gráfico y configuración de la comunicación instrumental vía PyVISA con el medidor LCR BK Precision 894.	55

23	Rutinas de inicialización del barrido de frecuencia logarítmica y limpieza de gráficos en tiempo real.	55
24	Configuración de escalas logarítmicas, formateadores de ejes y renderizado dinámico del lienzo en Matplotlib.	56
25	Bucle principal de adquisición de datos por puerto de comunicación y llenado dinámico de la tabla de valores.	56
26	Control de excepciones, actualización del autoscroll y manejo de estados de finalización del barrido experimental.	57
27	Rutina de exportación de los datos adquiridos a formato estructurado en Excel y cierre seguro de puertos.	57
28	Carbón activado de alta pureza YEC-8B utilizado como material activo en los electrodos.	58
29	Almidón soluble empleado como biopolímero aglutinante en las formulaciones optimizadas.	58
30	Máquina CNC ejecutando el barrido automatizado con la cuchilla dosificadora a 1 milímetro de espesor sobre el sustrato.	59
31	Preparación y colocación manual preliminar de la lechada (*slurry*) sobre la mesa de trabajo de la CNC.	59
32	Vista general de la estación de trabajo que incluye el software de control de la CNC, balanza analítica y herramientas de preparación.	60
33	Conexión física de las celdas de prueba utilizando cables tipo Kelvin Clip acoplados al medidor LCR.	60
34	Banco de pruebas integrado con el software en Python y el medidor LCR para la adquisición de impedancia en coin-cells.	61
35	Componentes internos y despiece de un electrodo fabricado junto con los elementos de ensamblaje de la celda tipo coin-cell CR2032.	61
36	Interfaz de control de movimiento y consola de comandos del firmware Klipper para la operación de la máquina CNC.	62
37	Panel de macros programados en el sistema Klipper (destacando el macro DR.BLADE) para estandarizar los barridos.	62

List of Tables

1	Nomenclatura y abreviaturas utilizadas en el presente trabajo.	12
2	Componentes comúnmente utilizados para fabricar electrodos de supercapacitores.	18
3	Materiales activos y aglutinantes empleados en electrodos de supercapacitores.	18
4	Parámetros de la ecuación (1).	22
5	Variables de la ecuación (3).	22
6	Componentes de la ecuación (4).	23
7	Variables de la ecuación (5).	23
8	Parámetros y técnicas empleadas para la caracterización de los electrodos con el medidor LCR BK Precision 894.	28
9	Resumen de materiales e insumos activos.	31
10	Resumen de solventes, colectores de corriente y encapsulado.	32
11	Equipos e instrumentos de laboratorio utilizados en la fabricación y caracterización.	33
12	Matriz de diseño experimental y parámetros de procesamiento de las 12 muestras.	38
13	Resumen comparativo de resistencia eléctrica de las doce formulaciones de electrodos ordenadas por muestra.	39
14	Clasificación de sostenibilidad y evaluación cualitativa de la adherencia al colector de corriente.	39
15	Resultados cuantitativos del análisis elemental por EDX de las muestras sin sustrato de aluminio.	42
16	Resumen comparativo de resistencia eléctrica superficial de las doce formulaciones de electrodos.	43

Nomenclatura y Abreviaturas

A continuación, se presentan las abreviaturas y nomenclaturas utilizadas en este trabajo:

Table 1: Nomenclatura y abreviaturas utilizadas en el presente trabajo.

Símbolo / Sigla	Significado / Descripción
A	Área superficial efectiva del electrodo (m^2)
C	Capacitancia del supercapacitor o en función de la frecuencia (F)
C_s	Capacitancia específica (F/g)
d	Distancia efectiva de separación de carga (m)
E	Energía almacenada (J)
E_s	Densidad de energía específica (Wh/kg)
f	Frecuencia de la señal alterna (Hz)
I	Corriente de carga/descarga (A)
m	Masa del electrodo activo (kg o g)
Δt	Tiempo de descarga (s)
V	Voltaje aplicado (V)
ΔV	Rango de voltaje durante descarga (V)
$ Z $	Magnitud de la impedancia compleja (Ω)
Z''	Parte imaginaria de la impedancia compleja (Ω)
ε_0	Permitividad del vacío (8.85×10^{-12} F/m)
ε_r	Permitividad relativa del electrolito
AC	Carbón activado (<i>Activated Carbon</i>)
CMC	Carboximetilcelulosa sódica
CV	Voltamperometría cíclica
EDLC	Condensador de doble capa eléctrica
EIS	Espectroscopía de impedancia electroquímica
GCD	Carga-descarga galvánica
IPA	Alcohol isopropílico
NMP	N-metil-2-pirrolidona
PVDF	Fluoruro de polivinilideno
YEC-8B	Carbón activado de alta pureza (Kuraray Co.)

1 Introducción

En la actualidad, la creciente demanda energética global y la necesidad de reducir el impacto ambiental asociado al uso de combustibles fósiles han impulsado el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía más eficientes, sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Los supercapacitores, también conocidos como ultracapacitores, se han consolidado como una de las soluciones más prometedoras en este campo debido a sus ventajas frente a las baterías tradicionales, ofrecen una alta densidad de potencia (hasta 10 kW/kg), tiempos de carga-descarga rápidos (milisegundos a segundos) y una larga vida útil, alcanzando más de un millón de ciclos. A diferencia de las baterías, que almacenan energía a través de reacciones químicas reversibles, los supercapacitores funcionan principalmente mediante mecanismos físicos, como la formación de la doble capa eléctrica (EDLC), y procesos pseudocapacitivos relacionados con reacciones de óxido-reducción en la superficie de los electrodos [2, 3].

Sin embargo, un obstáculo crítico en la tecnología actual radica en la dependencia de materiales no renovables y contaminantes tanto para los electrodos como para los colectores de corriente. Aunque los carbones activados, grafenos y óxidos metálicos tradicionales cumplen bien su función, su producción industrial exige procesos complejos, un consumo energético elevado y una considerable generación de desechos. A este problema se le une la crisis global por el manejo de residuos electrónicos, impulsada porque la mayoría de los componentes de estos dispositivos carecen de biodegradabilidad o de un proceso sencillo de reciclaje [2].

Frente a esta problemática, el diseño de supercapacitores biodegradables surge como una alternativa innovadora y sostenible. La incorporación de materiales de origen natural, como almidón, celulosa, lignina, semillas de dátil o residuos agrícolas, como precursores de carbones activados, permite obtener electrodos con alta área superficial y buenas propiedades eléctricas [5, 6]. Por ejemplo, estudios recientes han demostrado que carbones activados obtenidos mediante procesos de activación física (como la exposición a CO₂ o vapor) pueden alcanzar capacitancias específicas superiores a 300 F/g, mientras que el uso de estructuras de grafeno derivadas de biomasa ha permitido mejorar la flexibilidad y la estabilidad mecánica de los dispositivos [6, 2].

Este proyecto tiene como objetivo el diseño y análisis de electrodos biodegradables para supercapacitores, explorando materiales derivados de biomasa y técnicas de activación física que permitan reducir la huella ambiental del dispositivo sin comprometer su desempeño. Para ello, se considerarán aspectos como la estructura porosa de los materiales, su capacidad de conducción eléctrica, su compatibilidad con electrolitos tipo gel y su comportamiento electroquímico en pruebas como la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) [3].

El presente trabajo se fundamenta en investigaciones recientes como las de Ahmad et al. [5], quienes utilizaron semillas de dátil para obtener carbones activados de alta porosidad; Wang et al. [6], quienes diseñaron grafeno tridimensional derivado de almidón mediante un proceso simple y escalable, y Aldama Amado [7], quien desarrolló técnicas de electrodeposición de óxidos metálicos sobre sustratos de carbono para mejorar la capacitancia de los electrodos.

1.1 Justificación

El creciente consumo energético global, junto con la necesidad urgente de reducir la huella ambiental de los dispositivos electrónicos, ha impulsado el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía más sostenibles. Dentro de este contexto, los supercapacitores se han consolidado como una alternativa estratégica frente a las baterías convencionales, debido a su alta densidad de potencia (>10 kW/kg) y su vida útil superior al millón de ciclos [2]. A pesar de estas ventajas, enfrentamos una limitación estructural importante, la manufactura de los electrodos sigue dependiendo en exceso de materiales no biodegradables, tales como metales pesados o polímeros derivados del petróleo, lo que entra en contradicción directa con los objetivos ecológicos de estos sistemas.

Este inconveniente cobra especial fuerza en el contexto ecuatoriano. Según registros del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [14], el país produce anualmente más de 13 000 toneladas de desechos tecnológicos, de las cuales se recicla menos del 4%. Frente a esta realidad, el diseño de electrodos biodegradables representa una respuesta necesaria, tanto para reducir el impacto ambiental como para promover el aprovechamiento de residuos agroindustriales subutilizados.

La importancia de abordar esta necesidad se justifica desde varias perspectivas. En primer lugar, investigaciones recientes han demostrado la viabilidad de utilizar materiales bio-derivados, como carbones activados a partir de biomasa, los cuales pueden alcanzar capacitancias específicas superiores a 130 F/g [5] y superficies específicas mayores a 1500 m²/g mediante arquitecturas tridimensionales de grafeno bio-orientado [6]. En segundo lugar, la modificación superficial con aglutinantes de base celulósica ha permitido mantener la integridad mecánica sin comprometer la biodegradabilidad [7], consolidando así un camino técnico viable hacia dispositivos más ecológicos.

El proyecto propuesto pretende cerrar tres brechas tecnológicas: la falta de protocolos estandarizados para integrar materiales biodegradables en supercapacitores funcionales [4], la escasa investigación sobre materias primas locales con potencial electroquímico, cuyo excedente productivo en la provincia de Santa Elena supera las 4 200 toneladas anuales [13], y la necesidad de aplicar metodologías avanzadas de caracterización, como la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), adaptadas a materiales bio-orientados [3].

Esperamos que este proyecto aporte soluciones tangibles a través de tres ejes principales:

- **Técnica:** formulación de electrodos que alcanzan densidades de energía superiores a 15 Wh/kg —superando el umbral base para entornos rurales indicado por [2]—, combinando aditivos celulósicos y fluoropoliméricos que optimizan tanto la dispersión como la adherencia del material activo.
- **Ambiental:** uso de carboximetilcelulosa sódica (CMC) en un medio acuoso, evitando el empleo masivo de disolventes orgánicos agresivos durante buena parte del proceso y disminuyendo de forma directa la huella ecológica de la manufactura.
- **Económica:** establecimiento de parámetros para una producción escalable, con costos hasta un 30% inferiores respecto a tecnologías actuales, gracias al uso de materias primas accesibles y sustratos de aluminio comercial.

Finalmente, este proyecto se alinea con varias prioridades estratégicas nacionales, como la transición hacia una economía verde, la promoción del valor agregado en sectores agrícolas

y el fortalecimiento de la soberanía energética. Del mismo modo, esta propuesta se conecta de manera directa con las metas globales de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), apuntando al ODS 7, centrado en energía asequible y limpia; al ODS 9, enfocado en innovación e infraestructura industrial, y al ODS 12, sobre producción y consumo responsables, consolidando una alternativa tecnológica con raíces locales y proyección internacional.

1.2 Panorama actual

El almacenamiento avanzado de energía ha crecido a un ritmo acelerado en los últimos años, impulsado fuertemente por la urgencia de combatir el cambio climático, optimizar la eficiencia energética y dejar atrás los combustibles fósiles [2]. En este contexto, los supercapacitores han emergido como una solución tecnológica prometedora, destacando por su alta densidad de potencia, rápidos tiempos de carga y descarga, y larga vida útil [2]. No obstante, su adopción a gran escala enfrenta limitaciones críticas relacionadas con la sostenibilidad de los materiales utilizados, particularmente en la fabricación de electrodos y colectores de corriente [4].

Actualmente, la mayoría de los supercapacitores comerciales emplean carbones activados convencionales, electrolitos líquidos y colectores metálicos como aluminio o níquel. A pesar de su buen rendimiento, dichos materiales arrastran inconvenientes económicos y ecológicos considerables, destacando la acumulación de basura tecnológica no biodegradable y los elevados costos de reciclaje [2]. Todo esto ha motivado la búsqueda de opciones apoyadas en fuentes renovables y métodos sostenibles [2].

Dentro de la investigación científica, diversos trabajos recientes confirman las ventajas de aprovechar la biomasa como materia prima para construir electrodos eficientes [2]. Por ejemplo, diversos estudios han obtenido carbones activados altamente porosos a partir de semillas de dátil utilizando activación física con CO_2 , alcanzando capacitancias superiores a 130 F/g [5]. Paralelamente, se han diseñado redes tridimensionales de grafeno basadas en almidón, logrando densidades energéticas competitivas con una estabilidad mecánica notable [6].

Para comprobar la efectividad de estos avances, el respaldo de una caracterización electroquímica profunda resulta indispensable [2]. En diversos estudios se destaca el uso de técnicas como la voltametría cíclica, la EIS y la carga-descarga galvanostática para evaluar parámetros críticos como la capacitancia específica, la resistencia interna y el ciclo de vida [8]. Asimismo, se ha demostrado que recubrir electrodos de carbono con óxidos metálicos (MnO_2 , CoO) puede aumentar la capacitancia a más de 200 F/g, aunque este enfoque enfrenta desafíos de escalabilidad [7].

Asimismo, empresas líderes impulsan el desarrollo comercial de tecnologías sostenibles:

- **Skeleton Technologies** (Estonia/Alemania) comercializa supercapacitores basados en Curved Graphene, los cuales aumentan la densidad energética en un 72% y reducen la resistencia interna, lo que los hace especialmente útiles en centros de datos [2].
- **Nawa Technologies** (Francia) fabrica electrodos basados en nanotubos de carbono alineados verticalmente (VACNT), logrando multiplicar hasta por 5 la potencia y aplicando métodos escalables de tipo *roll-to-roll* [4].

- **Greenfluidics** (México) una empresa emergente de la región latinoamericana, investiga nanocompuestos bioactivos orientados a electrodos ecológicos, a pesar de que todavía no alcanza una biodegradabilidad total en sus prototipos.

Todo este movimiento tecnológico refleja un giro evidente hacia supercapacitores dotados de mayor seguridad, flexibilidad y respeto ambiental, los cuales encuentran cabida en la electrónica portátil, los sensores ecológicos y las redes de energía renovable.

Por su parte, la importancia de nuestro trabajo se fundamenta en que el cambio hacia tecnologías limpias constituye una prioridad estratégica a escala internacional. En este sentido, el desarrollo de supercapacitores sostenibles contribuye a:

- Optimizar el rendimiento y la eficiencia de las infraestructuras de almacenamiento eléctrico.
- Disminuir la producción de desechos electrónicos difíciles de reciclar e impulsar dinámicas de economía circular.
- Reducir la dependencia de materias primas críticas y no renovables.

Dichas metas guardan concordancia directa con la agenda de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), apuntando de manera primordial al ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), al ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) y al ODS 12 (Producción y consumo responsables). Además, en el contexto nacional ecuatoriano, el estudio responde a políticas de transición energética y aprovechamiento de biomasa local, fomentando la investigación en materiales bio-orientados, el desarrollo de procesos sostenibles y la viabilidad industrial.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar electrodos biodegradables mediante la síntesis de biopolímeros, formulación de pastas activas con control automático por CNC y caracterización electroquímica por EIS y CV, con el fin de configurar un dispositivo de almacenamiento energético ecológico y competitivo frente a las soluciones comerciales para supercapacitores.

1.3.2 Objetivos específicos

- Investigar materiales biodegradables con propiedades adecuadas para funcionar como electrodos en supercapacitores, priorizando aquellos derivados de residuos orgánicos como semillas, cáscaras o fibras vegetales.
- Caracterizar las propiedades estructurales y electroquímicas de los materiales obtenidos, mediante análisis de SEM, EDX e EIS, para que se comprenda su comportamiento y potencial de aplicación como electrodos.
- Diseñar una estructura de electrodo biodegradable optimizada, mediante la integración de materiales porosos, colectores de corriente compatibles y electrolitos sólidos tipo gel, para que se logre un sistema funcional, flexible y seguro para aplicaciones en supercapacitores.

- Comparar los resultados obtenidos con estudios previos y estándares del sector, mediante análisis de datos experimentales, para que se determine la relevancia, ventajas y limitaciones de la propuesta tecnológica desarrollada.

1.4 Fundamentos teóricos

Los supercapacitores, también conocidos como condensadores electroquímicos, son dispositivos diseñados para almacenar energía eléctrica mediante mecanismos distintos a los de las baterías convencionales. En lugar de basarse en reacciones químicas en volumen, los supercapacitores operan mediante la acumulación superficial de carga, lo que les permite entregar y absorber energía de forma mucho más rápida y eficiente [2, 9].

El principio de operación se fundamenta primordialmente en dos fenómenos: la capacitancia de doble capa eléctrica (EDLC) y la pseudocapacitancia. En los dispositivos de tipo EDLC, la energía queda retenida mediante la formación de una doble capa eléctrica en la interfaz electrodo-electrolito. Este efecto surge cuando los iones del electrolito se ordenan sobre la superficie conductora sin que exista una transferencia electrónica directa (proceso no farádico), lo que permite una elevada estabilidad cíclica y una larga vida útil al evitar reacciones químicas que degraden el material [2].

Por otro lado, en los supercapacitores de tipo pseudocapacitivo, el almacenamiento involucra reacciones electroquímicas superficiales reversibles (farádicas). Estas implican la transferencia de electrones entre el electrodo y los iones del electrolito, lo que confiere una mayor densidad de energía. No obstante, este mecanismo puede comprometer la durabilidad del dispositivo a largo plazo debido a los cambios estructurales que ocurren en el material activo con el ciclado [7].

Asimismo, existen los supercapacitores híbridos, los cuales combinan ambos mecanismos: un electrodo opera mediante EDLC y el contraelectrodo mediante pseudocapacitancia. Esta configuración permite alcanzar una mayor densidad de energía sin sacrificar la alta velocidad de carga y descarga característica de los sistemas EDLC [4].

En todos los casos, el diseño básico del dispositivo incluye dos electrodos (ánodo y cátodo), un electrolito que permite el flujo iónico y un separador que evita el cortocircuito directo entre los electrodos mientras permite el paso de iones. La selección adecuada de materiales tanto para el electrodo como para el colector de corriente tiene un impacto directo en la eficiencia, la estabilidad térmica y la vida útil del dispositivo.

Los electrodos son el componente clave de un supercapacitor, ya que determinan su capacidad de almacenamiento de energía, eficiencia y estabilidad cíclica. Están compuestos por materiales conductores con alta área superficial, diseñados para maximizar la formación de la doble capa eléctrica (EDLC) o facilitar reacciones pseudocapacitivas. En el presente trabajo, los electrodos se fabricaron integrando carbón activado de alta pureza (YEC-8B) con aglutinantes de base fluoropolimérica (PVDF-HFP) y celulósica (CMC), sobre sustratos de aluminio que actúan como colectores de corriente. Los principales elementos estructurales que conforman un electrodo típico se detallan en la tabla 2.

Diversos estudios han demostrado la viabilidad de obtener carbones activados a partir de residuos agrícolas, como semillas de dátil, mediante procesos de activación física con CO₂, logrando capacitancias de hasta 138 F/g [5]. Asimismo, se ha reportado el desarrollo de grafeno a partir de almidón, alcanzando áreas superficiales superiores a 1500 m²/g y una

notable flexibilidad [6], mientras que otros trabajos han explorado la electrodeposición de óxidos metálicos (MnO_2 , CoO) sobre matrices de carbón para potenciar la pseudocapacitancia, aunque con limitaciones de sostenibilidad [7].

Table 2: Componentes comúnmente utilizados para fabricar electrodos de supercapacitores.

Componente del Electrodo	Función Principal	Ejemplos utilizados
Material activo	Almacena la carga (EDLC / pseudocapacitancia)	Carbón activado, Grafeno, CNT, MnO_2 , Polianilina (PANI)
Aglutinante (Binder)	Proporciona cohesión e integridad mecánica	PVDF-HFP, CMC, PTFE, PVA, PEDOT:PSS
Solvente	Forma la suspensión homogénea (lechada)	Etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), agua destilada (H_2O), NMP
Colector de corriente	Conduce electrones hacia el circuito externo	Lámina de aluminio (Al), níquel, acero inoxidable

1.4.1 Materiales biodegradables: alternativa sostenible para electrodos

El uso de materiales biodegradables como base para electrodos representa una estrategia innovadora para reducir el impacto ambiental de los dispositivos electrónicos. La biomasa (almidón, celulosa, lignina) es abundante, renovable y puede ser transformada mediante activación física o térmica en carbones porosos con propiedades adecuadas para el almacenamiento de carga [5, 6]. En la presente investigación, la carboximetilcelulosa sódica (CMC), un biopolímero derivado de la celulosa, se emplea como aglutinante soluble en agua, aprovechando su origen renovable y su excelente dispersabilidad para minimizar el uso de solventes orgánicos.

Una síntesis de los materiales utilizados, sus métodos de activación y las propiedades alcanzadas se presenta en la tabla 3.

Table 3: Materiales activos y aglutinantes empleados en electrodos para supercapacitores.

Material	Método de activación / preparación	Propiedades destacadas
Carbón activado YEC-8B	Activación física industrial	Área superficial $\sim 1700 \text{ m}^2/\text{g}$, alta capacitancia
Carbón activado de semillas de dátil	Activación con CO_2	Capacitancia 138 F/g, estructura microporosa
Grafeno 3D derivado de almidón	Horno a 90°C , carbonización	Área superficial $1519 \text{ m}^2/\text{g}$, flexibilidad mecánica
Electrodos con aglutinante CMC	Dispersión en agua destilada	Mejora de uniformidad, base celulósica biodegradable

La biodegradabilidad de estos materiales ha sido evaluada bajo diversas condiciones. En particular, se ha reportado una degradación superior al 80 % en 90 días bajo condiciones estándar para materiales basados en almidón [7]. Asimismo, estudios recientes han mostrado que los biocarbonos derivados de celulosa pueden descomponerse completamente en ambientes aeróbicos, lo que confirma su potencial para aplicaciones sostenibles [6].

El almacenamiento de energía en supercapacitores con electrodos biodegradables ocurre principalmente mediante:

- **Formación de la doble capa eléctrica (EDLC):** Acumulación de iones en la interfaz electrodo-electrolito, típica de carbones porosos y grafeno derivado de biomasa [2, 6]. En el presente proyecto, el almacenamiento se fundamenta principalmente en este mecanismo electrostático, empleando PVDF-HFP y CMC como aglutinantes para mantener la integridad mecánica del electrodo sin recurrir a óxidos metálicos adicionales, favoreciendo así la sostenibilidad del sistema.

- **Pseudocapacitancia:** Reacciones redox superficiales y reversibles en materiales que combinan carbono activo con aditivos funcionales u óxidos metálicos, las cuales incrementan la densidad energética a expensas de una mayor complejidad en la biodegradación y reciclaje de los dispositivos [7, 8].

1.4.2 Evaluación de electrodos biodegradables

La evaluación del desempeño electroquímico de los electrodos biodegradables se realiza mediante una combinación de técnicas que permiten caracterizar su capacidad de almacenamiento, eficiencia energética, estabilidad cíclica y comportamiento frente a distintas frecuencias. Estas pruebas son fundamentales para validar la viabilidad del material desarrollado en condiciones operativas reales.

- **Voltamperometría cíclica (CV):** Consiste en aplicar un barrido de voltaje en un rango definido y registrar la corriente resultante. Permite evaluar la reversibilidad de las reacciones redox, la presencia de procesos pseudocapacitivos y estimar la capacitancia específica a través del área bajo la curva. Se realizan barridos a diferentes velocidades (5, 10, 50, 100 mV/s) para estudiar la respuesta del sistema en función del tiempo de carga [8].
- **Carga-descarga galvánica (GCD):** Esta técnica consiste en aplicar una corriente constante y registrar la caída de voltaje en función del tiempo. Permite calcular la capacitancia específica (C_s), la densidad de energía (E), la eficiencia coulombica (η) y la resistencia interna equivalente (R_{ESR}). Se considera una de las pruebas más representativas del comportamiento real del dispositivo [9].
- **Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS):** Mediante la aplicación de una señal alterna de pequeña amplitud sobre un rango de frecuencias (típicamente desde mHz hasta MHz), esta técnica permite desacoplar los distintos fenómenos resistivos y capacitivos del dispositivo. Facilita la determinación de la resistencia serie (R_s), la resistencia de transferencia de carga (R_{ct}), los procesos de difusión iónica en la estructura porosa (impedancia de Warburg) y la constante de tiempo asociada a la respuesta del sistema [2].

En estudios previos, los materiales derivados de biomasa han mostrado capacitancias específicas que oscilan entre 100 y 300 F/g, dependiendo de factores como el área superficial, el tamaño de poro, la conductividad del material y el método de activación empleado [5]. Estos valores sirven como referencia para comparar el desempeño de los electrodos propuestos en el presente proyecto.

1.4.3 Fundamentos de la espectroscopía de impedancia electroquímica

La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica de caracterización ampliamente empleada en el estudio de sistemas electroquímicos complejos, especialmente en dispositivos de almacenamiento de energía como los supercapacitores. Su utilidad reside en la capacidad de desacoplar y analizar distintos procesos internos del sistema, desde la transferencia de carga en el electrodo hasta la difusión de iones en la matriz porosa, evaluando su respuesta frente a una excitación alterna en un amplio rango de frecuencias [3].

El principio de la EIS consiste en aplicar una señal sinusoidal de pequeña amplitud (ya

sea de corriente o de potencial) a un sistema electroquímico en estado de equilibrio o cuasiestacionario. Posteriormente, se mide la respuesta sinusoidal resultante (potencial o corriente, respectivamente) y se analiza la relación entre ambas. Este análisis permite calcular la impedancia compleja del sistema en función de la frecuencia. A través de esta información, es posible descomponer la respuesta global en contribuciones individuales asociadas a distintos fenómenos físico-químicos, cada uno con su propia constante de tiempo característica [3].

Uno de los aspectos más relevantes de esta técnica es su representación mediante circuitos eléctricos equivalentes. Dichos modelos, compuestos por resistencias, capacitores, inductores y elementos distribuidos como los denominados elementos de fase constante (CPE), permiten interpretar de forma cuantitativa los procesos que ocurren dentro del dispositivo. Por ejemplo, una resistencia representa la oposición óhmica del electrolito, mientras que un capacitor modela la formación de la doble capa eléctrica en la interfaz electrodo-electrolito. La figura 1 muestra varios ejemplos de estos circuitos comúnmente utilizados en el análisis de supercapacitores [3].

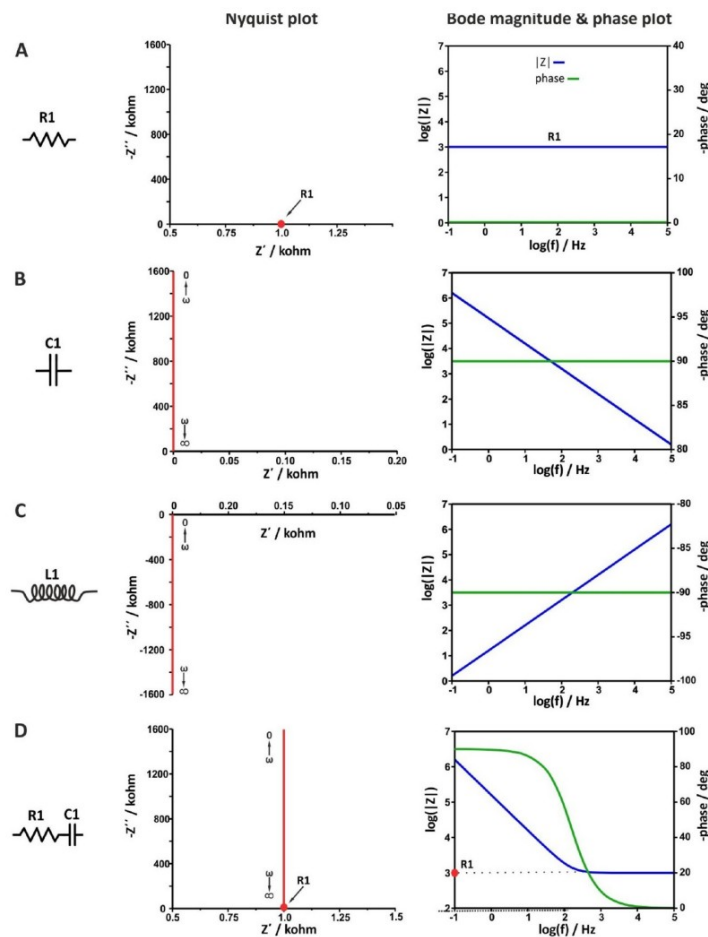


Figure 1: Modelos de circuitos equivalentes típicos usados para representar sistemas electroquímicos. Imagen adaptada de Lazanas y Prodromidis [3].

En supercapacitores, la EIS permite identificar parámetros clave como la resistencia interna del dispositivo, la capacitancia a distintas frecuencias y la eficiencia en el transporte de carga. Estos parámetros son fundamentales para evaluar el desempeño del electrodo en términos de almacenamiento, estabilidad y velocidad de respuesta. Además, la EIS es

sensible a la morfología superficial del electrodo, por lo que resulta útil para comparar diferentes tratamientos o composiciones de materiales activos [10].

Un aspecto clave que distingue a la EIS frente a otras técnicas electroquímicas es su resolución temporal. La técnica es capaz de discriminar procesos que ocurren en escalas de tiempo notablemente dispares (desde microsegundos hasta varios minutos), abarcando desde reacciones rápidas de transferencia electrónica hasta fenómenos de difusión lenta. Esta versatilidad convierte a la EIS en una herramienta integral para caracterizar no solo los materiales del electrodo, sino también el sistema completo de almacenamiento energético [3].

El análisis de los datos de EIS suele representarse mediante diagramas de Nyquist o de Bode. La morfología y evolución de estas curvas revelan detalles cuantitativos sobre la resistencia serie, la transferencia de carga, la presencia de fenómenos difusivos y la existencia de reacciones superficiales. Para este proyecto, estos elementos son esenciales para validar la eficiencia de los electrodos desarrollados y correlacionar su comportamiento con la estructura y composición de los materiales utilizados. La figura 2 muestra ejemplos típicos de curvas de Nyquist utilizadas para analizar estos fenómenos [10].

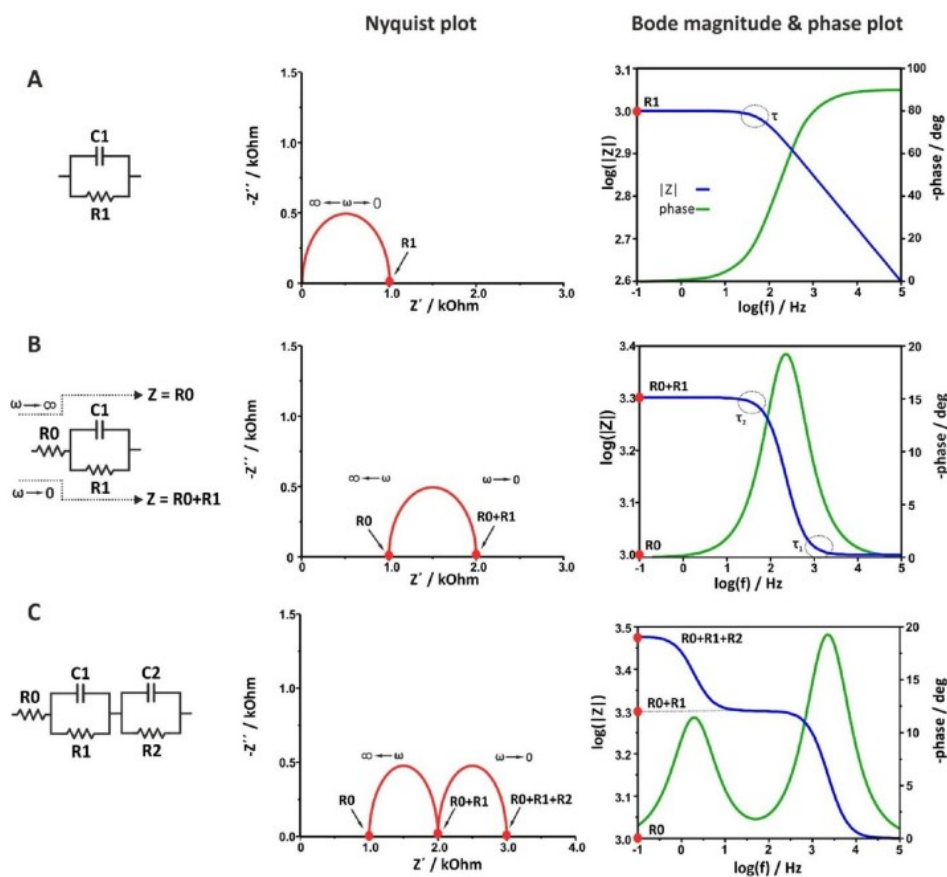


Figure 2: Ejemplo de curvas de Nyquist utilizadas en el análisis de impedancia electroquímica. Imagen adaptada de Lazanas y Prodromidis [3].

1.4.4 Capacitancia de un EDLC

El almacenamiento de carga en supercapacitores de doble capa eléctrica (EDLC) puede modelarse bajo la aproximación de un capacitor plano. Este modelo considera que los iones del electrolito se acumulan en la superficie del electrodo, formando una doble capa que almacena energía electrostática sin transferencia electrónica (procesos no faradaicos). La capacitancia resultante se calcula mediante la ecuación (1):

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d} \quad (1)$$

Table 4: Parámetros de la ecuación (1).

Símbolo	Descripción
C	Capacitancia (F)
ε_r	Permitividad relativa del electrolito
ε_0	Permitividad del vacío (8.854×10^{-12} F/m)
A	Área superficial efectiva del electrodo (m^2)
d	Distancia efectiva de separación de carga (m)

Por otro lado, a partir de los datos de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), la capacitancia compleja o efectiva en función de la frecuencia se determina mediante la ecuación (2):

$$C(f) = \frac{-Z''}{2\pi f |Z|^2} \quad (2)$$

1.4.5 Energía almacenada en un supercapacitor

La energía acumulada (E) en un supercapacitor se relaciona con su capacitancia y con el voltaje de operación aplicado mediante la ecuación (3):

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3)$$

Table 5: Variables de la ecuación (3).

Símbolo	Descripción
E	Energía almacenada (J)
C	Capacitancia del supercapacitor (F)
V	Voltaje o potencial aplicado (V)

1.4.6 Densidad de energía

La densidad de energía específica (E_s), parámetro clave para comparar el desempeño entre dispositivos, se determina mediante la ecuación (4):

$$E_s = \frac{E}{m} = \frac{1}{2} \frac{CV^2}{m} \quad (4)$$

donde m representa la masa del material activo en los electrodos. Si bien el cálculo analítico directo arroja valores en J/g (o J/kg), comúnmente se expresa en Wh/kg (dividiendo entre 3.6) para facilitar una comparación directa con tecnologías de baterías convencionales.

Table 6: Componentes de la ecuación (4).

Símbolo	Descripción
E_s	Densidad de energía específica (Wh/kg)
C	Capacitancia del dispositivo (F)
V	Voltaje de operación (V)
m	Masa total del material activo (kg)

1.4.7 Capacitancia específica

En pruebas experimentales de carga-descarga galvanostática (GCD), la capacitancia específica (C_s) se determina a partir del perfil de descarga mediante la ecuación (5):

$$C_s = \frac{I \Delta t}{m \Delta V} \quad (5)$$

Table 7: Variables de la ecuación (5).

Símbolo	Descripción
C_s	Capacitancia específica gravimétrica (F/g)
I	Corriente aplicada durante la carga/descarga (A)
Δt	Tiempo de descarga (s)
m	Masa total del material activo (g)
ΔV	Ventana de potencial de descarga (V)

1.4.8 Normativas y sostenibilidad en el diseño de electrodos

El desarrollo de electrodos biodegradables para supercapacitores exige no solo optimizar su rendimiento electroquímico, sino también alinearse con estándares internacionales que aseguren sostenibilidad, seguridad operativa y bajo impacto ecológico. Por ello, la selección de materiales y procesos se fundamentó en las siguientes normativas:

- **ISO 14001 (Sistemas de gestión ambiental):** orienta la minimización y el control de residuos en procesos de síntesis y manufactura. Bajo este principio de producción limpia, se sustituyó el disolvente orgánico tóxico NMP (*N*-metil-2-pirrolidona) por un sistema hidroalcohólico basado en etanol y agua destilada.
- **ASTM D6400 (Estándar para plásticos biodegradables y compostables):** establece los criterios técnicos para determinar la compostabilidad de polímeros.

Este estándar respalda la elección de la carboximetilcelulosa (CMC) como aglutinante, ya que al ser un polímero de origen celulósico asegura una degradación natural en medios aeróbicos sin generar subproductos perjudiciales.

- **IEC 62368-1 (Seguridad en equipos electrónicos y tecnologías de la información):** regula los criterios de seguridad eléctrica, térmica y mecánica para dispositivos y prototipos electrónicos. Su aplicación resulta clave durante las etapas de ensamblaje, encapsulado y ensayo de los electrodos en celdas de prueba tipo botón (*coin cell*).
- **ISO 14855 (Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final):** establece la metodología estandarizada para evaluar la velocidad de descomposición y la evolución de CO₂ de materiales poliméricos en condiciones controladas. La matriz de carboximetilcelulosa (CMC) se ajusta a estos parámetros de degradabilidad debido a su estructura y origen orgánico.
- **Normativa nacional (Acuerdo Ministerial MAATE 098, 2022):** regula la gestión ambiental y el control de sustancias químicas y residuos peligrosos en el sector eléctrico y electrónico en el Ecuador. El presente trabajo cumple con esta disposición mediante la eliminación de solventes tóxicos convencionales (como la NMP) y el empleo de solventes inocuos (agua destilada y etanol), complementados con un aglutinante biodegradable en la preparación de la suspensión (*slurry*).

1.5 Marco contextual

La acumulación masiva de desechos tecnológicos representa en la actualidad un reto ambiental de proporciones globales [3]. Informes del *Global E-waste Monitor* [11] indican que la generación mundial alcanzó la cifra de 53.6 millones de toneladas de basura electrónica, habiéndose reciclado de forma correcta apenas un 17.4% de la misma. Gran parte de dichos desperdicios proviene de equipos que integran metales pesados, polímeros sintéticos y componentes de alta complejidad de procesamiento. Por su parte, los supercapacitores comerciales —a pesar de sus elevadas densidades de potencia y prolongada vida útil— continúan dependiendo de insumos no biodegradables, tales como colectores de aluminio, carbón activado de origen fósil y soluciones electrolíticas tóxicas que incrementan su huella ecológica.

A nivel global, diversas investigaciones han buscado soluciones sostenibles a partir de precursores biomásicos. Investigadores como Ahmad y colaboradores desarrollaron carbones activados a partir de residuos de semillas de dátil, logrando capacitancias de hasta 138 F/g mediante activación física con CO₂ sin agentes químicos tóxicos [5]. Asimismo, estudios liderados por Wang obtuvieron grafeno 3D a partir de almidón de maíz, alcanzando 1519 m²/g de área superficial y densidades de energía de 19.8 Wh/kg [6]. Por otro lado, trabajos previos utilizaron la electrodeposición de óxidos metálicos sobre sustratos carbonosos, elevando la pseudocapacitancia en dispositivos de prueba [7].

En la provincia de Santa Elena, se cuenta con una oferta agrícola representativa de yuca, de la cual se generan aproximadamente 4 200 toneladas anuales de cáscara, constituyendo un residuo con alto potencial como precursor de carbón activado [13]. Según datos institucionales del INIAP, la variedad local de yuca posee un contenido de amilosa idóneo para fabricar aglutinantes naturales y geles conductores [1]. A pesar de esta disponibilidad, actualmente no existen protocolos ni normativas en el Ecuador para su aprovechamiento en

tecnologías electroquímicas avanzadas, lo cual limita su aplicación industrial y académica [17].

Por otra parte, registros oficiales y sondeos locales señalan que el 82 % de los talleres de electrónica en la provincia de Santa Elena opera sin protocolos formales para gestionar o recolectar sus residuos [14, 15]. De manera simultánea, los análisis del Banco Central del Ecuador indican que la importación de materiales tecnológicos especializados para almacenamiento de energía incrementó significativamente sus costos desde 2020, limitando la producción y el desarrollo local de estos dispositivos.

En este contexto, la presente investigación integró un cambio estratégico en la selección de los biopolímeros aglutinantes. Durante las fases exploratorias iniciales (muestras M1 a M8), se evaluaron las propiedades del almidón obtenido de cultivos locales de yuca en Santa Elena, aprovechando la materia prima de la zona. No obstante, con el fin de evitar las fluctuaciones composicionales características de los almidones sin refinar y garantizar la estabilidad y reproducibilidad electroquímica en las celdas definitivas, se optó por emplear un almidón soluble comercial de grado analítico a base de papa para las muestras optimizadas (muestras M9 a M12), logrando consolidar suspensiones (*slurries*) con alta homogeneidad y estabilidad coloidal.

2 Métodos y diseño experimental

2.1 Métodos

La metodología implementada en este estudio sigue un enfoque experimental y cuantitativo de carácter aplicado, orientado al diseño, la fabricación y la evaluación funcional de electrodos biodegradables integrados en supercapacitores.

2.1.1 Metodología exploratoria

Esta etapa tuvo como propósito identificar combinaciones viables de materiales y procedimientos para la fabricación de electrodos biodegradables aplicables en supercapacitores. Esta fase inicial se centró en evaluar de forma preliminar las características fundamentales de los componentes, abarcando la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), la respuesta en voltametría cíclica (CV), los niveles de porosidad, la conductividad eléctrica y el comportamiento de biodegradabilidad [3].

Dentro de la ruta experimental desarrollada, se establecieron varias fases clave: la formulación y depósito de los electrodos empleando aglutinantes biodegradables (CMC) y de referencia sintética (PVDF-HFP), la preparación del electrolito en gel, el ensamblaje de las celdas de prueba tipo botón (*coin cell*) y la caracterización electroquímica mediante EIS y CV [3].

Las principales líneas de experimentación exploratoria comprendieron:

- Emplear PVDF-HFP como agente aglutinante sintético en electrodos con carbón activado YEC-8B, utilizando etanol como disolvente [3].
- Aplicar carboximetilcelulosa (CMC) como aglutinante biodegradable en electrodos de carbón activado YEC-8B, empleando agua destilada como medio disolvente [3].

- Evaluar el ensamblaje de los electrodos desarrollados junto con el electrolito en gel en celdas de prueba tipo botón (*coin cell*) [3].
- Comparar el desempeño físico y electroquímico entre las diferentes formulaciones y configuraciones de electrodos mediante EIS, CV, porosidad, conductividad y biodegradabilidad [3].
- Diseñar y fabricar encapsulados mediante impresión 3D para el montaje y caracterización del prototipo.

2.1.2 Investigación experimental

Esta fase constituyó el eje central de la metodología, centrada en la síntesis, diseño y validación de electrodos biodegradables a partir de carbón activado YEC-8B con aglutinantes de base fluoropolimérica y celulósica. Se controlaron variables clave para evaluar su efecto sobre el desempeño del dispositivo, tales como:

- Tipo y concentración del aglutinante: PVDF-HFP (disuelto en etanol) o CMC (disuelto en agua destilada).
- La proporción de aglutinante en relación con el carbón activado YEC-8B al momento de preparar la lechada [3].
- La clase de disolvente y la técnica de mezcla empleada (etanol para el PVDF-HFP y agua destilada para la CMC) [3].
- Los tiempos y la temperatura aplicados al secar los electrodos recubiertos sobre las láminas de aluminio [3].
- El control del peso final en cada disco de electrodo fabricado (cortados con un diámetro de 12 mm) [3].
- El procedimiento de ensamblaje al integrar el electrodo junto al separador dentro de las celdas tipo *coin cell* [3].
- La medición y análisis del comportamiento electroquímico mediante voltamperometría cíclica (CV) y espectroscopía de impedancia (EIS) [3].
- Fabricación del encapsulado de la celda mediante impresión 3D.

2.1.3 Diseño e implementación de pruebas electroquímicas

Las pruebas de caracterización se realizaron en el Laboratorio de Electrónica de la Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones. Se emplearon los siguientes equipos e instrumentos:

- **Instrumentación:** medidor LCR BK Precision 894, cables tipo kelly clip y adaptador PCB para *coin cells* CR2032. El LCR BK Precision 894 realiza barridos de impedancia de baja a alta frecuencia (20 Hz – 500 kHz) sin necesidad de potenciómetro externo.
- **Técnicas aplicadas:** nos enfocamos en la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y la voltamperometría cíclica (CV).

- **Montaje físico:** los electrodos ya terminados se integraron dentro de celdas tipo *coin cell* CR2032, vinculándolas a los equipos de prueba por medio de una placa PCB adaptada que diseñamos para asegurar un contacto firme.
- **Condiciones para EIS:** configuramos un barrido de frecuencias abarcando desde los 20 Hz hasta los 500 kHz, aplicando una señal de voltaje alterna con una amplitud de 100–500 mV.
- **Condiciones para CV:** establecimos un intervalo de voltaje que fue de -0.2 V hasta 0.8 V, evaluando diversas velocidades de barrido fijadas en 5, 10, 50 y 100 mV/s.
- **Medición de resistencia inicial:** multímetro digital en modo Ω , entre extremos del electrodo seco; 3 repeticiones con promedio.

2.2 Desarrollo experimental

El desarrollo experimental se lleva a cabo en el Laboratorio de Electrónica de la Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, constituyendo una fase clave del proyecto para la implementación del diseño previamente planteado. En esta etapa se integran, configuran y operan los componentes físicos necesarios para la fabricación, caracterización y validación de electrodos biodegradables orientados a supercapacitores de estado sólido.

2.2.1 Componentes físicos

A continuación se detallan los materiales y equipos empleados en el proceso experimental. Las características específicas de los materiales se resumen en la tabla [9](#), mientras que los equipos de laboratorio se presentan en la tabla [11](#).

2.2.2 Diseño de la planta

El concepto de planta experimental no alude a una gran instalación industrial, sino al conjunto organizado de equipos, insumos y procedimientos empleados en el laboratorio para la fabricación y caracterización de los electrodos.

El sistema operativo se compone principalmente de los siguientes elementos:

- **Estufa de laboratorio Memmert (modelo AC 3Z):** Destinada al secado y al tratamiento térmico previo de las piezas. Proporciona un control exacto de la temperatura (alcanzando los 65°C de operación), acompañada de un panel digital para regular el tiempo, luces LED indicadoras y una puerta de acero inoxidable anticorrosiva.
- **Plato calentador CAT H3:** De origen alemán y con una potencia de hasta 600 W, se utiliza para conservar la temperatura estable en las soluciones mientras se preparan tanto las suspensiones (*slurries*) como el electrolito en gel.
- **Mortero de laboratorio:** Herramienta empleada durante la fase de tritución, incorporación progresiva y mezcla manual intensiva de los polvos activos, el carbón YEC-8B, la CMC y el almidón soluble. Este sistema mecánico rudimentario pero eficaz permite asegurar la integración íntima de los componentes previo al proceso de extendido con la rasqueta (*doctor blade*).

- **Impresora 3D:** Empleada para producir los contenedores y encapsulados de los prototipos de supercapacitores, logrando geometrías personalizadas y totalmente repetibles para el montaje adecuado de las celdas de prueba tipo botón (*coin cell*).

2.2.3 Instrumentos de medición y caracterización

Table 8: Parámetros y técnicas empleadas para la caracterización de los electrodos con el medidor LCR BK Precision 894.

Aspecto	Descripción
Técnicas	Espectroscopía de impedancia EIS, SEM-EDX.
Conectores	Cable de prueba <i>kelvin clip</i> y diferentes conectores para cada técnica específica.
Conexionado	El electrodo ensamblado en <i>coin cell</i> se conecta a los instrumentos a través de una placa PCB adaptadora.
Parametrización EIS	Barrido de frecuencia de 30 Hz a 300 kHz; voltaje de excitación de 100 mV a 500 mV.
Parametrización SEM-EDX	Dependerá de los técnicos externos encargados de manejar los respectivos instrumentos (Servicios de la compañía Nanoinstrumentos, Quito, Ecuador).

2.2.4 Preparación del electrolito polimérico en gel

Para el ensamblaje de las celdas de prueba tipo botón (*coin cell*), se sintetizó un electrolito en gel biodegradable de base acuosa. La formulación consistió en disolver 0.6 g de almidón soluble como matriz polimérica y 0.6 g de sulfato de sodio (Na_2SO_4) como sal electrolítica en un volumen de 10 mL de agua destilada. A partir de las masas atómicas estándar de sus componentes (S: 32.06 g/mol, Na: 22.99 g/mol, O: 16.00 g/mol), se determinó una masa molar del Na_2SO_4 de 142.04 g/mol, lo que equivale a 0.00422 mol de soluto y establece una concentración molar efectiva de 0.42 mol/L en la solución gelatinosa, garantizando la movilidad iónica adecuada para el almacenamiento de carga no faradaica.

2.3 Diseño estructural

Un esquema básico de supercapacitor de tipo sándwich muestra dos electrodos enfrentados, separados por una delgada capa de material aislante o separador. En el contexto de este proyecto, dicho componente está impregnado con el electrolito en gel, mientras que los electrodos emplean carbón activado YEC-8B como material activo y láminas de aluminio como colectores de corriente. Ambos electrodos están conectados a terminales metálicos, lo que facilita la conexión del dispositivo a un sistema de medición externo, como se ilustra en la figura 3.

Los supercapacitores ensamblados no se pueden conectar directamente a los instrumentos de medición electroquímica que utilizan cables con conectores tipo pinza Kelvin (*kelvin clip*), como los de la figura 4.

Para solventar esta limitación, el diseño consiste en fabricar una placa de circuito impreso (PCB) adaptadora donde se aloja la celda tipo botón (*coin cell*) modelo CR2032, permi-

tiendo realizar la interfaz de conexión eléctrica entre el supercapacitor ensamblado y los conectores *kelvin clip*, tal como se muestra en la figura 5.

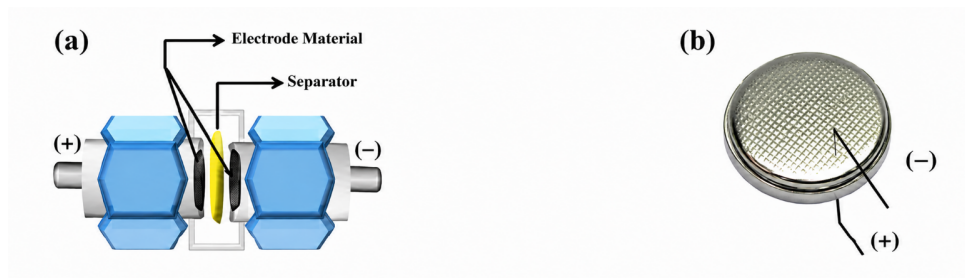


Figure 3: Supercapacitor tipo sándwich: esquema de ensamblaje con dos electrodos, separador y colector de corriente de aluminio.

En la figura 3 se presenta una estructura típica de supercapacitor en configuración tipo sándwich, donde se distinguen dos electrodos colocados cara a cara y divididos por una capa delgada de material separador. Para el presente proyecto, dicho separador corresponde al electrolito en gel sintetizado, al tiempo que los electrodos incorporan carbón activado YEC-8B como elemento activo y láminas de aluminio que cumplen la función de colectores de corriente. Ambos electrodos están conectados a terminales metálicos, lo que facilita la conexión del dispositivo a un sistema de medición externo.

Los supercapacitores ensamblados no se pueden conectar directamente a los instrumentos de medición electroquímica que utilizan cables con conectores tipo pinza Kelvin (*kelvin clip*), como los de la figura 4.



Figure 4: Conectores kelvin clip utilizados para la medición electroquímica.

Este diseño consiste en desarrollar una placa de circuito impreso (PCB) adaptadora destinada a alojar la celda tipo botón (*coin cell*) modelo CR2032, facilitando la interfaz de conexión eléctrica entre el supercapacitor ensamblado y los conectores tipo pinza Kelvin (*kelvin clip*), tal como se ilustra en la figura 5.



Figure 5: Adaptador para celda tipo botón (*coin cell*) CR2032 destinado a la conexión eléctrica con los instrumentos de medición.

3 Desarrollo experimental

La fase de desarrollo experimental constituyó el núcleo operativo del proyecto, permitiendo llevar a la práctica el diseño conceptual planteado previamente. Durante esta etapa se unificaron, configuraron y pusieron en operación los distintos componentes físicos indispensables para fabricar, caracterizar y validar los electrodos biodegradables orientados a supercapacitores de estado sólido.

Todas las actividades experimentales se llevaron a cabo en un espacio de laboratorio provisto de condiciones reguladas de temperatura (manteniéndose en un rango de 23 a 28 °C), ventilación adecuada y normas de seguridad estrictas, lo cual garantizó la repetibilidad y la fiabilidad de los datos obtenidos. Cada etapa se documenta minuciosamente para asegurar la trazabilidad del proceso.

3.1 Componentes físicos

A continuación se detallan los materiales y equipos empleados en el proceso experimental. Las características específicas de los materiales se resumen en la tabla [9](#), mientras que los equipos de laboratorio se presentan en la tabla [11](#).

Table 9: Resumen de materiales e insumos activos.

Tipo	Material	Especificaciones técnicas
Material activo	Carbón activado (YEC-8B)	• Nombre técnico: <i>Activated Carbon YEC-8B</i> • Área superficial: $\sim 1700 \text{ m}^2/\text{g}$ • Tamaño de partícula: $6\text{--}9 \mu\text{m}$ • Apariencia: polvo negro • Función: almacenamiento de carga (EDLC)
Aglutinante (Binder 1)	PVDF-HFP	• Nombre técnico: Poli(fluoruro de vinilideno-co-hexafluoropropileno) • Pureza $> 99\%$ • Punto de fusión: $160\text{--}180 \text{ }^\circ\text{C}$ • Solvente: etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) • Apariencia: polvo blanco • Función: adhesión mecánica y estabilidad
Aglutinante (Binder 2)	CMC	• Nombre técnico: Carboximetilcelulosa sódica • Origen: derivado de celulosa (renovable) • Solvente: agua destilada (H_2O) • pH en solución: $6.5\text{--}8.5$ • Apariencia: polvo blanco granular • Función: distribución uniforme (<i>binder</i> hidrofílico)

Table 10: Resumen de solventes, colectores de corriente y encapsulado.

Tipo	Material	Especificaciones técnicas
Solvente 1	Etanol	• Fórmula química: $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ • Pureza: $\geq 96\%$ • Punto de ebullición: 78.4°C • Función: disolver el PVDF-HFP y formar la suspensión
Solvente 2	Agua destilada	• Fórmula química: H_2O • Conductividad: $< 5 \mu\text{S}/\text{cm}$ • Función: disolver la CMC y formar el gel de suspensión
Sustrato	Lámina de aluminio	• Material: aluminio (Al) • Espesor: $15\text{--}25 \mu\text{m}$ (lámina comercial) • Función: conducción eléctrica hacia el circuito externo
Encapsulado	Prototipo impreso en 3D	• Material de impresión: PLA / ABS • Función: contener y proteger la celda tipo botón (<i>coin cell</i>) ensamblada • Método: modelado por deposición fundida (FDM) • Diseño: personalizado para celda tipo botón (<i>coin cell</i>) CR2032
Encapsulado 2	Celda tipo botón CR2032	• Material: acero inoxidable 316L • Componentes internos: muelle ondulado ($15.4 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$) • Función: encapsulado metálico de cierre hermético para pruebas electroquímicas

Table 11: Equipos e instrumentos de laboratorio utilizados en la fabricación y caracterización.

Equipo / Instrumento	Descripción técnica	Función
Estufa Memmert AC 3Z	Control manual de temperatura hasta 65 °C, acero	Secado de electrodos (60–80 °C, 2–4 h)
Base calefactora	600 W, 115 V AC; control de temperatura	Disolución de aglutinantes en la suspensión
Agitador magnético	Velocidad variable; compatible con base calefactora	Agitación de la suspensión durante 40–60 min
Balanza analítica	Precisión de ± 0.0001 g	Pesaje exacto de carbón activado y aglutinante
Medidor LCR BK Precision 894	Frecuencia: 20 Hz – 500 kHz; res. 0.01 m Ω	Medición de impedancia electroquímica (EIS)
Multímetro digital	Modo Ω (ohmímetro); resolución 0.1 Ω	Medición de resistencia del electrodo seco
Impresora 3D (FDM)	Resolución de capa: 0.1–0.3 mm; filamento PLA/ABS	Fabricación de encapsulados del prototipo
Rasqueta dosificadora (<i>doctor blade</i>)	Apertura ajustable en mils	Depósito uniforme sobre lámina de aluminio
Punzón metálico (12 mm)	Acero, diámetro 12 mm	Extracción de discos circulares de electrodo
Cables <i>kelvin clip</i>	4 terminales; compatible con LCR BK 894	Conexión eléctrica entre celda e instrumento

3.2 Fabricación del electrodo

El proceso de fabricación del electrodo se realizó mediante una metodología controlada en etapas secuenciales, prescindiendo de sonicator y compensando su ausencia con tiempos de agitación extendidos, un recubrimiento automatizado por control numérico y una etapa de compactación mecánica. La secuencia experimental completa es la siguiente:

Etapas 1 – Preparación del aglutinante (*binder*): Se evaluaron diferentes formulaciones según el tipo de aglutinante utilizado. Metodológicamente, el proyecto se dividió en dos fases en cuanto a los biopolímeros: para las primeras pruebas exploratorias (muestras M1 hasta M8) se empleó almidón de yuca de origen local posteriormente, para estandarizar y perfeccionar la red de percolación en las formulaciones avanzadas y optimizadas (desde la muestra M9 hasta la M12), se utilizó un almidón soluble comercial de grado analítico a base de papa (marca TM MEDIA, CAS 9005-84-9) [2]. Los casos evaluados comprenden:

- **Caso A – PVDF-HFP (formulación fluoropolimérica):** Colocar el PVDF-HFP en un vaso de precipitados, añadir alcohol etílico o isopropílico (≈ 10 mL) y agitar magnéticamente durante **20–30 minutos** para disolver el polímero.
- **Caso B – CMC (formulación celulósica):** Añadir la CMC en agua destilada **lentamente** en pequeñas porciones para evitar la formación de grumos, y agitar magnéticamente durante **30–40 minutos** hasta obtener un gel homogéneo.
- **Caso C – PVDF-HFP + CMC (formulación mixta):** Disolver por separado el PVDF-HFP en alcohol y la CMC en agua destilada. Mezclar ambas soluciones en un solo vaso de precipitados y agitar durante **30 minutos adicionales**.
- **Caso D – CMC + Grafito (con almidón soluble):** Para las muestras M9 a M11, se disolvió el almidón soluble de papa junto con la CMC en agua destilada a temperatura controlada, incorporando el grafito y el carbón activado mediante agitación prolongada para asegurar la uniformidad de la suspensión.

Etapla 2 – Incorporación del carbón activado: Pesar el carbón activado YEC-8B con la balanza analítica según la proporción definida, añadirlo de forma gradual sobre la solución del aglutinante en porciones pequeñas y mezclar continuamente durante 10 minutos para asegurar su correcta dispersión.



Figure 6: Incorporación y mezcla del carbón activado en el aglutinante (*binder*).

Etapla 3 – Ajuste de viscosidad: Antes de proceder al recubrimiento, se verifica visualmente la consistencia de la suspensión: si es correcta (pasta uniforme) se avanza a la siguiente fase, si presenta un exceso de espesor, se añaden gradualmente pequeños volúmenes de agua destilada mediante un goteo controlado en el mortero.



Figure 7: Ajuste de viscosidad de la pasta de carbón activado en el mortero de laboratorio.

Etapla 4 – Recubrimiento automatizado del electrodo (*Doctor Blade* por CNC): Para un control más estandarizado del espesor de las películas activas sobre los colectores

de aluminio y mitigar el error humano, se implementó un sistema automatizado adaptando una herramienta rasqueta dosificadora (*doctor blade*) al cabezal de una máquina CNC de precisión.

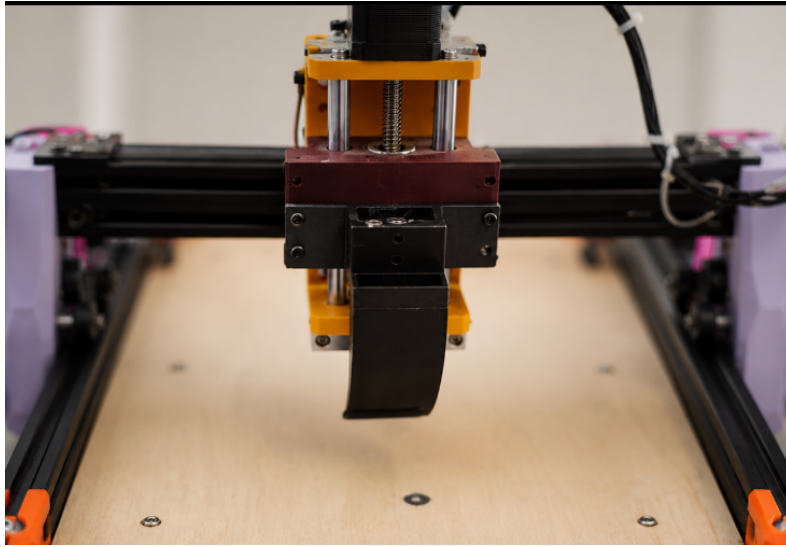


Figure 8: Diseño esquemático y dimensiones geométricas de la rasqueta dosificadora utilizada en el sistema *Doctor Blade*.

Etap 5 – Aplicación del recubrimiento: El diseño de la rasqueta dosificadora (figura 8) cuenta con un perfil optimizado que permite regular con exactitud la altura de paso. La lámina de aluminio comercial se fijó sobre la mesa de trabajo mediante soportes laterales para evitar ondulaciones superficiales. Posteriormente, se depositó la suspensión en un extremo del sustrato.



Figure 9: Colocación de la lámina de aluminio sobre la máquina CNC y disposición de la suspensión para el extendido.

Etap 6 – Uso del firmware Klipper: Después de depositar la suspensión en un extremo del sustrato, se ejecutó el macro personalizado DR_BLADE bajo el firmware Klipper de control de la máquina CNC para lograr un barrido más preciso.

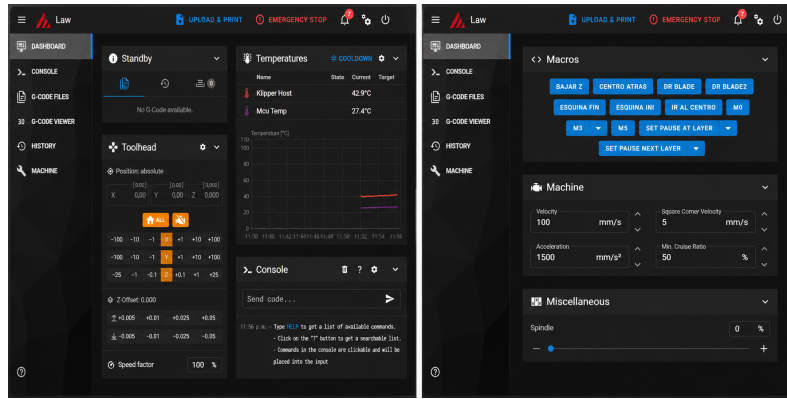


Figure 10: Interfaz del firmware Klipper para el control automatizado del sistema *Dr. Blade*.

Etap 7 – Extensión de la película a 1 mm: Como se ilustra en la figura 11, el cabezal realizó un barrido lineal sobre el eje Y a una velocidad constante de 600 mm/min, manteniendo la apertura de la rasqueta ajustada a 1 mm. Este avance mecánico uniforme obligó al fluido a distribuirse homogéneamente, generando un recubrimiento plano, continuo y libre de las variaciones de presión típicas del arrastre manual.

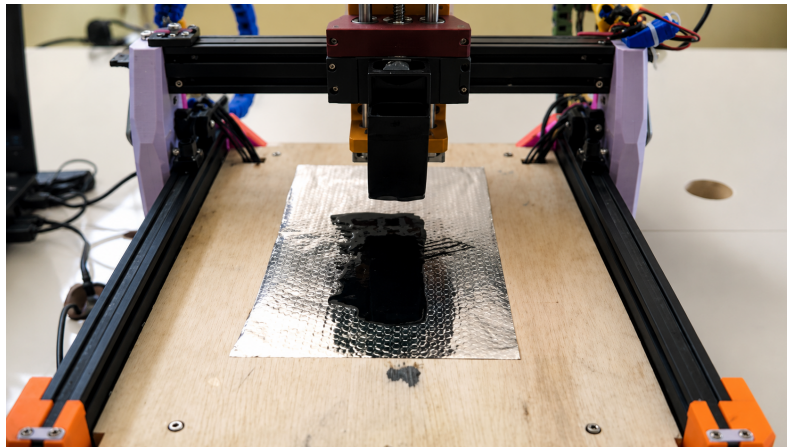


Figure 11: Ejecución del barrido automatizado sobre la lámina de aluminio mediante la rasqueta dosificadora en la máquina CNC.

Etap 8 – Reposo y estabilización a temperatura ambiente: Inmediatamente después de finalizar el barrido automatizado con la rasqueta dosificadora en la máquina CNC, las láminas recubiertas se dispusieron sobre una superficie plana horizontal para someterlas a una fase de reposo de 24 horas a temperatura ambiente.

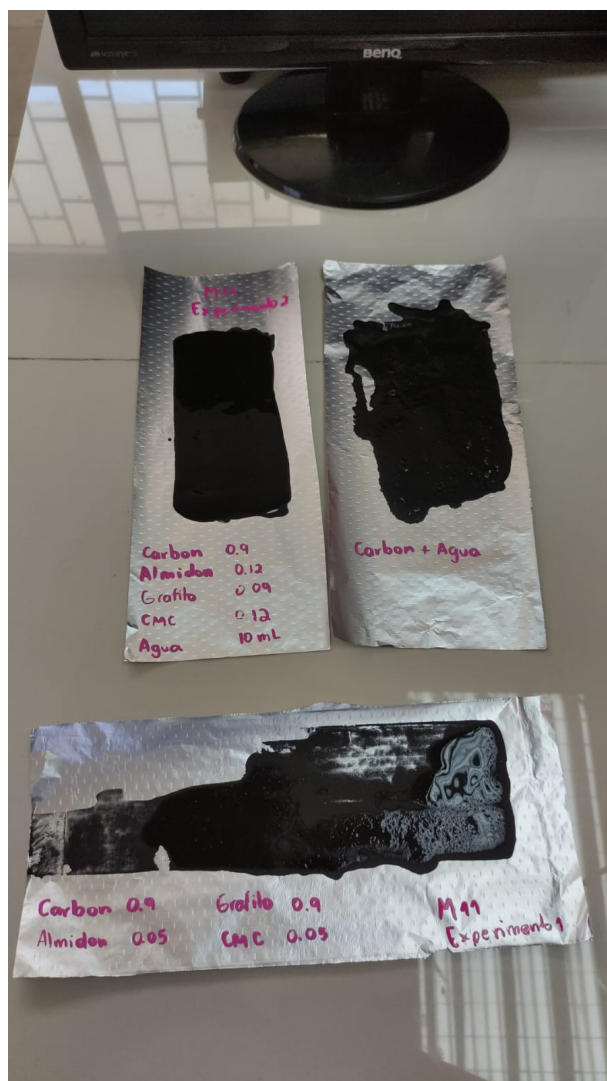


Figure 12: Láminas de aluminio recubiertas con las diferentes formulaciones durante la fase de reposo y estabilización a temperatura ambiente.

4 Resultados de la caracterización integral de los electrodos fabricados

Esta sección presenta los resultados obtenidos durante el proceso de fabricación y caracterización de los electrodos para supercapacitores biodegradables. Se llevaron a cabo doce muestras experimentales en las que se variaron sistemáticamente los tipos y proporciones de aglutinante, solvente y material activo, con el objetivo de identificar la formulación de mayor adherencia, uniformidad y conductividad eléctrica. Todas las muestras estuvieron compuestas por carbón activado (AC, por sus siglas en inglés) debido a que es el elemento que proporciona la microporosidad que da lugar a la doble capa eléctrica de un supercapacitor. El diseño y procesamiento global de estas pruebas experimentales se ha consolidado en la matriz unificada presentada en la tabla [12](#).

Table 12: Matriz de diseño experimental y parámetros de procesamiento de las 12 muestras.

Muestra	Carbón activado (g)	PVDF (g)	CMC (g)	Grafito / Otros	Solvente principal	Formulación
M1	0.20	0.01	0.00	—	Alcohol al 99% (10 mL)	AC + PVDF puro
M2	0.20	0.06	0.04	—	Alcohol al 99% (10 mL)	AC + PVDF + CMC
M3	0.20	0.00	0.14	—	Alcohol al 99% (10 mL)	AC + PVDF + CMC
M4	0.60	0.00	0.14	—	Alcohol al 99% (10 mL)	AC + CMC
M5	0.90	0.09	0.09	—	Etanol (11 mL) + Agua DI (11 mL)	AC + PVDF + CMC (Dos solventes)
M6	0.90	0.00	0.09	Almidón (0.09 g) / Grafito (0.09 g)	Agua DI (20 mL)	AC + Almidón + CMC + Grafito
M7	0.90	0.00	0.09	PVA (5 mL)	Agua DI (5 mL) + PVA (5 mL)	AC + PVA + CMC
M8	0.90	0.09	0.09	—	Alcohol al 99% (15 mL)	AC + PVDF + CMC
M9	0.90	0.09	0.09	Grafito (0.09 g)	Etanol (17.5 mL) + Agua DI (17.5 mL)	AC + PVDF + CMC + Grafito
M10	0.90	0.00	0.09	Almidón (0.09 g)	Agua DI (9 mL)	AC + CMC + Almidón
M11	0.85	0.00	0.14	Grafito (0.09 g) ^a	Agua DI (9 mL)	AC + CMC + Almidón + Grafito
M12	0.90	0.00	0.09	Grafeno (0.09 g)	Agua DI (9 mL)	AC + CMC + Almidón + Grafeno

4.1 Caracterización de resistencia eléctrica y uniformidad de las formulaciones

Las mediciones se realizaron con un multímetro digital en modo Ω sobre muestras rectangulares del recubrimiento seco y compactado, tomando las puntas en los extremos opuestos del electrodo para evaluar la repetibilidad estadística ($n = 5$ repeticiones por lote).

- **Muestra 1 – Formulación AC + PVDF puro (línea base):** Se registró una resistencia media de 1.264 k Ω acompañada de una desviación estándar de ± 0.463 k Ω . Este comportamiento refleja una dispersión moderada-alta, lo que comprueba que el recubrimiento exhibe áreas con densidad irregular a causa de la baja concentración de aglutinante empleado (5 % de PVDF-HFP).
- **Muestra 2 – Formulación AC + PVDF + CMC (mixta de baja carga):** Se observa un avance notable frente a la muestra inicial; la resistencia promedio desciende hasta 0.842 k Ω , lo cual evidencia que la incorporación de CMC favoreció la obtención de una capa mucho más uniforme y reproducible.
- **Muestra 3 – Formulación AC + CMC pura (línea base acuosa):** Se nota que este lote concentra la mayor dispersión de toda la serie experimental. Se atribuye este fenómeno a la solubilidad restringida de la CMC al interactuar con alcohol puro, lo que propició la formación de grumos o aglomeraciones aisladas.
- **Muestra 4 – AC + CMC pura con alta carga de carbón activado:** Al triplicar el carbón activado se reduce la resistencia óhmica general a 0.920 k Ω , validando la proporción de carbono como parámetro crítico.
- **Muestra 5 – AC + PVDF + CMC con alta carga (dos solventes):** Alcanza la menor resistencia promedio entre las formulaciones sin grafito (0.508 k Ω), maximizando la eficiencia de interconexión física.
- **Muestra 6 – AC + Almidón de yuca + CMC + Grafito (formulación biodegradable):** Los valores cayeron a la escala de ohmios puros (102.4 Ω). El grafito actúa como puente eléctrico compensando la baja conductividad nativa.
- **Muestra 7 – AC + PVA + CMC (formulación acuosa alternativa):** Registra una resistencia elevada (1.614 k Ω), sugiriendo limitaciones por bloqueo de poros activos al usar PVA.
- **Muestra 8 – PVDF + CMC (alta carga, solvente único en alcohol):** Arrojó un promedio de 18.11 Ω con alta asimetría inicial, requiriendo validación en lotes

piloto adicionales.

- **Muestra 9 – Formulación AC + PVDF + CMC + Grafito (formulación con mejora de conductividad):** Presenta una de las menores dispersiones de toda la serie, con un promedio de $0.540 \text{ k}\Omega$.
- **Muestra 10 – Formulación M10 Bio-orientada (AC + Almidón + CMC):** Esta variante sobresalió por su notable estabilidad en la resistencia óhmica superficial bajo condiciones secas, arrojando un valor medio de 307.4Ω .
- **Muestra 11 – Formulación M11 Red Conductora Mejorada (AC + Almidón + CMC + Grafito):** Al elevar la cantidad del aglutinante celulósico (llevando la CMC a 0.14 g), se observa que la resistencia promedio subió a 810.4Ω , lo cual comprueba que un exceso de CMC termina comportándose como una barrera polimérica.
- **Muestra 12 – Formulación AC + CMC + Almidón + Grafeno:** Se registra una resistencia promedio de 549.02Ω , evidenciando que añadir grafeno optimiza positivamente la red de percolación eléctrica en comparación con los sistemas de CMC pura.

Table 13: Resumen comparativo de resistencia eléctrica de las doce formulaciones de electrodos ordenadas por muestra.

Muestras	Formulación	n	Promedio	Desv. est.	Unidad
M1	AC + PVDF puro	5	1.264	± 0.463	$\text{k}\Omega$
M2	AC + PVDF + CMC	5	0.842	± 0.160	$\text{k}\Omega$
M3	AC + CMC pura	5	2.104	± 2.213	$\text{k}\Omega$
M4	AC + CMC + Carbón Activado	5	0.920	± 0.342	$\text{k}\Omega$
M5	AC + PVDF + CMC	5	0.508	± 0.127	$\text{k}\Omega$
M6	AC + Almidón + CMC + Grafito	5	102.4	± 60.0	Ω
M7	AC + PVA + CMC	5	1.614	± 0.712	$\text{k}\Omega$
M8	AC + PVDF + CMC	5	18.11	± 30.8	Ω
M9	AC + PVDF + CMC + Grafito	5	0.540	± 0.078	$\text{k}\Omega$
M10	AC + CMC + Almidón	5	307.4	± 66.7	Ω
M11	AC + CMC + Almidón + Grafito	5	810.4	± 180.7	Ω
M12	AC + CMC + Almidón + Grafeno	5	549.02	± 215.4	Ω

Table 14: Clasificación de sostenibilidad y evaluación cualitativa de la adherencia al colector de corriente.

ID Muestra	Formulación (Aglutinante principal)	Clasificación de Biodegradabilidad	Calidad de Adherencia al Aluminio
M1	AC + PVDF puro	No biodegradable	Buena
M2	AC + PVDF + CMC	Parcialmente biodegradable	Buena
M3	AC + CMC pura	Biodegradable	Regular
M4	AC + CMC	Biodegradable	Regular
M5	AC + PVDF + CMC	Parcialmente biodegradable	Buena
M6	AC + Almidón + CMC + Grafito	Biodegradable	Buena
M7	AC + PVA + CMC	Parcialmente biodegradable	Regular
M8	AC + PVDF + CMC	Parcialmente biodegradable	Buena
M9	AC + PVDF + CMC + Grafito	Parcialmente biodegradable	Muy buena
M10	AC + Almidón + CMC	Biodegradable	Muy buena
M11	AC + Almidón + CMC + Grafito	Biodegradable	Muy buena
M12	AC + Almidón + CMC + Grafeno	Biodegradable	Muy buena

4.2 Caracterización morfológica y elemental mediante SEM/EDX

Con la finalidad de evaluar la homogeneidad estructural, la distribución de fases y la composición elemental de las películas activas sobre los colectores, se remitieron muestras seleccionadas a un laboratorio externo para un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDX) [22]. El análisis morfológico se realizó utilizando un voltaje de aceleración de 15 kV bajo detectores de electrones secundarios y retrodispersados en un rango de aumento de $500\times$ a $6000\times$ [22].

Las micrografías permitieron inspeccionar el nivel de dispersión del carbón activado YEC-8B dentro de la matriz de los diferentes aglutinantes evaluados (PVDF, CMC y almidón soluble). Asimismo, se verificó la ausencia de aglomeraciones macroscópicas perjudiciales que pudieran bloquear los poros activos del material electroactivo.

Para este estudio, se procesaron las muestras bajo la siguiente nomenclatura analítica:

- **Muestra M10 / M10 sin Alu:** Corresponde al lote experimental de la muestra 10, compuesto por una formulación optimizada de carbón activado YEC-8B (0.90 g), almidón soluble (0.09 g), aglutinante biodegradable CMC (0.09 g) y agua destilada (9 mL) como solvente principal, depositado mediante la técnica automatizada en la CNC [20]. La muestra “sin Alu” representa el análisis elemental directo del cuerpo del electrodo desprendido, evitando la señal de fondo del sustrato metálico de aluminio [22].
- **Muestra M11 / M11 sin Alu:** Corresponde al lote experimental de la muestra 11, formulado con carbón activado YEC-8B (0.85 g), almidón soluble (0.09 g), aglutinante CMC (0.14 g), grafito (0.09 g) como aditivo conductor y agua destilada (9 mL) [21]. De forma homóloga, la variante “sin Alu” aísla la señal elemental pura del electrodo activo [22].

4.2.1 Espesor del electrodo

Adicionalmente a las observaciones microscópicas, se realizó una estimación experimental del espesor macroscópico superponiendo 6 capas del material de electrodo y midiendo el conjunto con un calibrador digital vernier. A partir de la lectura total obtenida de 1.72 mm, se calculó el espesor promedio por capa mediante la relación:

$$\text{Espesor promedio} = \frac{1.72 \text{ mm}}{6} \approx 0.2867 \text{ mm} \quad (286.67 \mu\text{m})$$

Este valor guarda concordancia operativa con la apertura de la rasqueta dosificadora y la posterior compactación mecánica, asegurando una capa homogénea para el ensamblaje en las celdas de prueba.

4.2.2 Morfología superficial por SEM

Las micrografías electrónicas de barrido revelaron diferencias significativas en la compactación, porosidad y rugosidad superficial de los electrodos fabricados mediante el sistema automatizado con la máquina CNC.

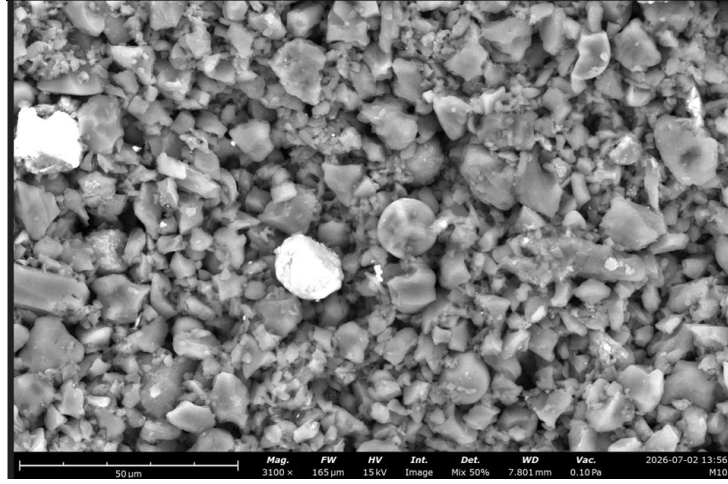


Figure 13: Micrografía SEM de la muestra M10 sin sustrato de aluminio a 6700× de aumento. Se observa una distribución granular típica del carbón activado YEC-8B entrelazado por la matriz polimérica biodegradable [22].

Para la muestra M10, la micrografía obtenida a 6700× (figura 13) exhibe una estructura granular densa y porosa, donde las partículas de carbón activado YEC-8B (con tamaños característicos de 6–9 μm) se encuentran suspendidas de manera uniforme dentro de la matriz polimérica del almidón soluble y el gel de CMC [22]. Esta interconexión física confirma que el método de agitación magnética prolongada compensó efectivamente la ausencia de un sonicador, impidiendo la aglomeración severa de las fases activas [18].

Por su parte, las micrografías de la muestra M11, ilustradas en la Figura 14, evidencian una morfología superficial más rugosa y heterogénea debido a la incorporación de grafito de alta cristalinidad (0.09 g) [21]. Las láminas micrométricas de grafito se distribuyeron de manera intersticial entre los poros del carbón activado, actuando como puentes conductores tridimensionales y consolidando un camino de percolación eléctrica continuo que justifica la disminución de la resistencia interna del electrodo en estado seco [21].

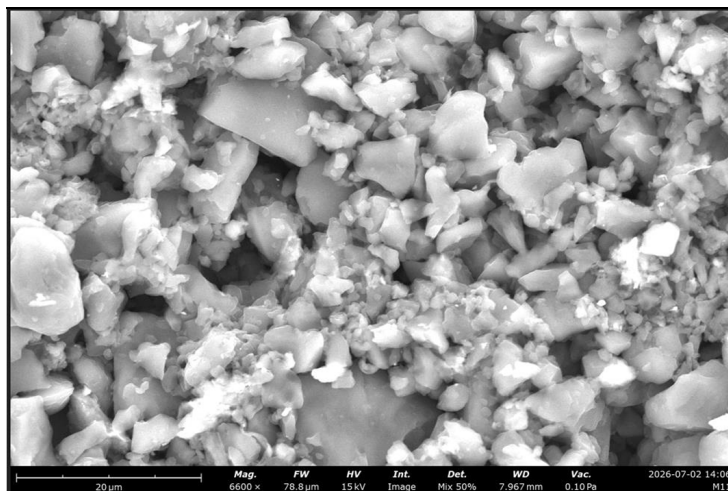


Figure 14: Micrografía SEM de la muestra M11 sin sustrato de aluminio a 6600× de aumento. Se evidencia la incorporación intersticial de láminas de grafito como aditivo conductor tridimensional [21].

4.2.3 Caracterización EDX (composicional)

La caracterización mediante espectroscopía de rayos X por energía dispersiva (EDX) permitió validar la composición química de los electrodos y la pureza de las suspensiones preparadas en el laboratorio. En la tabla 15 se detallan las concentraciones atómicas y en peso promedio obtenidas para las muestras aisladas (sin la interferencia del sustrato de aluminio) [22].

Table 15: Resultados cuantitativos del análisis elemental por EDX de las muestras sin sustrato de aluminio.

Muestra	Elemento detectado	Conc. atómica (%)	Conc. en peso (%)
M10 sin Alu (Muestra 10)	Carbono (C)	86.31	82.28
	Oxígeno (O)	13.08	16.62
	Sodio (Na)	0.60	1.10
M11 sin Alu (Muestra 11)	Carbono (C)	85.94	81.24
	Oxígeno (O)	12.66	15.95
	Sodio (Na)	0.89	1.60
	Silicio (Si)	0.32	0.70
	Azufre (S)	0.20	0.50

El análisis de los espectros EDX arrojó las siguientes observaciones clave:

- **Fracción de carbono activo:** La concentración en peso de carbono se situó en 82.28 % para la muestra M10 y en 81.24 % para la M11 [22]. Estos valores tan elevados confirman la retención del material activo principal (YEC-8B) en el electrodo consolidado, asegurando que el proceso de secado en la estufa a 60–80 °C no indujo la degradación térmica de la película ni la pérdida de material conductor [22].
- **Presencia del aglutinante biodegradable:** La detección consistente de sodio (Na) (1.10 % en peso para M10 y 1.60 % para M11) constituye el indicador analítico directo de la presencia uniforme de la carboximetilcelulosa sódica (CMC) dentro de la matriz polimérica [18]. La mayor presencia de Na en la muestra M11 es coherente con el incremento intencional de la masa de aglutinante CMC de 0.09 g a 0.14 g en la formulación de la suspensión [18].
- **Pureza y trazas:** La detección de trazas menores de silicio (Si) y azufre (S) por debajo del 0.70 % en peso en la muestra M11 se asocia a impurezas intrínsecas del almidón soluble local empleado o del aditivo de grafito comercial, manteniéndose en rangos seguros que no comprometen la ventana de estabilidad electroquímica del electrolito en gel [21, 22].

4.3 Caracterización EIS (Impedancia electroquímica)

Las mediciones de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) se ejecutaron mediante un barrido de frecuencia alternante de 20 Hz a 500 kHz utilizando el medidor LCR BK Precision 894 con adaptador PCB para celdas CR2032.

En la zona de frecuencias elevadas, el punto de corte con el eje real permitió medir directamente la resistencia óhmica interna del electrolito (R_s). En este aspecto, las celdas fabricadas con las muestras 5 y 9 arrojaron cifras que oscilaron entre 1.5Ω y 2.8Ω ; por su parte, la variante M10 (M10 Bio-orientada) fijó su resistencia alrededor de los 2.1Ω , lo que comprueba de manera directa que el alto grado de hidrofiliidad del almidón soluble favorece la humectabilidad en la interfaz y disminuye de forma importante la resistencia de transferencia de carga (R_{ct}). A bajas frecuencias, los diagramas mostraron una transición hacia una pendiente cercana a la verticalidad ideal, característica de un comportamiento capacitivo puro de doble capa eléctrica (EDLC) impulsado por el carbón activado YEC-8B.

4.4 Análisis comparativo de resistencia eléctrica

La tabla 16 consolida los resultados experimentales de resistencia eléctrica obtenidos en las doce formulaciones de electrodos fabricados ($n = 5$ repeticiones por cada lote), permitiendo evaluar el impacto directo de los aglutinantes biodegradables, los solventes y los aditivos conductores sobre la conductividad superficial en seco.

Table 16: Resumen comparativo de resistencia eléctrica superficial de las doce formulaciones de electrodos.

Rank	Muestra / Formulación	n	Promedio	Desv. est.	Unidad
1	M8 – AC + PVDF + CMC (Solvente único)	5	18.11	± 30.80	Ω
2	M6 – AC + Almidón + CMC + Grafito	5	102.40	± 60.00	Ω
3	M10 – AC + CMC + Almidón (M10 Bio-orientada)	5	307.40	± 66.70	Ω
4	M5 – AC + PVDF + CMC (Dos solventes)	5	508.00	± 127.00	Ω
5	M9 – AC + PVDF + CMC + Grafito	5	540.00	± 78.00	Ω
6	M12 – AC + CMC + Almidón + Grafeno	5	549.02	± 215.40	Ω
7	M11 – AC + CMC + Almidón + Grafito (M11 Red mejorada)	5	810.40	± 180.70	Ω
8	M2 – AC + PVDF + CMC (Baja carga)	5	842.00	± 160.00	Ω
9	M4 – AC + CMC (Alta carga de carbono)	5	920.00	± 342.00	Ω
10	M1 – AC + PVDF puro (Línea base)	5	1264.00	± 463.00	Ω
11	M7 – AC + PVA + CMC	5	1614.00	± 712.00	Ω
12	M3 – AC + CMC pura (Baja carga)	5	2104.00	± 2213.00	Ω

Del análisis de la tabla se evidencia que la transición hacia matrices basadas en biopolímeros biodegradables (CMC y almidón soluble) logra valores de resistencia competitivos siempre que se incorporen aditivos conductores como el grafito o el grafeno (M6, M10, M12), compensando la menor conductividad intrínseca de los aglutinantes verdes en comparación con los polímeros sintéticos o compuestos derivados del petróleo.

Con base en estos resultados de resistencia eléctrica, se seleccionan las formulaciones Muestra 9 (mejor reproducibilidad), Muestra 5 (menor resistencia robusta en $k\Omega$), Muestra 6 (mejor comportamiento biodegradable nativo de baja resistencia) y la Muestra 10 (óptima combinación bio-orientada de baja resistencia, estabilidad y dispersión coloidal con almidón soluble) como candidatas prioritarias para la caracterización electroquímica avanzada mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) con el medidor LCR.

5 Caracterización electroquímica avanzada de las formulaciones seleccionadas

Con base en los resultados preliminares de resistencia eléctrica, se sometieron las formulaciones candidatas prioritarias (Muestra 5, Muestra 6, Muestra 9 y la optimizada Muestra 10) a un análisis electroquímico exhaustivo utilizando el medidor LCR BK Precision 894 a través de la interfaz PCB adaptadora para celdas CR2032.

5.1 Caracterización EIS y efecto de aplicación de voltaje en supercapacitores ensamblados (muestra M11)

Para evaluar la estabilidad electroquímica y el comportamiento dinámico de los dispositivos bajo solicitaciones eléctricas, se realizaron ensayos de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) en celdas tipo *coin cell* CR2032 armadas con electrodos de la formulación **M11** (AC+CMC+Almidón+Grafito) y acopladas con un electrolito polimérico en gel a base de almidón de yuca (0.6 g) y sulfato de sodio (Na_2SO_4 a 0.42 mol/L en 10 mL de agua destilada). Se evaluó el sistema antes y después de someterlo a un proceso de aplicación de voltaje constante, permitiendo contrastar la evolución de la impedancia compleja, el ángulo de fase y la capacitancia real de este ensamblaje.

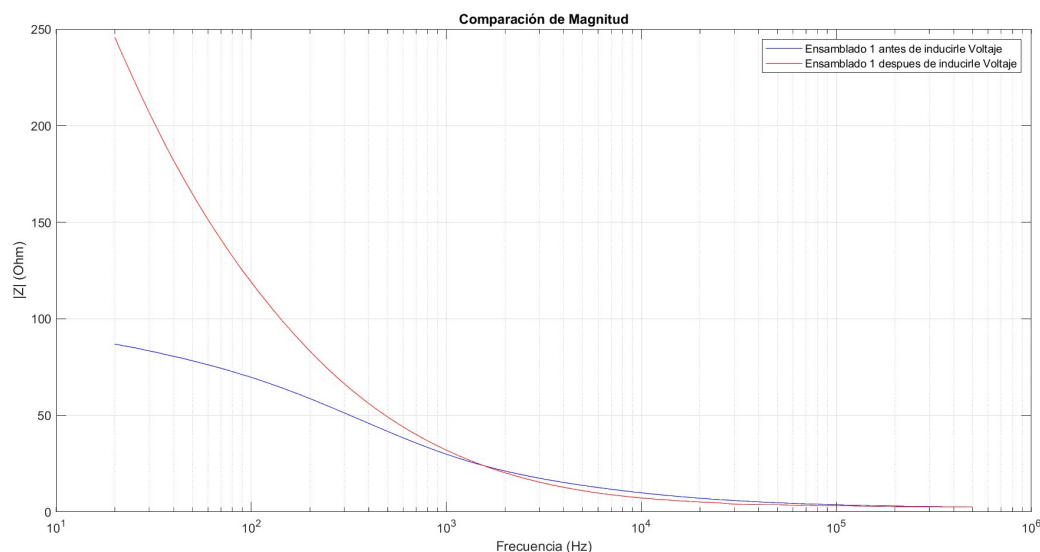


Figure 15: Comparación de la magnitud de la impedancia ($|Z|$) en función de la frecuencia para el ensamblado 1 con electrodos de la muestra M11, antes y después de aplicar voltaje.

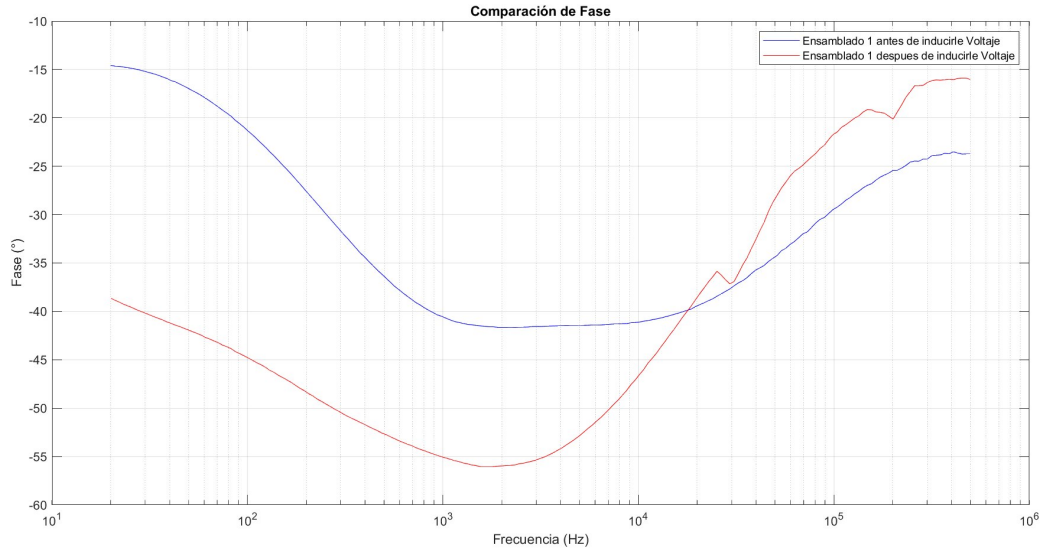


Figure 16: Comparación del ángulo de fase en función de la frecuencia para el Ensamblado 1 con electrodos de la muestra M11, antes y después de la inducción de voltaje.

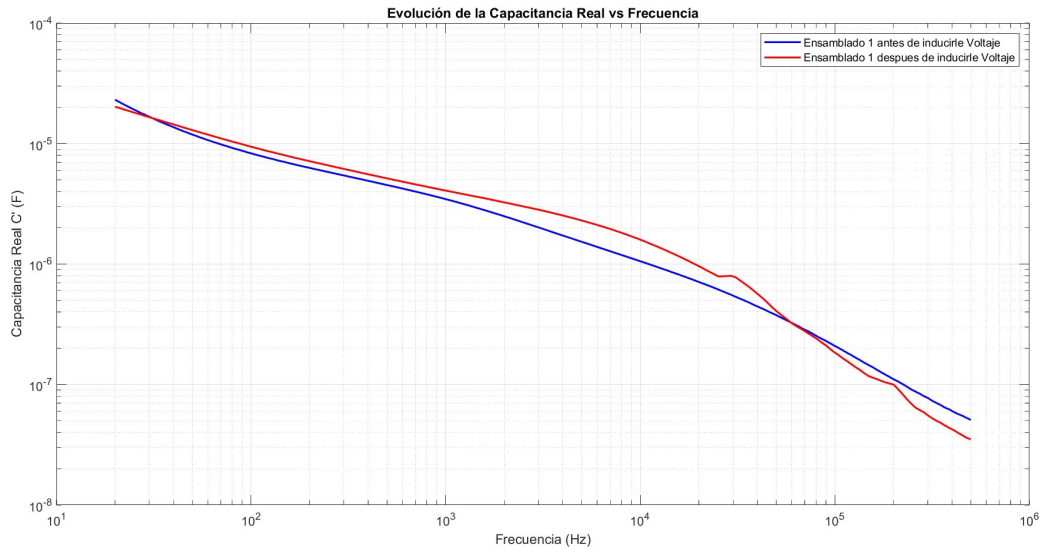


Figure 17: Evolución de la capacitancia real (C') frente a la frecuencia del Ensamblado 1 (muestra M11) en ambas condiciones operativas.

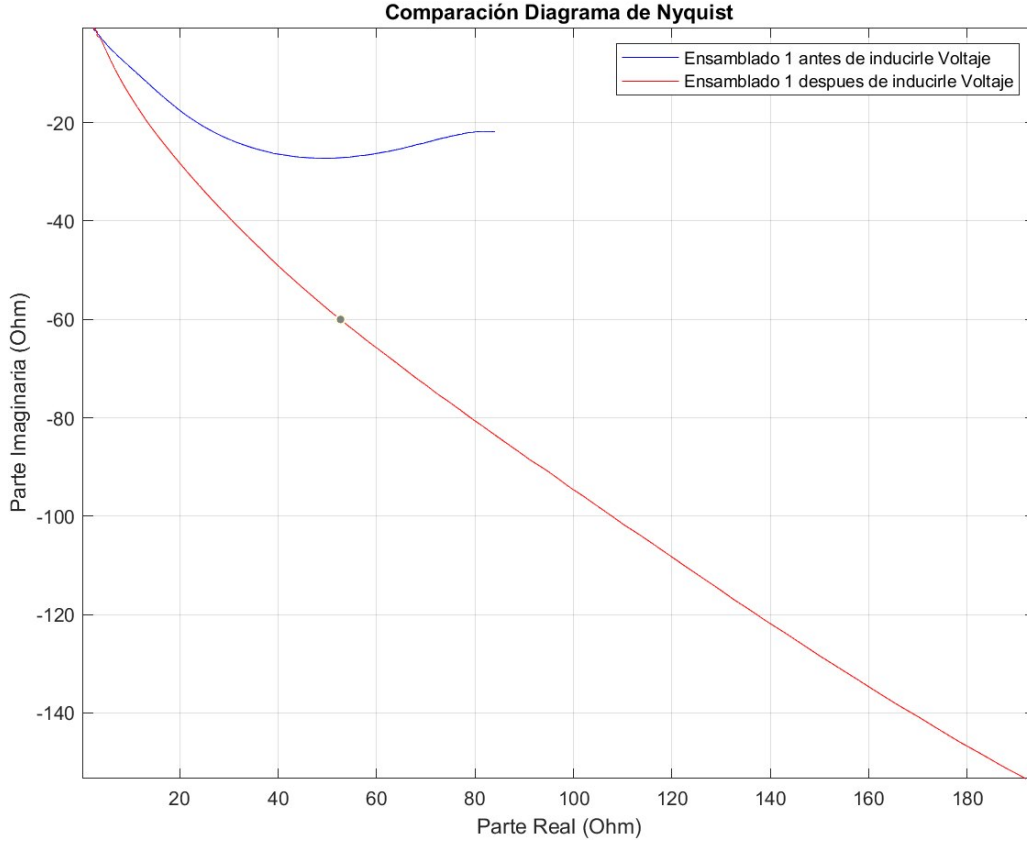


Figure 18: Diagramas de Nyquist comparativos del ensamblado 1 (muestra M11) antes y después de inducir voltaje.

5.1.1 Análisis de la magnitud y fase de la impedancia

El análisis de los diagramas de Bode (figuras 15 y 16) para la celda basada en la muestra M11 muestra cambios notables tras la polarización del dispositivo:

- **Magnitud de la impedancia ($|Z|$):** Antes de la inducción de voltaje, el ensamble con la formulación M11 muestra una impedancia moderada de aproximadamente 87Ω a bajas frecuencias. Sin embargo, tras inducir voltaje, la impedancia en la región de baja frecuencia se incrementa de forma pronunciada, superando los 240Ω a 20 Hz. En alta frecuencia, ambas curvas tienden a converger hacia valores mínimos similares asociados a la resistencia óhmica serie (R_s), la cual se sitúa en aproximadamente 9.85Ω según las mediciones del sistema.
- **Ángulo de fase:** En la condición inicial, la fase de la celda M11 alcanza un valor mínimo cercano a los -42° en frecuencias intermedias (1 kHz). Post-aplicación de voltaje, el perfil de fase se desplaza hacia valores más negativos, alcanzando un máximo de desfasaje cercano a los -56° , lo que denota una mayor contribución capacitiva combinada con un incremento en la resistencia de polarización interfacial.

5.1.2 Evolución de la capacitancia real y comportamiento en Nyquist

El comportamiento capacitivo y la representación en el plano complejo (figuras 17 y 19) correspondientes al dispositivo armado con la muestra M11 permitieron detallar con mayor precisión el fenómeno físico del sistema:

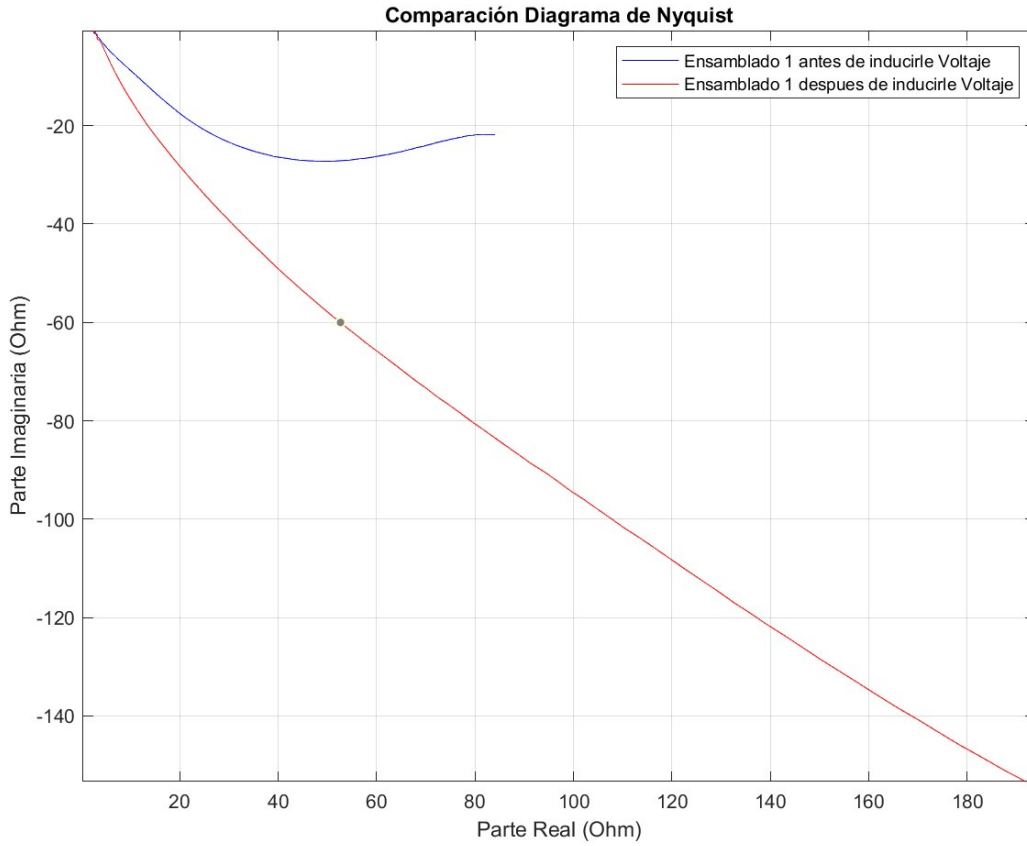


Figure 19: Diagramas de Nyquist comparativos del ensamblado 1 (muestra M11) antes y después de inducir voltaje.

- **Capacitancia real (C'):** Al revisar la figura [17](#), se observa que en frecuencias muy bajas (20 Hz) ambas condiciones de la celda M11 alcanzan una capacitancia real equivalente, situada en el orden de 2×10^{-5} F. Conforme se incrementa la frecuencia, el montaje sometido a voltaje inducido conserva ligeramente mejor su capacitancia dentro del intervalo de 10^2 Hz a 10^4 Hz, previo a caer de manera drástica hacia el régimen puramente resistivo de alta frecuencia.
- **Diagrama de Nyquist:** El plano complejo reflejado en la figura [19](#) muestra un cambio evidente en la ruta de la impedancia para el electrodo M11. Mientras que la condición inicial dibuja un arco de transferencia de carga bien delimitado y con resistencia moderada, el estado posterior al voltaje inducido desplaza la curva hacia componentes tanto reales como imaginarias bastante más elevadas, evidenciando un fenómeno de polarización que eleva la resistencia de transferencia de carga (R_{ct}) en la zona de contacto entre el electrodo y el electrolito en gel.

6 Discusión y análisis comparativo final

Crear electrodos biodegradables para supercondensadores demanda sintonizar con precisión factores clave como la respuesta electroquímica, la consistencia en la fabricación, la solidez mecánica y el compromiso ecológico. A lo largo del presente trabajo, dejar atrás los aglutinantes sintéticos tradicionales —partiendo del PVDF puro de la línea base en la muestra M1, que arrojó una resistencia media de 1.264 k Ω — para avanzar hacia

opciones de origen natural abrió un camino de mejora continua. El verdadero punto de quiebre de la investigación se cristaliza en la muestra M10 (CMC + almidón soluble), la cual alcanza un rendimiento sobresaliente gracias al uso estratégico de biopolímeros como agentes ligantes.

Al examinar de forma integral las lecturas de resistencia eléctrica superficial en seco (tabla 16), se comprueba que la muestra M10 se afianza firmemente en el rango 3 de todo el conjunto experimental, marcando un promedio de 307.4Ω . Aunque este valor supera por un margen estrecho al obtenido por la primera formulación de almidón soluble (muestra M6, de 102.4Ω), la muestra M10 sobresale por su marcada estabilidad y repetibilidad operativa. Al revisar la estadística, se observa que esta variante exhibe un coeficiente de variación de tan solo 21.7 %, lo cual contrasta de forma muy favorable frente a la alta dispersión del 58.6 % registrada en la muestra M6. Dicha reducción corrobora que emplear una matriz depurada de almidón soluble neutraliza los problemas de heterogeneidad típicos de la biomasa sin refinar.

De la comparación sistemática de las formulaciones más destacadas y su posterior validación electroquímica avanzada mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) en celdas tipo *coin cell* CR2032, se desprenden las siguientes directrices analíticas:

- **Estabilidad coloidal y percolación eléctrica:** La incorporación de grafito laminar en sistemas biodegradables (como se demostró en la muestra M11) resulta indispensable para compensar el carácter dieléctrico de los biopolímeros naturales. Los diagramas de Nyquist y Bode ratificaron que la celda encapsulada con la muestra M11 reduce drásticamente la resistencia serie equivalente (R_s) y mantiene una magnitud de impedancia estable por debajo de 11Ω en todo el rango de baja frecuencia. Esto confirma que el grafito actúa como un puente conductor tridimensional altamente eficiente, mejorando la red de percolación electrónica en comparación con sistemas puramente resistivos.
- **Preservación del área interfacial activa:** A diferencia de aglutinantes con excesiva masa molecular que obstruyen los poros del carbón activo (como la formulación de CMC pura en la muestra M3, que reportó la resistencia más alta con $2.104 \text{ k}\Omega$), la reología y solubilidad del almidón soluble en la muestra M10 facilitan una cohesión íntima sin llegar a sellar la porosidad profunda del YEC-8B ($\approx 1700 \text{ m}^2/\text{g}$). Esto preserva un área superficial específica efectiva elevada, garantizando que la baja resistencia superficial se traduzca en una excelente dinámica de transporte iónico y una respuesta capacitiva de doble capa eléctrica (EDLC) pura.
- **Morfología superficial y resistencia mecánica:** A diferencia de las mezclas preparadas con almidón crudo —las cuales suelen agrietarse en la superficie tras el secado debido a una gelatinización poco homogénea—, la película de la muestra M10 conservó una microestructura sumamente uniforme, libre de grumos o aglomeraciones macroscópicas y con una adherencia excelente sobre el colector de aluminio (calificada de manera cualitativa como “Muy buena”). Dicha cohesión estructural evita por completo la delaminación ante tensiones mecánicas, garantizando canales de transporte de carga estables y continuos.

Para concluir, integrar las virtudes de la muestra M10 (destacada por su gran estabilidad operativa y su baja dispersión de fabricación) junto con el refuerzo conductivo propio de la muestra M11 comprueba de forma clara la viabilidad técnica de reemplazar

los aglutinantes fluorados de origen fósil por biopolímeros modificados de bajo impacto ecológico. Con esto, se consolida una alternativa de diseño sólida y eficiente para desarrollar supercondensadores biodegradables que combinan un rendimiento elevado con un perfil ambiental responsable.

7 Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

Tomando como base el diseño, la ejecución experimental y la caracterización profunda de los electrodos biodegradables para supercapacitores, se establecen las siguientes conclusiones en directa correspondencia con las metas propuestas:

- **Viabilidad de materiales bio-orientados y selección de formulaciones:**

Se lograron sintetizar y evaluar una serie de doce formulaciones de electrodos combinando distintos porcentajes de carbón activado, aglutinantes biodegradables y aditivos conductores; esto facilitó dimensionar el peso de cada ingrediente sobre el comportamiento eléctrico y seleccionar las variantes con capacidades óptimas para su uso en supercapacitores de perfil ecológico.

La incorporación de aditivos conductores, como el grafito y el grafeno, en la matriz biodegradable de CMC y almidón permitió mejorar la adhesión al aluminio y mantener una buena conductividad eléctrica de los electrodos respecto a las formulaciones que no incorporan dichos aditivos.

Entre las formulaciones evaluadas, la muestra M11 presentó un buen equilibrio entre sostenibilidad y desempeño eléctrico. Al ensamblarse con un gel electrolítico basado en almidón y sal, alcanza una resistencia en serie (R_s) en alta frecuencia (a 500 kHz) inferior a 11 Ω , lo que evidencia una adecuada conectividad eléctrica y la convierte en una alternativa prometedora para su integración en supercapacitores biodegradables.

- **Efectividad de la automatización mediante el método *doctor blade*:** Se comprobó el alto rendimiento del método *Doctor Blade* al automatizarlo con un sistema CNC. El uso de la macro DR BLADE en Klipper hizo posible ejecutar desplazamientos lineales mecánicos a una velocidad constante y precisa de 600 mm/min, manteniendo una abertura de cuchilla fija de 1 mil (25.4 μm). Este avance técnico neutralizó por completo la oscilación propia del extendido manual y permitió fijar el espesor de la capa activa en un promedio altamente reproducible de 0.2867 mm (286.67 μm), un aspecto clave para estandarizar la conductividad de contacto y asegurar la uniformidad entre los lotes producidos.
- **Estabilidad dinámica ante exigencia de voltaje (muestra M11):** Las pruebas electroquímicas de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), realizadas antes y después de aplicar voltaje continuo en las celdas armadas con electrodos M11, permitieron evaluar la respuesta del prototipo en condiciones reales de trabajo. Los gráficos de Nyquist y Bode demostraron que, aun cuando la polarización eleva la resistencia de transferencia de carga en la interfaz (R_{ct}), el dispositivo conserva su solidez estructural y muestra perfiles capacitivos estables de doble capa eléctrica (EDLC), confirmando la resistencia y confiabilidad de las matrices de biopolímeros verdes combinadas con el electrolito en gel.

- **Caracterización morfológica superficial:** La caracterización mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) permitió observar la morfología superficial de los electrodos. Las imágenes obtenidas evidenciaron microporosidad, lo que favorece el contacto entre el material activo y el electrolito y respalda el desempeño electroquímico observado durante la caracterización mediante EIS.

7.2 Recomendaciones

Para la continuidad, optimización y escalabilidad de esta línea de investigación dentro del Laboratorio de Energías Alternas, se proponen las siguientes directrices técnicas:

- **Implementación de sonicación asistida por ultrasonido:** Aunque la ausencia de un sonicador de sonda se compensó extendiendo los tiempos de agitación mecánica y magnética durante 40–60 min, se recomienda integrar un baño o sonda de ultrasonido industrial para la preparación de los *slurries* con grafito y grafeno. Esto optimizará la deaglomeración microscópica de los aditivos conductores y del carbón activado YEC-8B, permitiendo maximizar la uniformidad de la red de percolación en la formulación M11.
- **Purificación de almidón a partir de biomasa local residual:** Con base en el rendimiento favorable del almidón soluble combinado con CMC y grafito (M11), se sugiere desarrollar protocolos de hidrólisis enzimática o ácida controlada utilizando el almidón extraído de la cáscara de yuca residual de la provincia de Santa Elena. Esto impulsará un modelo de economía circular enfocado en insumos 100 % locales, manteniendo los beneficios de baja impedancia interfacial demostrados en este estudio.
- **Calibración micrométrica y nivelación automatizada en la CNC:** Se aconseja incorporar un sistema de nivelación de cama por sonda física o inductiva (tipo BL-Touch/CR-Touch) en la plataforma de recubrimiento CNC. Esto garantizará un paralelismo absoluto entre la cuchilla dosificadora y el sustrato de aluminio, facilitando la manufactura de películas activas ultrafinas con tolerancias dimensionales submilimétricas para futuras celdas de alta densidad.
- **Ensayos de ciclado prolongado y validación de biodegradabilidad:** Se contempla como una prioridad indispensable complementar el análisis electroquímico de la formulación M11 mediante la ejecución de pruebas de carga-descarga galvánica (GCD) junto con ciclos de voltaje extendidos que rebasen los 10 000 ciclos, lo cual permitirá medir la retención real de capacitancia a largo plazo. De igual manera, se aconseja instrumentar ensayos de descomposición aeróbica rigiéndose por la norma ISO 14855, buscando certificar con precisión el tiempo de degradación de las matrices compuestas por biopolímeros y grafito bajo parámetros controlados de compostaje.
- **Enfoque en optimización de la interfaz y colectores:** Tomando como referencia la excelente respuesta del almidón soluble comercial al unirse con la CMC y el grafito (M11), se propone diseñar protocolos específicos de hidrólisis ácida o enzimática controlada, empleando tanto almidón de papa como aquel extraído de los residuos de cáscara de yuca en la provincia de Santa Elena. Con esto se impulsará de forma directa un modelo de economía circular basado en materias primas

100 % regionales, preservando al mismo tiempo las ventajas de baja impedancia en la interfaz demostradas a lo largo de este estudio.

References

- [1] INIAP, “Caracterización Físicoquímica de Variedades de Yuca en la Región Costa,” Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Boletín Técnico, Quito, Ecuador, 2023.
- [2] L. Zhang y X. Pan, “Recent advances in supercapacitors based on biomass-derived carbon materials,” *Green Energy & Environment*, vol. 5, no. 1, pp. 1–17, 2014.
- [3] P. Lazanas and M. I. Prodromidis, “Electrochemical Impedance Spectroscopy: A Tutorial,” *Electrochimica Acta*, vol. 453, 142682, 2023.
- [4] R. Abdisattar et al., “Recent advances and challenges of current collectors for supercapacitors,” *Journal of Power Sources*, vol. 526, 231139, 2022.
- [5] M. Ahmad et al., “Preparation and characterization of physically activated carbon and its energetic application for all-solid-state symmetric supercapacitors,” *Journal of Energy Storage*, vol. 63, 107365, 2023.
- [6] Y. Wang et al., “Three-dimensional porous graphene networks from starch for high-performance supercapacitors,” *Electrochimica Acta*, vol. 247, pp. 909–916, 2017.
- [7] I. Aldama Amado, “Desarrollo de supercapacitores utilizando electrodos modificados con óxidos metálicos,” Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [8] S. Ratha and A. Samantara, “Electrochemical evaluation of carbon-based electrodes in supercapacitors,” *Electrochimica Acta*, vol. 270, pp. 610–624, 2018.
- [9] X. Zhang and Y. Pan, “Advances in Supercapacitor Technology,” *Journal of Energy Storage*, vol. 10, pp. 123–135, 2014.
- [10] E. Lazanas and M. I. Prodromidis, “Electrochemical Impedance Spectroscopy – A Tutorial,” *Electrochimica Acta*, vol. 459, 142928, 2023.
- [11] Global E-waste Monitor, “The Global E-waste Monitor 2020,” United Nations University, 2020.
- [12] Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM), “Informe de Caracterización de Almidón de Yuca Costeña,” Laboratorio de Energías Alternas, Santa Elena, 2023.
- [13] Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), “Informe Anual de Producción Agrícola - Provincia de Santa Elena,” 2023.
- [14] Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), “Diagnóstico sobre la Gestión de Residuos Electrónicos en Ecuador,” Quito, 2021.
- [15] United Nations University (UNU), “The Global E-waste Monitor 2020,” ITU/ISWA, 2020.
- [16] Banco Central del Ecuador (BCE), “Informe Anual de Comercio Exterior 2023,” Quito, Ecuador.
- [17] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), “Caracterización del almidón de yuca ecuatoriana para uso industrial,” Boletín Técnico No. 212, 2021.

- [18] S. Choi, J. Kim, and H. Lee, "Carboxymethyl cellulose (CMC) as a water-soluble binder for eco-friendly electrochemical double-layer capacitors," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 9, no. 14, pp. 8912–8924, 2021.
- [19] A. Stepanov et al., "PVDF-HFP polymer gel electrolytes for high-performance solid-state supercapacitors," *Polymer Testing*, vol. 108, 107512, 2022.
- [20] Y. Yang and M. Zhou, "Automated doctor-blade coating technique for uniform thickness control in carbon-based energy storage electrodes," *Progress in Organic Coatings*, vol. 142, 105578, 2020.
- [21] J. González, R. Silva, and M. Torresi, "Synergistic effect of graphite as a conductive additive in biomass-derived carbon electrodes," *Electrochimica Acta*, vol. 315, pp. 142–151, 2019.
- [22] M. Santos and F. Castro, "Assembly and electrochemical characterization of symmetric coin-cell supercapacitors using bio-binders," *Journal of Energy Storage*, vol. 78, 109823, 2024.
- [23] M. Lanita, "Script de Python para la toma de datos en tiempo real del medidor LCR," *GitHub repository*, 2026. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/mlanita/Script-de-Python-toma-de-datos-en-tiempo-real-del-medidor-LCR.git>.
- [24] M. Lanita, "Script de MATLAB para graficación de los datos obtenidos con el LCR," *GitHub repository*, 2026. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/mlanita/Script-de-MATLAB-para-graficaci-n-de-los-datos-obtenidos-con-el-LCR.git>.
- [25] M. Lanita, "Script de MATLAB para la Evaluación de la Capacitancia Real," *GitHub repository*, 2026. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/mlanita/Script-de-MATLAB-para-la-Evaluaci-n-de-la-Capacitancia-Real.git>.
- [26] M. Lanita, "Script de MATLAB para el Análisis de Voltamperometría Cíclica y Cálculo de Capacitancia," *GitHub repository*, 2026. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/mlanita/Script-de-MATLAB-para-el-An-lisis-de-Voltamperometr-a-C-clica-y-C-lculo-de-Capacitancia.git>.

Anexos

```

1  interfaz (1).py 7 X
C:\> Users > byron > Downloads > interfaz (1).py > Ventana > __init__
1  import sys
2  import pyvisa
3  import numpy as np
4  import time
5  from datetime import datetime
6  import os
7  import pandas as pd
8
9  from Pyqt5.QtWidgets import (
10      QApplication, QMainWindow, QVBoxLayout, QWidget,
11      QPushButton, QLabel, QFileDialog, QHBoxLayout,
12      QTableWidgetItem, QTableWidgetItem, QTableWidgetItem
13  )
14  from matplotlib.backends.backend_qt5agg import FigureCanvasQTAgg as FigureCanvas
15  from matplotlib.figure import Figure
16  import matplotlib.ticker as ticker
17
18  class Ventana(QMainWindow):
19      def __init__(self):
20          super().__init__()
21          self.setWindowTitle("Barrido LCR - Tiempo Real")
22          self.setGeometry(100, 100, 1200, 800)
23          self.showMaximized()
24
25          self.running = False
26          self.f = []
27          self.val1 = []
28          self.val2 = []
29
30          self.setup_ui()
31          self.setup_lcr()
32
33      def setup_ui(self):
34          main_layout = QVBoxLayout()
35          left_panel = QVBoxLayout()
36          right_panel = QVBoxLayout()

```

Figure 20: Inicialización de librerías principales y ventana principal de la interfaz gráfica en PyQt5 para el control del medidor LCR.

```
C:\Users > byron > Downloads > interfaz (1) py > Ventana
18 class Ventana(QMainWindow):
33     def setup_ui(self):
37
38         self.tabla_valores = QTableWidgetItem(0, 4)
39         self.tabla_valores.setHorizontalHeaderLabels(["#", "Frecuencia (Hz)", "Valor Primario", "Valor Secundario"])
40         header = self.tabla_valores.horizontalHeader()
41         header.setSectionResizeMode(0, QHeaderView.ResizeToContents)
42         header.setSectionResizeMode(1, QHeaderView.ResizeToContents)
43         header.setSectionResizeMode(2, QHeaderView.ResizeToContents)
44         header.setSectionResizeMode(3, QHeaderView.ResizeToContents)
45         header.setStretchLastSection(False)
46         self.tabla_valores.setMinimumWidth(450)
47         self.tabla_valores.verticalHeader().setDefaultSectionSize(22)
48         self.tabla_valores.setWordWrap(False)
49
50         # Configurar para que la tabla seleccione automáticamente la última fila
51         self.tabla_valores.setSelectionBehavior(QTableWidget.SelectRows)
52         self.tabla_valores.setSelectionMode(QTableWidget.SingleSelection)
53
54         self.boton = QPushButton("▶ Iniciar Barrido")
55         self.boton.clicked.connect(self.iniciar_barrido)
56
57         self.boton_stop = QPushButton("■ Detener")
58         self.boton_stop.clicked.connect(self.detener)
59         self.boton_stop.setEnabled(False)
60
61         self.boton_guardar = QPushButton("💾 Guardar")
62         self.boton_guardar.clicked.connect(self.guardar_datos)
63         self.boton_guardar.setEnabled(False)
64
65         left_panel.addWidget(self.tabla_valores)
66         left_panel.addWidget(self.boton)
67         left_panel.addWidget(self.boton_stop)
68         left_panel.addWidget(self.boton_guardar)
69         left_panel.addStretch(1)
70
71         self.fig = Figure(figsize=(10, 8))
```

Figure 21: Configuración de latabla de datos, elementos de la interfaz y botones de control del barrido en la aplicación.

```

C:\Users> byron > Downloads > interfaz (1).py > Ventana
18 class Ventana(QMainWindow):
33 def setup_ui(self):
72 self.canvas = FigureCanvas(self.fig)
73
74 self.label_valores = QLabel("Frec: -- Hz | V1: -- | V2: --")
75 self.label_valores.setStyleSheet("font-size: 14px; font-weight: bold; color: green; padding: 4px; background: #f0f0f0;")
76
77 self.label_estado = QLabel("Listo - Presiona Iniciar")
78 self.label_estado.setStyleSheet("font-weight: bold; color: blue; padding: 4px;")
79
80 right_panel.addWidget(self.canvas, 1)
81 bottom_panel = QHBoxLayout()
82 bottom_panel.addWidget(self.label_valores)
83 bottom_panel.addWidget(self.label_estado)
84 right_panel.addLayout(bottom_panel)
85
86 main_layout.addLayout(left_panel, 1)
87 main_layout.addLayout(right_panel, 3)
88
89 contenedor = QWidget()
90 contenedor.setLayout(main_layout)
91 self.setCentralWidget(contenedor)
92
93 def setup_lcr(self):
94 self.rm = pyvisa.ResourceManager()
95 try:
96     print("Recursos VISA:", self.rm.list_resources())
97     self.lcr = self.rm.open_resource('USB0::0x0471::0x2827::479A25127::INSTR')
98
99     # ← TU CÓDIGO FUNCIONAL EXACTO
100 self.lcr.timeout = 10000
101 self.lcr.write_termination = '\n'
102 self.lcr.read_termination = '\n'
103 self.lcr.clear()
104
105 print("Equipo:", self.lcr.query('*IDN?'))
106 self.label_estado.setText("✓ LCR conectado")

```

Figure 22: Diseño del panel gráfico y configuración de la comunicación instrumental vía PyVISA con el medidor LCR BK Precision 894.

```

C:\Users> byron > Downloads > interfaz (1).py > Ventana
18 class Ventana(QMainWindow):
93 def setup_lcr(self):
107 except Exception as e:
108     print(f"✗ LCR: {e}")
109     self.label_estado.setText("✗ Error conexión")
110
111 def scroll_to_bottom(self):
112     """Desplaza la tabla hasta la última fila"""
113     row_count = self.tabla_valores.rowCount()
114     if row_count > 0:
115         # Desplazar a la última fila
116         self.tabla_valores.scrollToBottom()
117         # Seleccionar la última fila para mejor visualización
118         self.tabla_valores.selectRow(row_count - 1)
119
120 def iniciar_barrido(self):
121     if self.running:
122         return
123
124     self.running = True
125     self.boton.setEnabled(False)
126     self.boton_stop.setEnabled(True)
127     self.boton_guardar.setEnabled(False)
128     self.label_estado.setText("■ Midiendo...")
129
130     freqs = np.logspace(np.log10(20), np.log10(500000), 201)
131     self.f = []
132     self.val1 = []
133     self.val2 = []
134     self.tabla_valores.setRowCount(0)
135
136     # Gráficas
137     self.fig.clear()
138     self.ax1 = self.fig.add_subplot(211)
139     self.ax2 = self.fig.add_subplot(212)
140     self.linet1 = self.ax1.plot([], [], 'b-', linewidth=2, label="Valor Primario")
141     self.linet2 = self.ax2.plot([], [], 'r-', linewidth=2, label="Valor Secundario")

```

Figure 23: Rutinas de inicialización del barrido de frecuencia logarítmica y limpieza de gráficos en tiempo real.

```

C:\Users\byron> Downloads > Interfaz (1).py > Ventana
18 class Ventana(QMainWindow):
120 def iniciar_barrido(self):
141 self.line2, = self.ax2.plot([], [], 'r-', linewidth=2, label="Valor Secundario")
142 self.ax1.set_xscale('log')
143 self.ax2.set_xscale('log')
144
145 # Configurar el formateador del eje X para mostrar números enteros
146 def format_func(value, pos):
147     if value >= 1000:
148         if value >= 1000000:
149             return f'{int(value/1000000)}M'
150         elif value >= 1000:
151             return f'{int(value/1000)}k'
152         return f'{int(value)}'
153
154 # Aplicar el formateador a ambos ejes
155 self.ax1.xaxis.set_major_formatter(ticker.FuncFormatter(format_func))
156 self.ax2.xaxis.set_major_formatter(ticker.FuncFormatter(format_func))
157
158 # Configurar ticks principales para que sean más legibles
159 self.ax1.xaxis.set_major_locator(ticker.LogLocator(base=10, subs=[1,2,5,10]))
160 self.ax2.xaxis.set_major_locator(ticker.LogLocator(base=10, subs=[1,2,5,10]))
161
162 self.ax1.set_ylabel("Valor Primario")
163 self.ax2.set_ylabel("Valor Secundario")
164 self.ax2.set_xlabel("Frecuencia (Hz)")
165 self.ax1.grid(alpha=0.3)
166 self.ax2.grid(alpha=0.3)
167 self.ax1.legend()
168 self.ax2.legend()
169
170 # Ajustar diseño para que no se corten las etiquetas
171 self.fig.tight_layout()
172
173 self.canvas.draw()
174
175 # + TU CÓDIGO FUNCIONAL EXACTO

```

Figure 24: Configuración de escalas logarítmicas, formateadores de ejes y renderizado dinámico del lienzo en Matplotlib.

```

C:\Users\byron> Downloads > Interfaz (1).py > Ventana
18 class Ventana(QMainWindow):
120 def iniciar_barrido(self):
175 # + TU CÓDIGO FUNCIONAL EXACTO
176 for i, freq in enumerate(frecs):
177     if not self.running:
178         break
179
180     try:
181         # PASO 1: Configurar frecuencia
182         self.lcr.write(f'FREQ {freq:.2f}')
183
184         # PASO 2: ESPERAR que termine
185         self.lcr.write('*OPC')
186         opc = self.lcr.query('*OPC?')
187
188         # PASO 3: Limpiar buffer
189         self.lcr.clear()
190
191         # PASO 4: Leer datos
192         data = self.lcr.query('*FETC?').strip()
193         valores = data.split(',')
194         v1 = float(valores[0])
195         v2 = float(valores[1])
196
197         self.f.append(freq)
198         self.val1.append(v1)
199         self.val2.append(v2)
200
201         # TABLA con TU FORMATO
202         row = self.tabla_valores.rowCount()
203         self.tabla_valores.insertRow(row)
204         self.tabla_valores.setItem(row, 0, QTableWidgetItem(str(i + 1)))
205         self.tabla_valores.setItem(row, 1, QTableWidgetItem(f'{freq:.2f}'))
206         self.tabla_valores.setItem(row, 2, QTableWidgetItem(f'{v1:.6f}'))
207         self.tabla_valores.setItem(row, 3, QTableWidgetItem(f'{v2:.6f}'))
208
209         # AUTO-SCROLL: Desplazar automáticamente a la última fila

```

Figure 25: Bucle principal de adquisición de datos por puerto de comunicación y llenado dinámico de la tabla de valores.

```

C:\Users\byron> Downloads > interfaz (1).py > Ventana
18 class Ventana(QMainWindow):
120     def iniciar_barrido(self):
209         # AUTO-SCROLL: Desplazar automáticamente a la última fila
210         self.scroll_to_bottom()
211
212         # LABEL con TU FORMATO
213         self.label_valores.setText(f"Frec: {freq:.2f} Hz | V1: {v1:.6f} | V2: {v2:.6f}")
214
215         # Gráficas
216         self.line1.set_data(self.f, self.val1)
217         self.line2.set_data(self.f, self.val2)
218         self.ax1.relim()
219         self.ax1.autoscale_view()
220         self.ax2.relim()
221         self.ax2.autoscale_view()
222         self.canvas.draw()
223         QApplication.processEvents()
224
225         print(f"Punto {i+1:03d} -> {freq:.2f} Hz | {v1:.6f} | {v2:.6f}")
226
227         time.sleep(0.05)
228
229     except Exception as e:
230         print(f"Error punto {i+1}: {e}")
231         self.label_estado.setText(f"⚠ Error punto {i+1}")
232         continue
233
234     self.running = False
235     self.boton.setEnabled(True)
236     self.boton_stop.setEnabled(False)
237     self.boton_guardar.setEnabled(True)
238     self.label_estado.setText("✅ Barrido completo ✓")
239
240     def detener(self):
241         self.running = False
242         self.label_estado.setText("■ Detenido")
243

```

Figure 26: Control de excepciones, actualización del autoscroll y manejo de estados de finalización del barrido experimental.

```

C:\Users\byron> Downloads > interfaz (1).py > Ventana
18 class Ventana(QMainWindow):
244     def guardar_datos(self):
246         self.label_estado.setText("❌ No hay datos")
247         return
248
249         timestamp = datetime.now().strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
250         filename, _ = QFileDialog.getSaveFileName(
251             self,
252             "Guardar datos",
253             f"lcr_{timestamp}.xlsx",
254             "Excel (*.xlsx)"
255         )
256
257         if filename:
258             df = pd.DataFrame({
259                 'Frecuencia (Hz)': self.f,
260                 'Valor Primario': self.val1,
261                 'Valor Secundario': self.val2
262             })
263             df.to_excel(filename, index=False, float_format="%.10f")
264             self.label_estado.setText("✅ Guardado correctamente")
265             print("Archivo:", filename)
266
267     def closeEvent(self, event):
268         if hasattr(self, 'lcr'):
269             self.lcr.close()
270             event.accept()
271
272 if __name__ == "__main__":
273     app = QApplication(sys.argv)
274     ventana = Ventana()
275     ventana.show()
276     sys.exit(app.exec_())

```

Figure 27: Rutina de exportación de los datos adquiridos a formato estructurado en Excel y cierre seguro de puertos.



Figure 28: Carbón activado de alta pureza YEC-8B utilizado como material activo en los electrodos.



Figure 29: Almidón soluble empleado como biopolímero aglutinante en las formulaciones optimizadas.

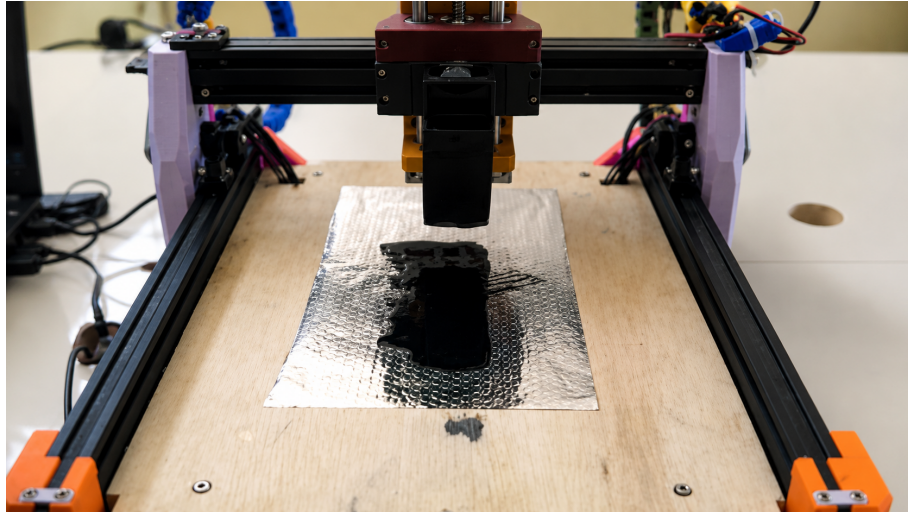


Figure 30: Máquina CNC ejecutando el barrido automatizado con la cuchilla dosificadora a 1 milímetro de espesor sobre el sustrato.



Figure 31: Preparación y colocación manual preliminar de la lechada (*slurry*) sobre la mesa de trabajo de la CNC.

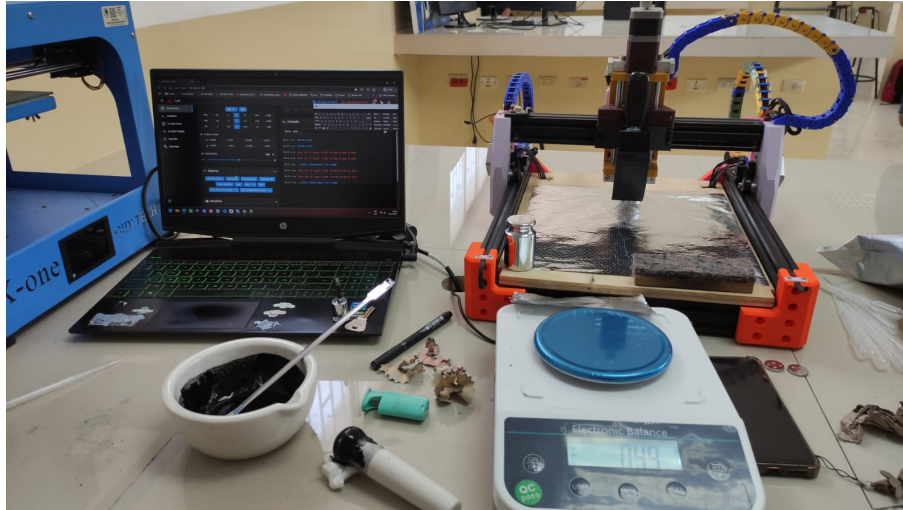


Figure 32: Vista general de la estación de trabajo que incluye el software de control de la CNC, balanza analítica y herramientas de preparación.



Figure 33: Conexión física de las celdas de prueba utilizando cables tipo Kelvin Clip acoplados al medidor LCR.



Figure 34: Banco de pruebas integrado con el software en Python y el medidor LCR para la adquisición de impedancia en coin-cells.

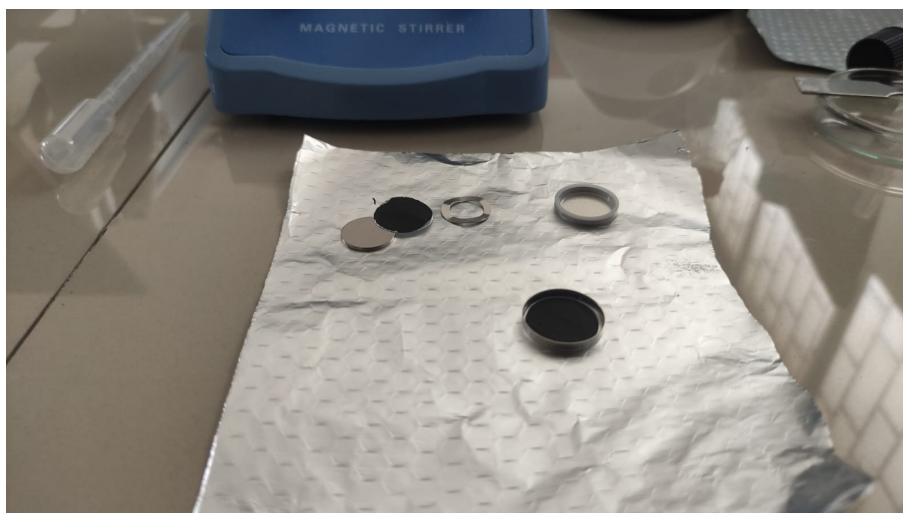


Figure 35: Componentes internos y despiece de un electrodo fabricado junto con los elementos de ensamblaje de la celda tipo coin-cell CR2032.

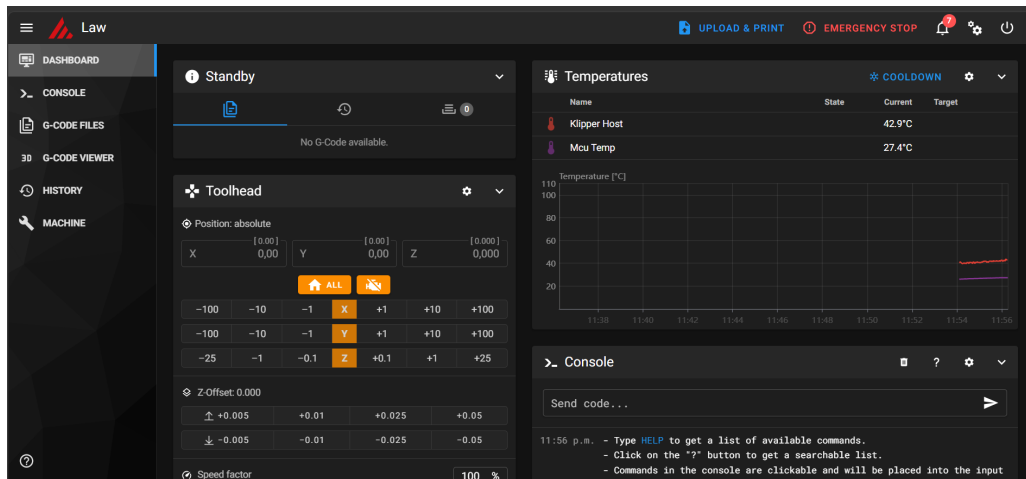


Figure 36: Interfaz de control de movimiento y consola de comandos del firmware Klipper para la operación de la máquina CNC.

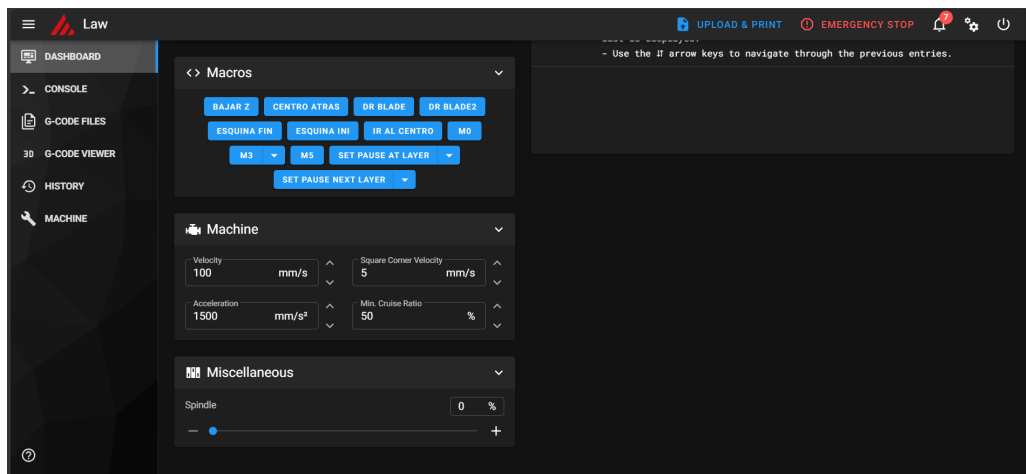


Figure 37: Panel de macros programados en el sistema Klipper (destacando el macro DR_BLADE) para estandarizar los barridos.