



**UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA**

FACSISTEL

**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
AUTOMATIZACIÓN**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**SÍNTESIS Y EVALUACIÓN
ELECTROQUÍMICA DE UN GEL
ELECTROLÍTICO PARA UN
SUPERCAPACITOR BIODEGRADABLE**

MELANI FIORELLA LAINEZ FIGUEROA

Dirigido por:
Ing. Bremnen Marino Véliz Noboa, Ph.D.

La Libertad - 2026

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con todo mi amor y gratitud a mis padres, Oscar y Katherine. En los momentos en que el camino se volvía oscuro, su apoyo constante, sacrificio y fe en mí fueron la luz que mantuvo encendida mi determinación.

A mis hermanas, por su complicidad, sus risas y por llenar mi mundo de alegría en cada paso de esta aventura.

A mi pareja, Byron, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por su paciencia infinita, por ser ese refugio que me devolvía las fuerzas para continuar y por celebrar cada logro a mi lado.

A mis amigos, Andrés y Edwin, por los desvelos compartidos, el apoyo mutuo y por hacer de la etapa universitaria una experiencia inolvidable.

AGRADECIMIENTO

Quisiera dar las gracias de corazón a todas las personas que hicieron este logro posible y que me acompañaron en cada etapa de este viaje.

A mi tutor de tesis, Ing. Bremnen Marino Véliz Noboa, Ph.D., por su valiosa guía, su paciencia y por brindarme los conocimientos necesarios para llevar a cabo este proyecto.

Al grupo de docentes que me impartió clases a lo largo de estos semestres, por compartir su sabiduría y por exigirme dar lo mejor de mí.

A mis padres, Oscar y Katherine, y a mis hermanas, Allison y Bianca, por su amor incondicional, por creer en mí y por recordarme siempre el valor del esfuerzo.

A mi pareja, Byron, por haber estado en cada instante de este camino, por ser mi apoyo incondicional, por ayudarme a levantarme y por creer siempre en mí.

A mis amigos, Andrés y Edwin, por el apoyo mutuo, por las risas y por esas inevitables peleas que al final del día se convertían en anécdotas.

Muchas gracias a todos.

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo de titulación denominado: **“Síntesis y Evaluación Electroquímica de un Gel Electrolítico para un Supercapacitor Biodegradable”**, elaborado por la estudiante **Melani Fiorella Lainez Figueroa**, 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.

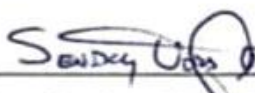


Ing. Bremnen Marino Véliz Noboa, PhD.
Tutor

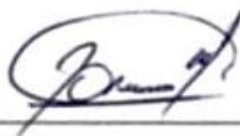
TRIBUNAL DE GRADO



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



Ing. Sendey Vera, MSc.
DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Bremnen Véliz, Ph.D.
TUTOR



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



Ing. Corina Gonzabay, Mgtr.
SECRETARIA DEL TRIBUNAL

Resumen

Este trabajo de investigación presenta el desarrollo y la caracterización electroquímica de un hidrogel biodegradable basado en almidón soluble, diseñado para actuar como electrolito gelificado en supercapacitores de almacenamiento energético. En este estudio se evaluó el impacto de la formulación y la concentración iónica sobre la conductividad y degradación del dispositivo. Para ello, se sintetizaron distintas variantes de hidrogeles, se ensamblaron celdas tipo moneda (0,3 cm de espesor y 20 cm² de área) y se caracterizaron mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

La muestra 5 logró la mayor conductividad iónica gracias a una reducción en su resistencia en serie (R_s). Tras seis semanas, las muestras mantuvieron un comportamiento estable en impedancia y fase, aunque las de mayor concentración iónica mostraron un leve aumento en la resistencia de transferencia de carga debido al reordenamiento interno de la matriz. En conclusión, este hidrogel biodegradable se perfila como una alternativa sostenible, eficiente y viable para el almacenamiento de energía limpia.

Palabras clave: supercapacitor, hidrogel biodegradable, almidón soluble, impedancia electroquímica.

Abstract

This research work presents the development and electrochemical characterization of a soluble starch-based biodegradable hydrogel, designed to function as a gel electrolyte in energy storage supercapacitors. This study evaluated the impact of formulation and ionic concentration on device conductivity and degradation. For this purpose, different hydrogel formulations were synthesized, assembled into coin cells (0.3 cm thickness and 20 cm² active area), and characterized via electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

Sample 5 achieved the highest ionic conductivity due to a reduction in its series resistance (R_s). After six weeks, the samples exhibited stable impedance and phase behavior, although those with higher ionic concentrations showed a slight increase in charge-transfer resistance attributed to internal matrix rearrangement. In conclusion, this biodegradable hydrogel represents a sustainable, efficient, and viable alternative for clean energy storage.

Keywords: supercapacitor, biodegradable hydrogel, soluble starch, electrochemical impedance.

Índice

Índice de figuras	9
Índice de tablas	10
1. Introducción	12
1.1. Justificación	12
1.2. Panorama actual	13
1.3. Objetivos	14
1.3.1. Objetivo general	14
1.3.2. Objetivos específicos	14
1.4. Fundamentos teóricos	14
1.4.1. Supercapacitores de doble capa eléctrica (EDLC) . . .	15
1.4.2. Pseudocapacitores	17
1.4.3. Geles electrolíticos: estructura y transporte	17
1.4.4. Caracterización por voltamperometría cíclica	18
1.5. Marco contextual	20
2. Métodos y diseño experimental	22
2.1. Métodos	22
2.2. Diseño experimental	22
2.2.1. Proceso de síntesis	22
2.2.2. Diseño del sistema de medida	23
2.3. Desarrollo experimental	24
2.3.1. Equipos principales, accesorios y consumibles	24
2.3.2. Protocolo técnico de preparación del gel electrolítico . .	25
2.3.3. Configuraciones y formulaciones experimentales	28
3. Resultados	30
3.1. Resultados de la caracterización inicial	30
3.2. Análisis de la caracterización por espectroscopía de impedancia electroquímica	31
3.2.1. Magnitud de la impedancia	31
3.2.2. Fase de la impedancia	32
3.2.3. Diagrama de Nyquist	33
3.2.4. Análisis comparativo de las muestras	34
3.3. Análisis de monitoreo de las muestras tras seis semanas	36
3.4. Análisis de la capacitancia real	40
3.5. Análisis de la capacitancia real tras seis semanas	42

3.6. Respuesta electroquímica del ensamblado final antes y después de polarización	44
3.7. Análisis de voltamperometría cíclica	49
3.7.1. Interpretación del comportamiento dinámico	50
Referencias	75

Índice de figuras

1.	Esquema básico de un supercapacitor de doble capa eléctrica .	15
2.	Curvas típicas de voltamperometría cíclica	19
3.	Dosificación de los reactivos	25
4.	Dispersión inicial del almidón en vórtice	26
5.	Adición del soluto iónico y gelatinización térmica	26
6.	Incorporación de glicerol en la matriz	27
7.	Estabilización y curado térmico del gel	28
8.	Comparación de la magnitud de la impedancia	32
9.	Comparación de la fase de la impedancia	33
10.	Comparación mediante diagrama de Nyquist	34
11.	Curvas comparativas de magnitud tras seis semanas	37
12.	Respuesta de fase comparativa tras seis semanas	38
13.	Diagramas de Nyquist comparativos tras seis semanas	39
14.	Evolución de la capacitancia real en función de la frecuencia .	41
15.	Evolución de la capacitancia real tras seis semanas	43
16.	Respuesta de magnitud de impedancia del ensamblado	45
17.	Ángulo de fase del ensamblado antes y después de polarización	46
18.	Diagrama de Nyquist del ensamblado final	47
19.	Evolución de la capacitancia real del ensamblado	48
20.	Voltamperometría cíclica: ciclo 1	50
21.	Voltamperometría cíclica: ciclo 2	51
22.	Voltamperometría cíclica: ciclo 3	52
23.	Voltamperometría cíclica: ciclo 4	52
24.	Dosificación de reactivos en balanza analítica	69
25.	Homogeneización en agitador tipo vórtice	69
26.	Vertido y gelatinización en cápsula de Petri	70
27.	Curado y estabilización térmica en horno Memmert	70
28.	Área de síntesis y preparación de muestras	71
29.	Adición de glicerol como plastificante	71
30.	Inspección visual de consistencia de premuestras	71
31.	Caracterización electroquímica con medidor LCR	72
32.	Adquisición automatizada con interfaz de Python	72
33.	Rotulado y codificación de las celdas de prueba	73
34.	Estructura de la matriz de tabulación en Excel	74
35.	Interfaz gráfica desarrollada en Python-PyQt5	74

Índice de tablas

1.	Definición de variables del modelo de capacitancia	16
2.	Definición de variables del modelo de capacitancia en función de la frecuencia	16
3.	Definición de variables del modelo de energía almacenada . . .	17
4.	Definición de símbolos en la ecuación de corriente farádica . .	17
5.	Definición de símbolos en la ecuación de Arrhenius	18
6.	Definición de símbolos en la ecuación de capacitancia específica	19
7.	Especificaciones técnicas de los equipos de síntesis	24
8.	Especificaciones de accesorios y materiales de laboratorio . . .	25
9.	Parámetros técnicos del procedimiento de síntesis	28
10.	Composición de las formulaciones experimentales del gel elec- trolítico	29
11.	Parámetros de dosificación y molaridad del soluto iónico . . .	30
12.	Definición de símbolos de la ecuación de conductividad	35
13.	Resistencia serie y conductividad iónica calculadas para las formulaciones de hidrogel	35
14.	Resistencia serie y conductividad iónica tras seis semanas . . .	40
15.	Valores de capacitancia real a frecuencias características . . .	42
16.	Capacitancia real a frecuencias características tras seis semanas	44
17.	Composición cuantitativa de la pasta para el electrodo	45
18.	Resistencia serie y conductividad iónica del ensamblado	47
19.	Capacitancia real del ensamblado antes y después de polarización	48
20.	Resultados de integración de área y capacitancia para $M \times 2$. .	49

Nomenclatura y abreviaturas

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

Símbolo / Abreviatura	Significado
A	Área efectiva de la celda
f	Frecuencia
I	Corriente
R_{ct}	Resistencia de transferencia de carga
R_s	Resistencia en serie
t	Espesor o grosor del hidrogel
V	Voltaje
$ Z $	Módulo de la impedancia total
Δt	Intervalo de tiempo
ϵ_0	Permitividad del vacío
θ	Ángulo de fase
μ	Permeabilidad
σ	Conductividad iónica
EIS	Espectroscopía de impedancia electroquímica
mS/cm	Milisiemens por centímetro
Ω	Ohmio

1. Introducción

1.1. Justificación

El almacenamiento de energía constituye un factor determinante en el desarrollo de sistemas electrónicos y de automatización. Sus aplicaciones abarcan desde dispositivos portátiles hasta redes eléctricas automatizadas, donde la capacidad de equilibrar la generación y el consumo de electricidad es fundamental. Esta necesidad ha impulsado la búsqueda de alternativas a las baterías convencionales, posicionando a los supercapacitores como una solución destacada debido a su alta densidad de potencia, ciclos rápidos de carga y una vida útil prolongada [1]. Sin embargo, la mayor parte de los electrolitos comerciales dependen de compuestos tóxicos, corrosivos y no biodegradables, lo que genera un impacto ambiental significativo [2].

En esta investigación se propone la síntesis y la caracterización de un gel electrolítico biodegradable a partir de una matriz de almidón soluble $(C_6H_{10}O_5)_n$, utilizando glicerol como plastificante e incorporando un soluto iónico para aportar conductividad. A diferencia de las alternativas sintéticas, el almidón es un biopolímero accesible, económico y biodegradable. La integración del soluto iónico en la matriz polimérica es esencial, ya que su disociación proporciona una alta densidad de portadores de carga móviles, optimizando el transporte iónico y la estabilidad electroquímica del dispositivo sin comprometer su carácter ecológico [3, 4].

La problemática identificada radica en la dificultad de encontrar un equilibrio entre eficiencia energética y sostenibilidad, dado que muchos sistemas actuales dependen de soluciones que presentan riesgos de fuga y corrosión. En este contexto, el uso de glicerol en la formulación es fundamental, ya que actúa como plastificante para reducir la temperatura de gelatinización y evitar la retrogradación del almidón. Esto garantiza una flexibilidad mecánica adecuada que permite al gel mantener un contacto interfacial óptimo con los electrodos, facilitando el transporte del soluto iónico y reduciendo la resistencia serie equivalente (R_s) [5].

El impacto de este trabajo abarca tanto el ámbito tecnológico como el ambiental. Al emplear solutos iónicos en una matriz de origen natural, se minimiza la generación de residuos electrónicos peligrosos. En el campo de la automatización, estos supercapacitores permiten el desarrollo de sistemas de respaldo energético más seguros para sensores inalámbricos, dispositivos IoT y robótica industrial, donde la rapidez de respuesta resulta esencial [6].

Finalmente, el desarrollo de este gel se alinea con los objetivos de la ingeniería electrónica sostenible. Su capacidad para suministrar pulsos de energía controlados lo convierte en un elemento ideal para aplicaciones de frenado

regenerativo y gestión de la demanda en tiempo real. Al implementar un electrolito basado en biopolímeros y solutos iónicos, se fortalece la infraestructura energética desde una perspectiva de economía circular y sostenibilidad ambiental [7].

1.2. Panorama actual

Los supercapacitores representan uno de los componentes más relevantes en el campo del almacenamiento de energía, particularmente en aplicaciones donde se requiere una alta densidad de potencia y tiempos de respuesta ultrarrápidos [8]. Sin embargo, su desarrollo enfrenta un obstáculo importante: los electrolitos tradicionales conllevan riesgos de toxicidad y un considerable impacto ambiental debido a su carácter corrosivo [9]. Esta problemática ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles alineadas con normativas como la Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva en Ecuador [10].

Actualmente, el almidón soluble $(C_6H_{10}O_5)_n$ destaca como una alternativa para la obtención de geles electrolíticos estables debido a su estructura polimérica [11]. El aprovechamiento de este biopolímero resulta especialmente pertinente en el contexto ecuatoriano, dada la alta disponibilidad y los estudios previos de caracterización de fuentes amiláceas en la región litoral [12], lo que respalda el potencial de escalabilidad a partir de materias primas locales. Diversos estudios subrayan que la eficacia de estos geles depende de la sinergia entre la matriz polimérica y sus aditivos. La incorporación de glicerol resulta fundamental para evitar la retrogradación del almidón [5], mientras que el control riguroso de la concentración de los solutos iónicos permite alcanzar niveles de conductividad competitivos frente a los electrolitos sintéticos convencionales [15].

Sin embargo, la mayoría de los estudios reportados en la literatura se limitan a la síntesis básica del material sin profundizar en su comportamiento dinámico. Por lo tanto, persiste una brecha importante en la evaluación de estos geles dentro de celdas y prototipos funcionales, especialmente en relación con su respuesta electroquímica durante ciclos de carga y descarga, así como su estabilidad y desempeño a lo largo del tiempo. Asimismo, prevalece el desafío técnico de reducir la resistencia serie equivalente (R_s) sin comprometer la integridad estructural de la matriz biopolimérica [2].

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Sintetizar y evaluar electroquímicamente un gel electrolítico biodegradable basado en almidón soluble $(C_6H_{10}O_5)_n$ y glicerol, mediante la incorporación de solutos iónicos, para su evaluación en prototipos de supercapacitores funcionales.

1.3.2. Objetivos específicos

- Investigar las propiedades fisicoquímicas del almidón soluble y el rol del glicerol como agente plastificante, mediante revisión bibliográfica y ensayos preliminares, para el establecimiento de las bases técnicas de una matriz polimérica biodegradable y estable.
- Sintetizar geles electrolíticos variando la concentración de solutos iónicos, a través de procesos de gelatinización controlada, para la optimización de la conductividad iónica y la estabilidad del gel.
- Caracterizar el comportamiento electroquímico del gel mediante espectroscopía de impedancia (EIS) y voltamperometría cíclica (CV), para la validación del modelo de circuito equivalente y la determinación de la ventana de estabilidad electroquímica.
- Evaluar el desempeño funcional del gel, determinando parámetros de capacitancia específica y resistencia serie equivalente (R_s), para la verificación de la viabilidad técnica frente a los electrolitos convencionales.

1.4. Fundamentos teóricos

Los supercapacitores son dispositivos electroquímicos de almacenamiento de energía que combinan las propiedades de los capacitores convencionales y las baterías. A diferencia de estas últimas, los supercapacitores almacenan energía mediante mecanismos superficiales, lo cual ofrece una serie de ventajas: alta densidad de potencia de hasta 10 kW/kg, tiempos rápidos de carga y descarga, eficiencia energética superior al 95 % y una vida útil que supera los 100 000 ciclos con una degradación mínima. Sin embargo, su densidad de energía, comprendida entre 5 y 50 Wh/kg, es menor que la de las baterías comerciales, por lo que se utilizan preferentemente en aplicaciones donde la potencia y la durabilidad son prioritarias [2, 16].

1.4.1. Supercapacitores de doble capa eléctrica (EDLC)

El mecanismo de almacenamiento en los EDLC se basa en la formación de una doble capa eléctrica en la interfaz electrodo-electrolito, tal como fue descrito por Helmholtz y refinado posteriormente por Gouy, Chapman y Stern. En este sistema no ocurre transferencia de carga electrónica (proceso no farádico), sino que los iones del electrolito se adsorben electrostáticamente sobre la superficie del electrodo [16].

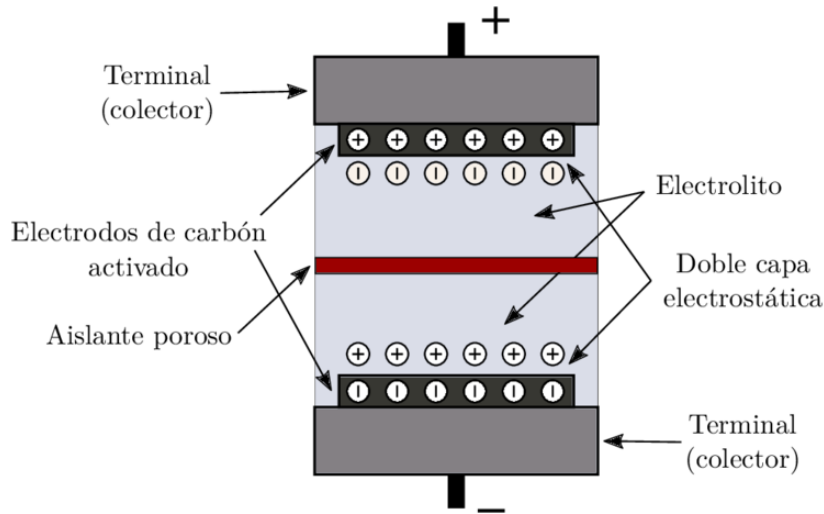


Figura 1: Esquema básico de un supercapacitor de doble capa eléctrica [13].

Como se observa en la figura 1, la arquitectura base del dispositivo consta de terminales metálicos que actúan como colectores de corriente, encargados de conducir el flujo de electrones hacia el circuito externo y contribuir a la disipación térmica de la celda. Sobre estos colectores se disponen los electrodos activos de carbón activado, cuya morfología altamente porosa provee un área superficial específica elevada. Esta área específica es un parámetro de diseño fundamental, ya que maximiza el espacio disponible para interactuar con la fase polimérica del electrolito que impregna todo el dispositivo. Separando físicamente ambos electrodos se localiza una membrana porosa, comúnmente denominada separador, cuya función es doble: por un lado, actúa como un aislante eléctrico que evita el contacto directo entre los electrodos para impedir cortocircuitos; por otro lado, su porosidad intrínseca permite la libre migración de los cationes (+) y aniones (-) del electrolito, garantizando el transporte de corriente iónica interna durante los ciclos de carga y descarga. La capacitancia de un EDLC puede estimarse mediante un modelo basado en un capacitor de placas paralelas, como se expresa en la ecuación (1):

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

Símbolo	Descripción
C	Capacitancia (F)
ε_r	Permitividad relativa del electrolito (matriz de almidón)
ε_0	Permitividad eléctrica del vacío ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m)
A	Área superficial efectiva del electrodo (m^2)
d	Distancia efectiva de separación de carga (m)

Tabla 1: Definición de variables del modelo de capacitancia.

A partir de los datos obtenidos mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), la capacitancia en función de la frecuencia se determina mediante la ecuación (2):

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

Símbolo	Descripción
$C(f)$	Capacitancia en función de la frecuencia (F)
Z''	Componente imaginaria de la impedancia (Ω)
f	Frecuencia de excitación (Hz)
$ Z $	Módulo de la impedancia (Ω)

Tabla 2: Definición de variables del modelo de capacitancia en función de la frecuencia.

Como se observa en la ecuación (1), la capacitancia es directamente proporcional al área superficial del electrodo y a la constante dieléctrica del medio, e inversamente proporcional a la distancia de separación de las cargas. Materiales como el carbón activado y el grafeno son comúnmente empleados como electrodos debido a su elevada área superficial específica, comprendida entre 1 000 y 3 000 m^2/g , adecuada conductividad y notable estabilidad química. Por su parte, la energía almacenada en el dispositivo se calcula mediante la ecuación (3):

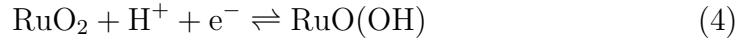
$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3)$$

Símbolo	Descripción
E	Energía almacenada (J)
C	Capacitancia total (F)
V	Diferencia de potencial aplicada (V)

Tabla 3: Definición de variables del modelo de energía almacenada.

1.4.2. Pseudocapacitores

Los pseudocapacitores emplean reacciones farádicas superficiales (oxidación-reducción, intercalación o adsorción química) para almacenar carga, lo que les permite alcanzar mayor densidad de energía que los EDLC. Entre los materiales más comunes se encuentran óxidos metálicos como el RuO_2 y MnO_2 , polímeros conductores como la polianilina (PANI) o el polipirrol (PPy), y compuestos bidimensionales como los MXenes [8]. Un ejemplo de mecanismo farádico es la reacción reversible de RuO_2 con protones, mostrada en la ecuación (4):



La cinética de estos procesos se modela con la ecuación de corriente farádica (5):

$$I = nF \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial t} \right) \quad (5)$$

Símbolo	Descripción
I	Corriente farádica instantánea (A)
n	Número de electrones transferidos
F	Constante de Faraday (96 485 C/mol)
Γ	Concentración superficial de especies redox (mol/cm^2)

Tabla 4: Definición de símbolos en la ecuación de corriente farádica.

1.4.3. Geles electrolíticos: estructura y transporte

Los geles electrolíticos están compuestos por una red tridimensional polimérica que retiene un solvente con solutos iónicos disueltos. En esta investigación, se emplea una matriz de almidón soluble $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ plastificada con glicerol para evitar la retrogradación y garantizar flexibilidad mecánica [5]. Esta arquitectura les permite exhibir simultáneamente elasticidad, estabilidad mecánica y conductividad iónica [3, 4].

Existen hidrogeles, definidos por su capacidad para retener agua, y organogeles. Los primeros son más compatibles con aplicaciones sostenibles debido a su alta biodegradabilidad. Según la naturaleza de las uniones en la red polimérica, los sistemas se clasifican en geles físicos, caracterizados por un entrelazamiento reversible sin enlaces covalentes como ocurre en el almidón, o geles químicos, estructurados mediante un entrecruzamiento covalente permanente.

El transporte de solutos iónicos se explica mediante tres mecanismos principales [3]:

- **Difusión vehicular:** el ion se desplaza junto con su esfera de solvatación.
- **Mecanismo de salto:** los iones saltan entre sitios activos de la cadena polimérica.
- **Transporte segmental:** el movimiento de las cadenas del almidón facilita el paso de los iones.

La dependencia de la conductividad con respecto a la temperatura se modela mediante la ecuación de Arrhenius (6):

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left(-\frac{E_a}{k_B T} \right) \quad (6)$$

Símbolo	Descripción
σ	Conductividad iónica (S/cm)
σ_0	Factor preexponencial (S/cm)
E_a	Energía de activación (eV)
k_B	Constante de Boltzmann ($8,617 \times 10^{-5}$ eV/K)
T	Temperatura absoluta (K)

Tabla 5: Definición de símbolos y parámetros en la ecuación de Arrhenius para la activación térmica de la conductividad.

1.4.4. Caracterización por voltamperometría cíclica

La voltamperometría cíclica (CV) es la técnica electroquímica fundamental empleada para evaluar el comportamiento de los materiales en celdas de almacenamiento. Esta técnica permite diferenciar entre mecanismos de

almacenamiento capacitivo y farádico, así como determinar la capacitancia específica mediante la ecuación (7):

$$C_{\text{sp}} = \frac{1}{2m\nu\Delta V} \int_{V_1}^{V_2} I(V) dV \quad (7)$$

Símbolo	Descripción
C_{sp}	Capacitancia específica (F/g)
m	Masa del material activo del electrodo (g)
ν	Velocidad de barrido de potencial (V/s)
ΔV	Ventana de potencial operativo (V)
$I(V)$	Corriente instantánea en función del potencial (A)

Tabla 6: Definición de símbolos en la ecuación de capacitancia específica.

Como se observa en la figura 2, estas curvas típicas se clasifican en tres categorías principales según su respuesta de corriente frente al potencial aplicado: capacitiva de doble capa (EDLC), pseudocapacitiva y de tipo batería. En primer lugar, los materiales que operan bajo el mecanismo de EDLC exhiben un perfil voltamperométrico idealmente rectangular y simétrico. Esta geometría característica refleja un comportamiento capacitivo puro donde la respuesta de corriente es constante y no depende del voltaje, lo cual confirma un almacenamiento de carga de naturaleza puramente electrostática y no farádica mediante la acumulación reversible de iones en la interfaz electrodo-electrolito.

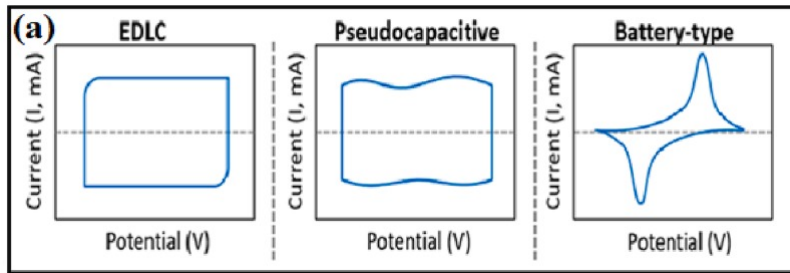


Figura 2: Curvas típicas de voltamperometría cíclica [14].

Por otra parte, la respuesta pseudocapacitiva se distingue por un perfil aproximadamente rectangular que retiene la simetría capacitiva general del sistema, pero introduce puntos de inflexión u ondulaciones someras. Estas ligeras desviaciones evidencian la ocurrencia de transferencias de carga farádicas

superficiales extraordinariamente rápidas y reversibles, donde los procesos redox o de electrosorción iónica ocurren en un amplio rango de potencial simulando una respuesta capacitiva global.

Finalmente, las curvas pertenecientes a mecanismos de tipo batería se desvían por completo de la geometría rectangular para mostrar picos de corriente agudos y bien definidos, correspondientes a los procesos de oxidación (ánodo) y reducción (cátodo). Este perfil voltamperométrico revela un proceso de transferencia electrónica farádica y cuasirreversible asociado a transiciones de fase o fenómenos de intercalación y desintercalación iónica profunda dentro de la red del material conductor, donde la cinética del sistema se encuentra limitada por la velocidad de difusión iónica en el estado sólido.

1.5. Marco contextual

En la actualidad, el desarrollo de tecnologías de almacenamiento energético sostenibles se ha convertido en una prioridad a nivel global, especialmente ante la creciente demanda de sistemas eléctricos más seguros y ecológicos. En este contexto, los supercapacitores han emergido como una solución viable gracias a su alta densidad de potencia, rápida respuesta y larga vida útil. No obstante, su impacto ambiental aún depende significativamente de los materiales utilizados, en particular los electrolitos. Los electrolitos líquidos tradicionales, aunque eficientes, presentan desventajas críticas como toxicidad, inflamabilidad y generación de residuos electrónicos peligrosos. De acuerdo con informes recientes, este tipo de componentes puede representar hasta el 38 % de los contaminantes en residuos electrónicos, lo que ha motivado una búsqueda intensiva de alternativas basadas en la química verde.

Entre estas alternativas, los geles electrolíticos se han consolidado como una opción prometedora al ofrecer una combinación favorable de conductividad iónica, estabilidad mecánica y potencial biodegradabilidad. Si bien investigaciones previas, como la de Zhao *et al.* [18], han validado el desempeño de matrices sintéticas de alcohol polivinílico (PVA) con resultados de conductividad estables, la tendencia científica actual se desplaza hacia el uso de biopolímeros puros. En este sentido, estudios internacionales han reportado que geles basados en almidón y plastificantes naturales alcanzan niveles de degradación del 92 % en un periodo de 60 días, manteniendo propiedades electroquímicas funcionales durante sus ciclos de operación iniciales [11].

La presente investigación tiene lugar en los laboratorios de la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), institución que provee la infraestructura técnica necesaria para la síntesis química, el modelamiento y la caracterización inicial de materiales funcionales.

El desarrollo de este gel de almidón soluble $(C_6H_{10}O_5)_n$ y solutos iónicos se ve

fortalecido por una red de colaboración académica estratégica que integra el apoyo de tres docentes investigadores pertenecientes a distintas universidades del Ecuador. Este esquema de trabajo colaborativo facilita un intercambio constante de diseños, opiniones técnicas y validación cruzada de resultados, lo que permite un análisis multicéntrico y otorga una base científica robusta al comportamiento del prototipo diseñado.

Para la evaluación del dispositivo, se establecieron protocolos de caracterización electroquímica multiescala. En las instalaciones de la UPSE se ejecutaron los análisis de respuesta dinámica mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), empleando sistemas de adquisición de datos por medio de un medidor LCR en un rango de frecuencias de 20 Hz a 500 kHz, analizando el comportamiento del gel frente a películas de aluminio. Para complementar la caracterización, se realizaron pruebas de voltamperometría cíclica (CV) a distintas velocidades de barrido en los laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) en Quito. Estas mediciones permitieron evaluar la respuesta del electrolito bajo condiciones operativas reales.

2. Métodos y diseño experimental

2.1. Métodos

Esta investigación adopta un enfoque experimental y cuantitativo orientado al diseño, formulación y caracterización electroquímica del gel electrolítico biodegradable. Esta metodología facilita una transición estructurada desde la síntesis de los materiales hasta la validación del dispositivo, garantizando el cumplimiento de los criterios técnicos y científicos del estudio.

Inicialmente, se realizó la selección de insumos para la síntesis del hidrogel. Se optó por almidón soluble a base de papa ($(C_6H_{10}O_5)_n$) como matriz polimérica principal, glicerol como agente plastificante para mitigar la retrogradación y solutos iónicos como fase conductora. Para la definición de los protocolos de síntesis se adaptaron metodologías consolidadas [20], ajustando los parámetros de mezcla y gelatinización a las condiciones operativas de laboratorio. La caracterización fisicoquímica y morfológica del gel formulado comprendió la evaluación de la viscosidad tras la gelatinización, el análisis de grupos funcionales mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y la observación de la microestructura interna mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

El diseño experimental evaluó la respuesta del hidrogel ante la variación progresiva de la concentración de glicerol y la dosificación de solutos iónicos. La caracterización electroquímica se ejecutó en dos fases: en la primera, se realizaron mediciones de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) en los laboratorios de la UPSE para modelar la resistencia interna y el transporte de carga; en la segunda fase, se llevaron a cabo ensayos de voltamperometría cíclica (CV) en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) para cuantificar la capacitancia específica y la estabilidad electroquímica [2].

El análisis cuantitativo de los datos experimentales permitió determinar la conductividad iónica del electrolito y modelar su dependencia térmica y energía de activación mediante la ecuación de Arrhenius [15]. Finalmente, la viabilidad técnica y ambiental del desarrollo se contextualizó bajo el marco regulatorio vigente en el Ecuador, integrando los lineamientos de la Ley Orgánica de Economía Circular y el Acuerdo Ministerial MAATE-2022-067 [19].

2.2. Diseño experimental

2.2.1. Proceso de síntesis

La síntesis del gel electrolítico se desarrolló a escala de laboratorio en las instalaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena. El proceso

experimental se estructuró en tres etapas consecutivas con control directo de parámetros físicos para garantizar la reproducibilidad y trazabilidad en la obtención del biopolímero. La primera etapa correspondió al procesamiento térmico, orientado a lograr la gelatinización completa del almidón soluble $(C_6H_{10}O_5)_n$ mediante calentamiento controlado. Posteriormente, se realizó la incorporación homogénea del agente plastificante (glicerol) y de los solutos iónicos bajo agitación magnética constante, favoreciendo la interpenetración de los portadores de carga en la matriz polimérica. Finalmente, se estableció una etapa de curado y estabilización estructural para obtener una membrana con consistencia semisólida apta para su integración en el dispositivo. Todas las fases se ejecutaron empleando los sistemas de control integrados en los equipos de laboratorio, permitiendo el ajuste sistemático de las formulaciones evaluadas.

2.2.2. Diseño del sistema de medida

El diseño del sistema de medida se fundamentó en la caracterización electroquímica del gel mediante un modelo de circuito equivalente en serie, el cual permitió representar las propiedades eléctricas del material a través de la resistencia serie equivalente (R_s) y la capacitancia (C). Este análisis utilizó el módulo de la impedancia ($|Z|$), definido en la ecuación (8), para desglosar la respuesta del electrolito frente a estímulos de corriente alterna en función de la reactancia capacitiva (X_c):

$$|Z| = \sqrt{R_s^2 + X_c^2} \quad (8)$$

donde la reactancia capacitiva se obtiene a partir de la frecuencia de excitación (f) y la capacitancia del dispositivo, conforme a la ecuación (9):

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (9)$$

En las instalaciones de la UPSE, la caracterización dinámica se realizó mediante espectroscopía de impedancia. El montaje experimental consistió en colocar la película de gel entre dos láminas conductoras de aluminio que actuaron como electrodos de contacto. Para la adquisición de datos se utilizó un medidor LCR, operando en un rango de frecuencias de 20 Hz a 500 kHz con una amplitud de señal de excitación de 10 mV. El procesamiento de los datos permitió extraer los valores de resistencia y capacitancia necesarios para la validación del prototipo.

De forma complementaria, se efectuaron ensayos especializados en los laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional para el análisis multiescala del sistema. En esta etapa se realizaron pruebas de voltamperometría cíclica

(CV) en una ventana de potencial de 0 a 1,0 V a una velocidad de barrido de 20 mV/s (0,02 V/s), así como la caracterización morfológica y elemental mediante microscopía electrónica de barrido acoplada a espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (SEM-EDX). Estas mediciones permitieron evaluar con precisión la estabilidad estructural y la respuesta electroquímica interfacial del gel electrolítico de almidón bajo condiciones controladas de polarización.

2.3. Desarrollo experimental

2.3.1. Equipos principales, accesorios y consumibles

Para la ejecución de las fases de síntesis y caracterización inicial, se emplearon equipos e insumos de laboratorio que garantizaron la reproducibilidad de las formulaciones y el control térmico de los biopolímeros. En la tabla 7 se detallan las especificaciones técnicas de los equipos principales de pesaje, agitación y secado, mientras que en la tabla 8 se describen los accesorios de borosilicato y material volumétrico utilizados para la preparación de los reactivos.

Equipo / Instrumento	Especificaciones técnicas
Balanza de precisión	Modelo: VEVOR YB2001 Precisión: $\pm 0,01$ g Rango: 0 a 200 g Tiempo de estabilización: < 3 s
Agitador magnético con calefacción	Modelo: HS-12 Agitación magnética continua con control de temperatura para la gelatinización homogénea del biopolímero
Mezclador tipo vórtice (<i>vortex</i>)	Modelo: VM200 Agitación orbital rápida para la homogeneización de premezclas y soluciones iniciales
Horno de secado	Modelo: Memmert UN 55 Rango de temperatura: 30 a 300 °C Precisión de control: $\pm 0,3$ °C Volumen interno: 55 L Controlador: PID digital

Tabla 7: Especificaciones técnicas de los equipos principales utilizados en la síntesis del hidrogel.

Accesorio / Material	Especificaciones
Varilla agitadora	Material: Vidrio de borosilicato Dimensiones: 5 mm × 25 cm Resistencia térmica: −20 °C a 150 °C
Vaso de precipitado	Marca: Pyrex® Capacidad: 100 mL Material: Vidrio de borosilicato 3.3 de alta resistencia térmica
Cápsula de Petri	Diámetro: 90 mm Altura: 15 mm Material: Poliestireno grado laboratorio Volumen nominal: 60 mL

Tabla 8: Especificaciones de los accesorios y materiales de laboratorio utilizados en la experimentación.

2.3.2. Protocolo técnico de preparación del gel electrolítico

El proceso de obtención del gel electrolítico inició con la fase de dosificación, empleando la balanza de precisión para registrar con una resolución de $\pm 0,01$ g el almidón soluble ($C_6H_{10}O_5$)_n y el sulfato de sodio (Na_2SO_4), asegurando las proporciones estipuladas para la matriz polimérica y los portadores de carga.

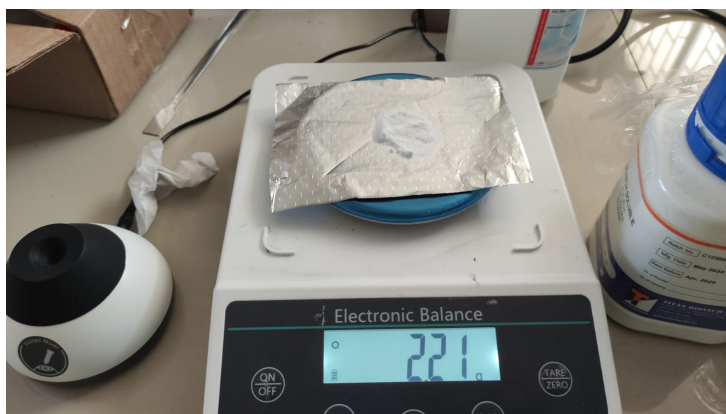


Figura 3: Dosificación de los reactivos.

Para la dispersión inicial, el volumen total de agua destilada se dividió en dos fracciones de trabajo (60 % y 40 %). En primera instancia, el almidón

soluble se colocó en un tubo de ensayo junto con el 60 % del agua destilada a temperatura ambiente. Esta mezcla se sometió a una agitación enérgica mediante el mezclador tipo vórtice para lograr una suspensión homogénea y libre de aglomerados. Posteriormente, la suspensión se trasladó a una cápsula de Petri sobre la superficie del agitador magnético.



Figura 4: Dispersión inicial del almidón en mezclador de vórtice y traslado a cápsula de Petri.

En paralelo, el sulfato de sodio (Na_2SO_4) se disolvió completamente en el 40 % restante de agua destilada. Una vez activado el calentamiento en la placa en un rango de 70 a 80 °C, se adicionó gradualmente esta solución iónica a la cápsula de Petri. La agitación magnética continua facilitó la ruptura de los gránulos de almidón, la disociación del soluto y la formación de una red tridimensional traslúcida, viscosa y homogénea.



Figura 5: Adición del soluto iónico y gelatinización térmica sobre el agitador magnético.

Una vez alcanzado el punto de gelatinización, se suspendió el calentamiento y se procedió a la fase de plastificación mediante la adición de glicerol. Este agente plastificante redujo las fuerzas intermoleculares entre las cadenas de almidón, aportando flexibilidad mecánica al hidrogel. La mezcla se mantuvo bajo agitación residual hasta constatar la integración completa del plastificante en la matriz.



Figura 6: Incorporación de glicerol tras el corte térmico e integración en la matriz.

Finalmente, la cápsula de Petri con el hidrogel sintetizado se colocó en el horno de secado (Mettler UN 55) a una temperatura controlada de 70 °C durante una hora, logrando la estabilización térmica, la consolidación estructural de la matriz polimérica y la evaporación del exceso de humedad previo a la caracterización electroquímica.



Figura 7: Estabilización y curado térmico del gel electrolítico en horno a 70 °C.

2.3.3. Configuraciones y formulaciones experimentales

Los parámetros operativos seleccionados para la síntesis se fundamentaron en la cinética de gelatinización y la estabilidad térmica de los componentes, tal como se resume en la tabla 9. El rango de temperatura en placa (70 a 80 °C) se estableció por encima de la temperatura de gelatinización característica del almidón de papa, asegurando la desestructuración completa de los gránulos sin comprometer la integridad térmica de la matriz. Asimismo, la etapa de secado a 70 °C durante una hora permitió la consolidación estructural de la membrana mediante la evaporación controlada del solvente libre, evitando la formación prematura de grietas por contracción volumétrica.

Parámetro	Valor
Temperatura en placa	70 a 80 °C
Tiempo de calentamiento	10 a 15 min
Temperatura en horno (curado)	70 °C
Tiempo de secado	1 h

Tabla 9: Parámetros técnicos del procedimiento de síntesis.

Para evaluar el impacto de la concentración del electrolito sobre el transporte de carga y la cohesión física de la matriz polimérica, se formularon cinco composiciones base (M1 a M5) manteniendo constantes la masa de almidón

(0,6 g), el volumen de glicerol (0,1 mL) y el volumen de solvente (10,0 mL). La variación sistemática del sulfato de sodio (Na_2SO_4) desde 0,2 g hasta 2,2 g permitió explorar desde regímenes con baja disponibilidad de portadores de carga hasta concentraciones próximas a la saturación iónica. Adicionalmente, se formuló una muestra escalada ($M \times 2$) con un volumen total de 50,0 mL y una relación proporcional de solutos, orientada a la obtención de películas de mayor área para los ensayos de caracterización electroquímica. La composición cuantitativa de cada formulación se detalla en la tabla 10.

Componente	M1	M2	M3	M4	M5	M $\times$ 2
Almidón soluble (g)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	3,0
Sulfato de sodio, Na_2SO_4 (g)	0,2	0,4	0,6	1,5	2,2	4,0
Glicerol (mL)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0
Agua destilada (mL)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	50,0

Tabla 10: Composición de las formulaciones experimentales del gel electrolítico a base de almidón soluble, variando la concentración de sulfato de sodio (Na_2SO_4).

3. Resultados

En este capítulo se presentan los datos experimentales sobre el comportamiento electroquímico del gel de almidón soluble $(C_6H_{10}O_5)_n$ con sulfato de sodio (Na_2SO_4) como soluto conductor. Los resultados se estructuran a partir de la caracterización de las cinco formulaciones base y la formulación escalada, evaluadas en celdas tipo moneda para garantizar la reproducibilidad geométrica y de contacto eléctrico.

3.1. Resultados de la caracterización inicial

La caracterización inicial se enfocó en determinar la estabilidad y la respuesta dinámica del biopolímero bajo concentraciones crecientes de sulfato de sodio, manteniendo constantes la matriz de almidón soluble, el plastificante y el volumen de solvente en las formulaciones base. A partir de la masa molecular del Na_2SO_4 (142,04 g/mol), se determinó la cantidad de sustancia y la concentración molar nominal para cada muestra, como se resume en la tabla 11.

Muestra	Na_2SO_4 (g)	Cantidad (mol)	Concentración molar (mol/L)
M1	$0,20 \pm 0,01$	0,0014	0,141
M2	$0,40 \pm 0,01$	0,0028	0,282
M3	$0,60 \pm 0,01$	0,0042	0,422
M4	$1,50 \pm 0,01$	0,0106	1,056
M5	$2,20 \pm 0,01$	0,0155	1,549
$M \times 2$	$4,00 \pm 0,01$	0,0282	0,563

Tabla 11: Parámetros de dosificación y molaridad del soluto iónico para la caracterización en coin cells.

Como se aprecia en la tabla 11, la concentración molar de las formulaciones base se incrementó de forma progresiva desde 0,141 mol/L (muestra M1) hasta 1,549 mol/L (muestra M5), permitiendo analizar el comportamiento del electrolito desde un régimen diluido hasta concentraciones cercanas al límite de saturación de la matriz. Por su parte, la muestra escalada $M \times 2$ (50,0 mL de solvente) presentó una concentración intermedia de 0,563 mol/L.

3.2. Análisis de la caracterización por espectroscopía de impedancia electroquímica

El análisis integra los resultados obtenidos mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), permitiendo evaluar la dinámica del transporte iónico y el comportamiento interfacial del gel de almidón soluble $(C_6H_{10}O_5)_n$ dopado con sulfato de sodio (Na_2SO_4) .

3.2.1. Magnitud de la impedancia

Como se observa en la figura 8, en la región de bajas frecuencias (20 Hz) la muestra M1 presentó una magnitud de impedancia ($|Z|$) de aproximadamente 520 Ω , la cual descendió de forma monótona hasta alcanzar 10 Ω a altas frecuencias. La muestra M2 registró un comportamiento análogo, alcanzando a 20 Hz un valor inicial menor, cercano a 470 Ω .

La reducción de $|Z|$ entre las muestras M1 (520 Ω) y M2 (470 Ω) corrobora que el incremento de la concentración del soluto iónico disminuye la resistencia global al transporte de portadores de carga. A frecuencias superiores a 10 kHz, la impedancia de ambas muestras convergió hacia una resistencia residual de 10 Ω .

En la muestra M3, la magnitud de la impedancia a 20 Hz se situó en aproximadamente 510 Ω , manteniendo en la zona de altas frecuencias una respuesta estable con valores cercanos a 12 Ω . Por su parte, la muestra M4 evidenció una disminución sustancial de la impedancia en bajas frecuencias, alcanzando 435 Ω a 20 Hz y estabilizándose en altas frecuencias en un valor residual de aproximadamente 8 Ω , lo que refleja una baja resistencia serie equivalente (R_s).

Finalmente, la muestra M5 alcanzó el menor valor de impedancia a bajas frecuencias (405 Ω a 20 Hz), estabilizándose en altas frecuencias en el intervalo de 6 a 8 Ω . Esta respuesta ratifica la optimización en la movilidad de los iones Na^+ y SO_4^{2-} dentro de la matriz polimérica.

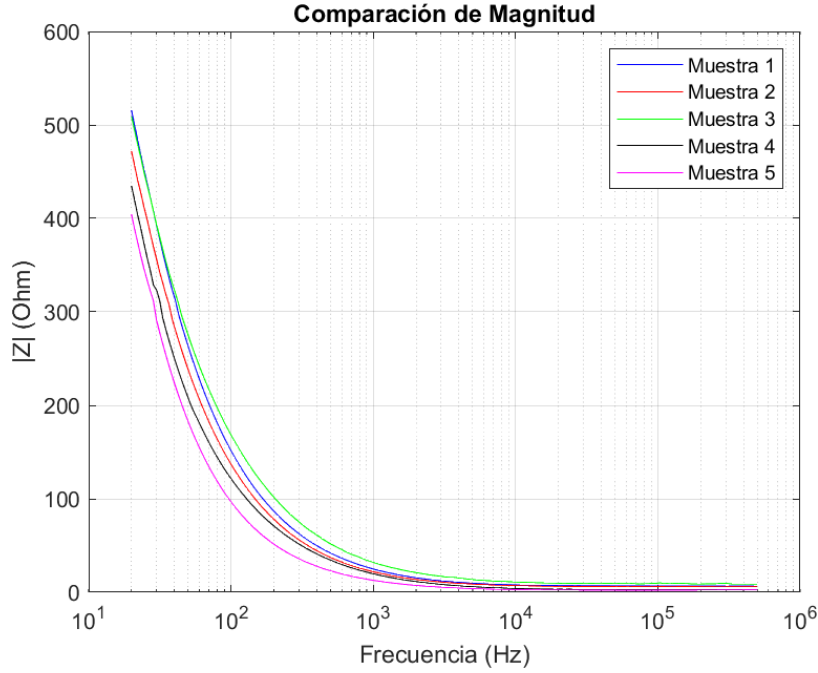


Figura 8: Comparación de la magnitud de la impedancia ($|Z|$) en función de la frecuencia para las formulaciones evaluadas.

3.2.2. Fase de la impedancia

Como se muestra en la figura 9, la fase de la muestra M1 alcanzó un ángulo de -74° a 20 Hz, confirmando una respuesta predominantemente capacitiva del gel incluso con baja dosificación de Na_2SO_4 . La muestra M2 presentó un ángulo de fase de $-73,5^\circ$ en la misma frecuencia, preservando el carácter dieléctrico y capacitivo de la matriz.

La muestra M3 registró un ángulo inicial de -71° a 20 Hz. En contraste, la formulación M4 alcanzó -80° , aproximándose de manera significativa al límite de un comportamiento capacitivo ideal (-90°), lo que confirma una óptima polarización interfacial y respuesta de la doble capa electroquímica. La formulación M5 exhibió la mayor respuesta capacitiva entre todas las muestras analizadas, registrando un ángulo de fase de -82° a 20 Hz. Este comportamiento demuestra que la concentración salina de la muestra M5 maximiza la acumulación electrostática de carga en la interfaz gel-electrodo.

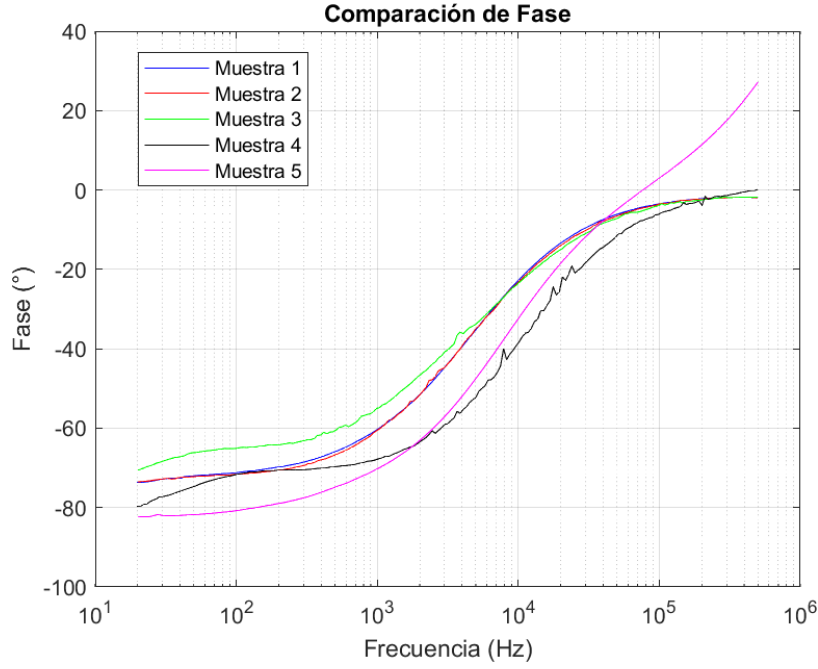


Figura 9: Comparación del ángulo de fase de la impedancia en función de la frecuencia.

3.2.3. Diagrama de Nyquist

El diagrama de Nyquist presentado en la figura 10 ilustra la respuesta de impedancia compleja en el plano cartesiano (Z' frente a Z''). Para todas las formulaciones se observa una tendencia cuasi vertical orientada hacia el semi-plano capacitivo negativo, sin presencia de semicírculos a altas frecuencias, lo que confirma una resistencia de transferencia de carga (R_{ct}) despreciable y un mecanismo dominante de doble capa eléctrica (EDL).

Las formulaciones M1 y M2 presentan un comportamiento electroquímico muy similar, con una resistencia serie equivalente (R_s) cercana a los 10Ω y una respuesta capacitiva estable. Por su parte, la muestra M3 experimenta un desplazamiento hacia la derecha en el eje real (Z'), alcanzando una mayor resistencia global y una menor pendiente, asociada a una ligera limitación en la difusión iónica de la matriz.

En contraste, al aumentar la concentración de soluto en las formulaciones M4 y M5, las curvas se desplazan progresivamente hacia la izquierda del eje real. La muestra M5 exhibe la menor resistencia de inicio en altas frecuencias y la pendiente más pronunciada hacia la vertical en la región de bajas frecuencias, consolidando la menor resistencia interna y la mayor eficiencia en el almacenamiento capacitivo de carga en la interfaz gel-electrodo.

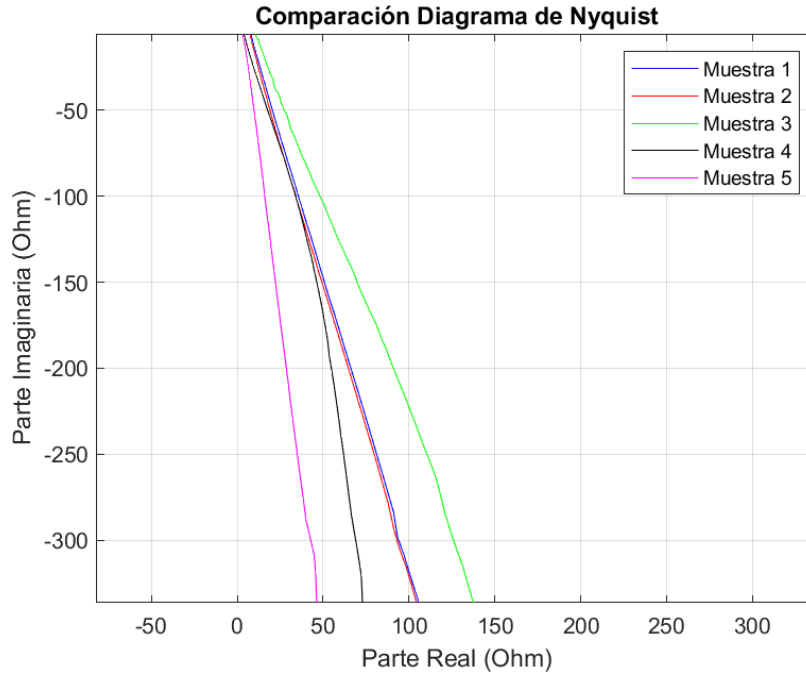


Figura 10: Comparación de los espectros de impedancia mediante diagramas de Nyquist para las formulaciones del gel electrolítico.

3.2.4. Análisis comparativo de las muestras

La evaluación comparativa entre las formulaciones evidencia el impacto directo de la concentración de Na_2SO_4 sobre la impedancia global de la matriz de almidón soluble $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$. Este análisis permite determinar la composición con mejor desempeño para el transporte y almacenamiento de energía electroquímica.

La figura 8 presenta la evolución de la magnitud de la impedancia ($|Z|$) en función de la frecuencia. Se observa una tendencia clara: a medida que se incrementa la concentración molar del soluto, la impedancia en la región de bajas frecuencias (20 Hz) disminuye notablemente. La muestra M5 registró el valor mínimo de la serie (405Ω), seguida por la muestra M4 (435Ω). La muestra M3 exhibió un aumento temporal en la impedancia respecto a M2, atribuible a un reordenamiento estructural transitorio, tras el cual se retoma el descenso marcado en M4 y M5, confirmando que una mayor densidad de portadores libres favorece la conductividad global del electrolito.

En cuanto a la respuesta dieléctrica (figura 9), el espectro de fase revela que la formulación M5 posee el carácter capacitivo más puro, con un ángulo de -82° a 20 Hz. Las muestras con mayor dopaje iónico (M4 y M5) superaron el

umbral de los -80° , alejándose de la respuesta obtenida en las tres primeras formulaciones (-71° a -74°). Este corrimiento hacia la idealidad (-90°) ratifica una consolidación eficiente de la doble capa electroquímica en la interfaz gel-electrodo.

En el diagrama de Nyquist (figura 10), la muestra M5 se posiciona en el extremo izquierdo del eje real (Z') con la pendiente más cercana a la vertical, reflejando una resistencia serie equivalente (R_s) mínima y un régimen de difusión iónica óptimo. Por ende, la formulación con 2,2 g de Na_2SO_4 (muestra M5) presenta la mejor respuesta electroquímica en la matriz de almidón $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$.

Para cuantificar las propiedades de transporte iónico de cada formulación, se determinó la conductividad iónica (σ) en función de la resistencia del electrolito (R_s), a partir de la geometría de la celda de ensayo con espesor $t = 0,3$ cm y área efectiva $A = 20$ cm²:

$$\sigma = \left(\frac{1}{R_s} \right) \cdot \left(\frac{t}{A} \right) \quad (10)$$

Símbolo	Descripción
σ	Conductividad iónica del electrolito (S/cm o mS/cm)
R_s	Resistencia del electrolito / resistencia serie equivalente (Ω)
t	Espesor efectivo de la película de gel (cm)
A	Área superficial transversal de contacto (cm ²)

Tabla 12: Definición de símbolos y unidades físicas en la ecuación de conductividad iónica.

Los valores de resistencia serie equivalente (R_s) presentados en la tabla 13 se extrajeron a partir de los espectros de impedancia (EIS) a la frecuencia de 500 kHz, donde los efectos capacitivos de interfaz se anulan y predomina la respuesta óhmica pura del material.

Muestra	Na_2SO_4 (g)	R_s (Ω)	Conductividad (mS/cm)
M1	0,20	10,50	1,43
M2	0,40	9,00	1,67
M3	0,60	11,20	1,34
M4	1,50	7,80	1,92
M5	2,20	6,50	2,31

Tabla 13: Resistencia serie y conductividad iónica calculadas para las cinco muestras de hidrogel ($t = 0,3$ cm, $A = 20$ cm²).

La conductividad iónica (σ), expresada en mS/cm, refleja la movilidad efectiva de los cationes Na^+ y los aniones SO_4^{2-} dentro de la matriz polimérica. Los resultados evidencian una dependencia no lineal entre la concentración salina y el transporte iónico:

Al aumentar la concentración desde M1 hasta M2, la conductividad iónica se incrementó de 1,43 mS/cm a 1,67 mS/cm debido a la mayor disponibilidad de portadores libres. La formulación M3 registró un descenso hasta 1,34 mS/cm ($R_s = 11,20 \Omega$), atribuible a interacciones electrostáticas locales y empaquetamiento transitorio de las cadenas que reducen la movilidad segmental.

Finalmente, al incrementar la masa de sal en las formulaciones M4 y M5, la resistencia R_s disminuyó de forma sostenida (7,80 Ω y 6,50 Ω), alcanzando la muestra M5 una conductividad máxima de 2,31 mS/cm (un incremento del 61,5 % respecto a M1). Este comportamiento corrobora la formación de una red de percolación interconectada que favorece la difusión rápida de iones en el electrolito biodegradable.

3.3. Análisis de monitoreo de las muestras tras seis semanas

Para evaluar la estabilidad temporal y la durabilidad del gel electrolítico, se realizó un segundo barrido de caracterización electroquímica a las cinco formulaciones tras un periodo de seis semanas (1008 h) de almacenamiento en condiciones ambientales controladas. Las formulaciones evaluadas mantuvieron el gradiente creciente en la adición de Na_2SO_4 : M1 (0,2 g), M2 (0,4 g), M3 (0,6 g), M4 (1,5 g) y M5 (2,2 g). Este seguimiento temporal permitió identificar la evolución de la red polimérica de almidón $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ y evaluar el impacto del envejecimiento sobre el transporte iónico y la polarización interfacial.

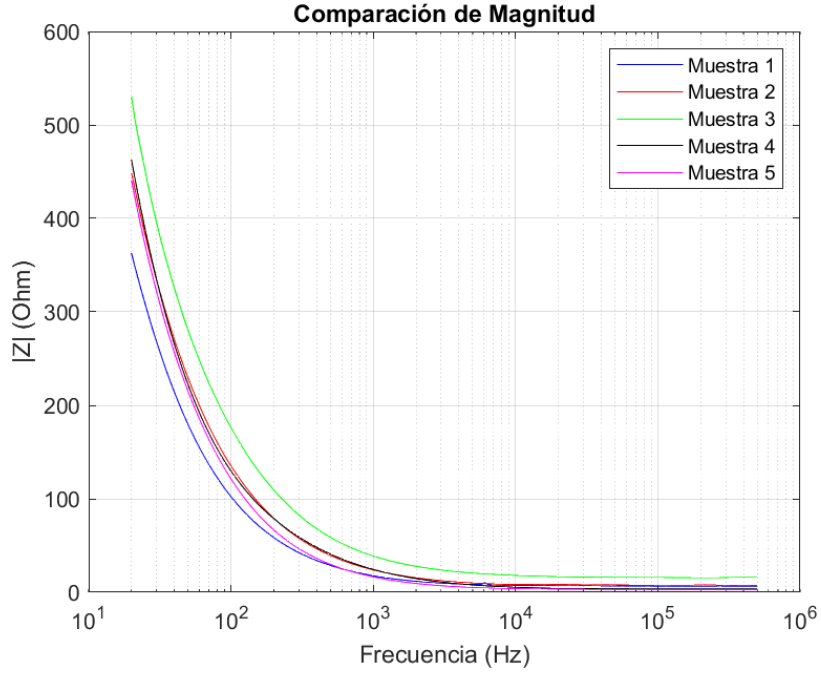


Figura 11: Curvas comparativas de la magnitud de la impedancia ($|Z|$) tras seis semanas de almacenamiento.

En la figura 11, se observa que la muestra M1 presentó la menor impedancia en la región de baja frecuencia ($\approx 360 \Omega$), conservando una baja resistencia global tras el periodo de reposo. Las formulaciones M2, M4 y M5 exhibieron una respuesta agrupada en el intervalo de 440Ω a 460Ω a 20 Hz. Por su parte, la muestra M3 registró la mayor impedancia en todo el espectro, superando los 530Ω a bajas frecuencias; esto corrobora que dicha concentración intermedia induce una reorganización estructural en la matriz que restringe la movilidad iónica de forma sostenida a lo largo del tiempo.

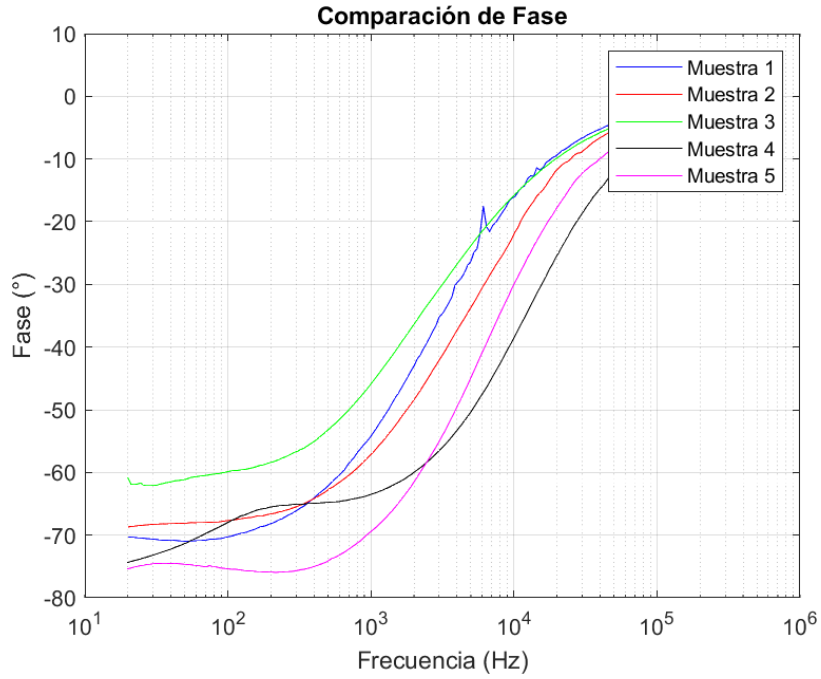


Figura 12: Respuesta comparativa del ángulo de fase tras seis semanas de almacenamiento.

La respuesta de fase (figura 12) evidencia la retención del comportamiento capacitivo en las formulaciones evaluadas. En bajas frecuencias, las muestras con mayor concentración salina (M4 y M5) alcanzaron los ángulos de fase más negativos, situándose entre -74° y -75° , lo que confirma una adecuada polarización de la doble capa electroquímica. Las muestras M1 y M2 mantuvieron una respuesta estable en el rango de -69° a -70° . En contraste, la muestra M3 registró una respuesta capacitiva menor, iniciando en aproximadamente -61° a 20 Hz y decayendo más rápidamente hacia 0° ante el incremento de frecuencia.

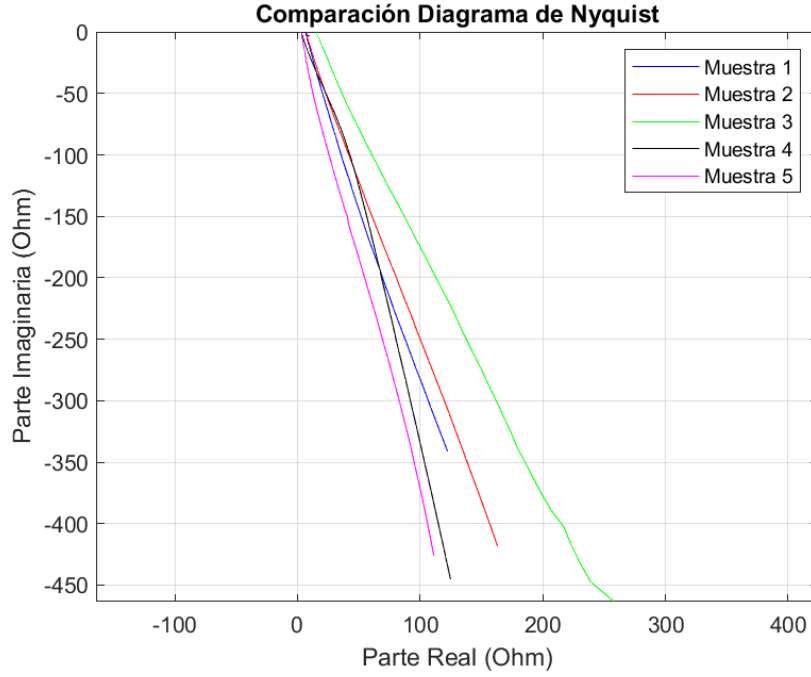


Figura 13: Diagramas de Nyquist comparativos para las cinco muestras tras seis semanas de almacenamiento.

El espectro de Nyquist tras seis semanas (figura 13) corrobora la estabilidad de la doble capa electroquímica en las formulaciones dopadas. La muestra M5 conservó la trayectoria con mayor verticalidad y la menor resistencia en el eje real, ratificando una excelente retención del comportamiento capacitivo. Las formulaciones M4 y M1 exhibieron perfiles con pendientes estables y un leve incremento resistivo. Por su parte, la muestra M2 presentó una mayor dispersión hacia la derecha, mientras que la muestra M3 evidenció la mayor degradación en el transporte de carga, alcanzando valores en el eje real (Z') superiores a los 250 Ω .

Para cuantificar el impacto del envejecimiento sobre el transporte iónico, se determinaron los valores de resistencia serie equivalente (R_s) a 500 kHz y la conductividad iónica resultante tras las seis semanas de almacenamiento, empleando las dimensiones de celda ($t = 0,3$ cm y $A = 20$ cm²) y la ecuación (10). Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 14.

Muestra	Na₂SO₄ (g)	R_s (Ω)	Conductividad (mS/cm)
M1	0,20	11,10	1,35
M2	0,40	10,30	1,46
M3	0,60	13,40	1,12
M4	1,50	8,60	1,74
M5	2,20	7,20	2,08

Tabla 14: Resistencia serie (R_s) y conductividad iónica (σ) calculadas tras seis semanas de almacenamiento ($t = 0,3$ cm, $A = 20$ cm²).

La comparación entre los valores iniciales y los obtenidos tras seis semanas confirma que la formulación M5 retuvo más del 90 % de su conductividad iónica original (2,08 mS/cm frente a 2,31 mS/cm iniciales), ratificando la estabilidad química de la matriz de almidón plastificada con glicerol frente a la deshidratación y la precipitación salina.

3.4. Análisis de la capacitancia real

La capacitancia real (C') permite cuantificar la capacidad efectiva de almacenamiento de carga eléctrica en la interfaz formada por el gel de almidón y los electrodos a lo largo del espectro de frecuencias. En la figura 14 se ilustra la respuesta de las cinco formulaciones evaluadas, permitiendo identificar los mecanismos de dispersión dieléctrica y la dinámica de relajación iónica característicos del electrolito biopolimérico.

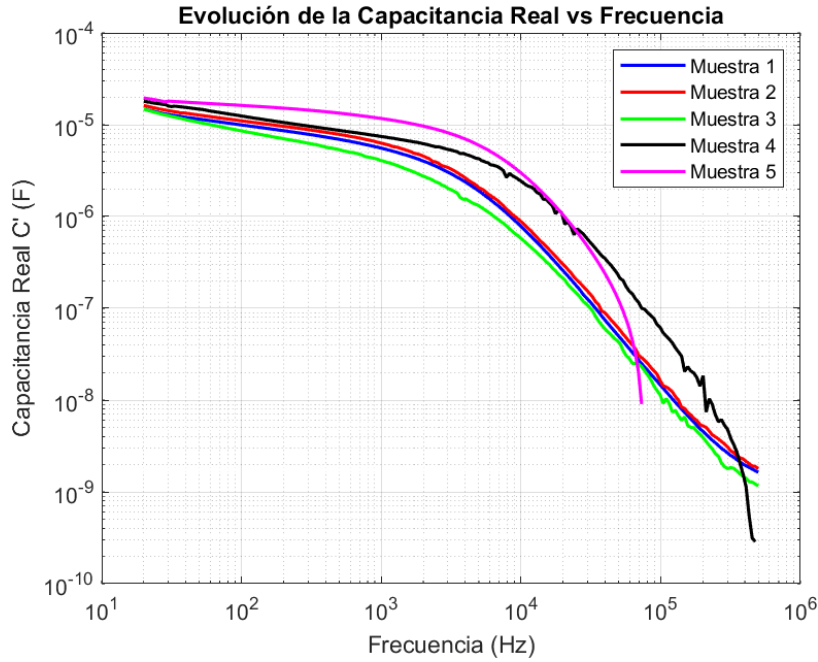


Figura 14: Evolución de la capacitancia real (C') en función de la frecuencia para las muestras evaluadas.

A bajas frecuencias (20 a 100 Hz), la muestra M5 alcanzó la mayor capacidad inicial de almacenamiento, situándose próxima a los $2,0 \times 10^{-5}$ F ($20,0 \mu\text{F}$), seguida por las muestras M4 y M2 con valores cercanos a $1,7 \times 10^{-5}$ F y $1,6 \times 10^{-5}$ F, respectivamente. Este comportamiento superior se atribuye a la mayor disponibilidad de portadores de carga y a la adecuada plastificación de la matriz polimérica. Dicha plastificación otorga flexibilidad segmental a las cadenas de almidón, facilitando la acumulación electrostática de los iones Na^+ y SO_4^{2-} cuando la velocidad de polarización del campo es baja.

Con el incremento de la frecuencia (10^2 a 10^4 Hz), todas las curvas registraron un descenso pronunciado y sostenido en el valor de C' . Este fenómeno representa la dispersión dieléctrica típica de electrolitos gelificados, donde la frecuencia de alternancia del campo eléctrico supera la movilidad de los solutos iónicos en la matriz de hidrogel. En consecuencia, los iones carecen del tiempo de relajación suficiente para difundirse y reorientarse hacia la superficie del electrodo, reduciendo drásticamente la contribución de la capacitancia interfacial.

En la tabla 15 se sintetizan los valores cuantitativos de capacitancia real extraídos a frecuencias representativas del barrido.

Muestra	Na ₂ SO ₄ (g)	$C'_{20\text{ Hz}}$ (μF)	$C'_{1\text{ kHz}}$ (μF)	$C'_{500\text{ kHz}}$ (nF)
M1	0,20	14,5	0,38	2,1
M2	0,40	16,0	0,45	2,3
M3	0,60	13,8	0,29	1,9
M4	1,50	17,2	0,62	0,8
M5	2,20	20,0	0,89	1,2

Tabla 15: Valores de capacitancia real (C') extraídos a frecuencias características (20 Hz, 1 kHz y 500 kHz).

En el régimen de alta frecuencia ($> 10^4$ Hz), la muestra M5 experimentó un colapso acelerado en su capacitancia a partir de los 50 kHz, mientras que la muestra M4 exhibió fluctuaciones asociadas a efectos inductivos parásitos o impedancia de los conectores a frecuencias elevadas. Por el contrario, las muestras M1, M2 y M3 presentaron una respuesta altamente estable y predecible, convergiendo de forma uniforme hacia valores en la escala de los nanofaradios ($\approx 2,0 \times 10^{-9}$ F a 500 kHz).

Este análisis confirma que las formulaciones con mayor carga salina (M4 y M5) maximizan la densidad de carga en el régimen de baja frecuencia, consolidándose como las configuraciones idóneas para el almacenamiento de energía en supercapacitores.

3.5. Análisis de la capacitancia real tras seis semanas

Para determinar la retención capacitiva y la estabilidad a largo plazo del electrolito, se evaluó la evolución de la capacitancia real (C') tras un periodo de seis semanas (1008 h) de almacenamiento en condiciones ambientales controladas. En la figura 15 se presentan los espectros obtenidos para las formulaciones evaluadas, permitiendo analizar los efectos de la reorganización en la matriz biopolimérica y la respuesta iónica residual.

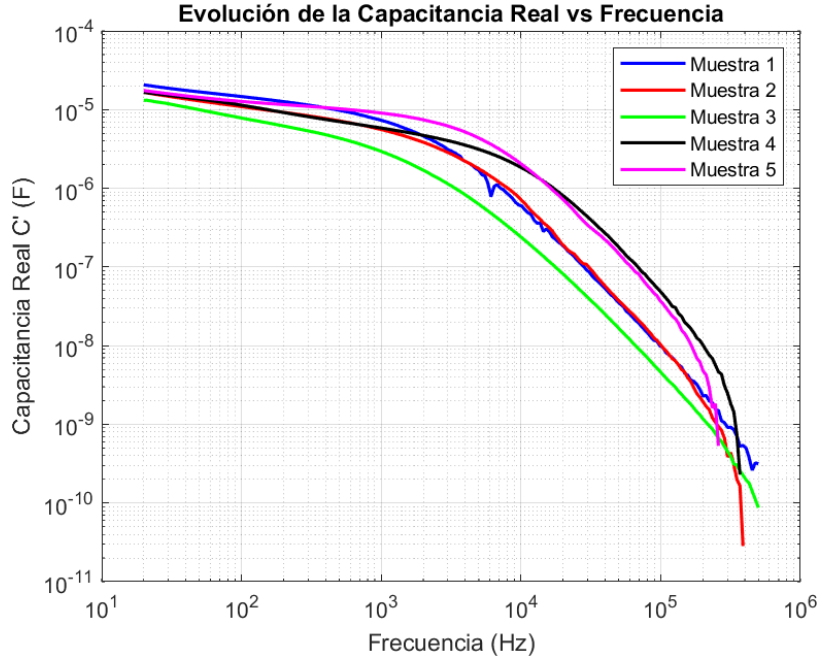


Figura 15: Evolución de la capacitancia real (C') en función de la frecuencia para las muestras evaluadas tras seis semanas de almacenamiento.

En la región de bajas frecuencias (20 a 100 Hz), la muestra M1 lideró la respuesta acumulativa, alcanzando un valor máximo de $2,15 \times 10^{-5}$ F ($21,5 \mu\text{F}$) a 20 Hz. Por su parte, las formulaciones M2, M4 y M5 presentaron una notable estabilidad respecto a sus mediciones iniciales, situándose en un intervalo comprendido entre $1,6 \times 10^{-5}$ F y $1,7 \times 10^{-5}$ F. La formulación M3 conservó el valor más bajo de capacitancia ($\approx 1,3 \times 10^{-5}$ F), lo que refleja una mayor restricción en la acumulación interfacial de carga tras el envejecimiento.

A frecuencias intermedias (10^3 a 10^5 Hz), el comportamiento se diferenció en dos tendencias marcadas. Las formulaciones M4 y M5 exhibieron la menor tasa de atenuación, conservando niveles de capacitancia superiores en el orden de 10^{-7} F a 10 kHz. Esta respuesta indica que la interacción entre la matriz de almidón y el plastificante en ambas formulaciones preserva canales de percolación más estables, capaces de responder eficazmente ante campos eléctricos alternos de alta velocidad.

En la tabla 16 se resumen los valores de capacitancia real extraídos a frecuencias características tras el periodo de seguimiento.

Muestra	Na ₂ SO ₄ (g)	$C'_{20\text{ Hz}}$ (μF)	$C'_{1\text{ kHz}}$ (μF)	$C'_{500\text{ kHz}}$ (nF)
M1	0,20	21,5	0,32	1,4
M2	0,40	16,2	0,39	1,6
M3	0,60	13,1	0,22	1,1
M4	1,50	16,8	0,58	0,7
M5	2,20	17,0	0,76	0,9

Tabla 16: Capacitancia real (C') a frecuencias características (20 Hz, 1 kHz y 500 kHz) tras seis semanas de almacenamiento.

En el extremo de altas frecuencias ($> 10^5$ Hz), todas las curvas decayeron hacia el orden de los picofaradios (10^{-10} F), atribuible al límite de relajación dieléctrica del solvente y los iones solvatados en la red. Asimismo, la formulación M1 registró una leve perturbación en el intervalo de 6 a 8 kHz, vinculada a reordenamientos locales de carga en la superficie del electrodo. En síntesis, tras seis semanas de almacenamiento, las formulaciones M4 y M5 preservaron la mejor respuesta capacitiva en frecuencias intermedias y altas, mientras que M1 mantuvo una elevada capacidad de almacenamiento en condiciones cuasiestacionarias.

3.6. Respuesta electroquímica del ensamblado final antes y después de polarización

Para evaluar el comportamiento del electrolito integrado en una celda completa, se analizó el dispositivo ensamblado utilizando la formulación intermedia (muestra M3), considerada como el punto de equilibrio estructural y de solvatación iónica. La caracterización mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) se ejecutó en dos condiciones operativas: en estado de reposo inicial (circuito abierto sin polarización previa) y tras la aplicación de un potencial continuo de 1,5 V, determinando la respuesta de polarización interfacial y la reestructuración de la doble capa electroquímica.

Los electrodos del dispositivo fueron fabricados mediante carbón activado YEC-8B como material activo poroso de alta superficie específica. Como aglutinantes biopoliméricos hidrosolubles se emplearon carboximetilcelulosa (CMC) y almidón soluble ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)_n, utilizando agua destilada como medio de dispersión. La formulación cuantitativa empleada para el depósito y conformado de los electrodos se detalla en la Tabla 17.

Componente	Masa / Volumen
Carbón activado (YEC-8B)	0,85 g
Carboximetilcelulosa (CMC)	0,14 g
Almidón soluble ($C_6H_{10}O_5$) _n	0,09 g
Agua destilada (solvente)	9,0 mL

Tabla 17: Composición cuantitativa de la pasta para la preparación de los electrodos.

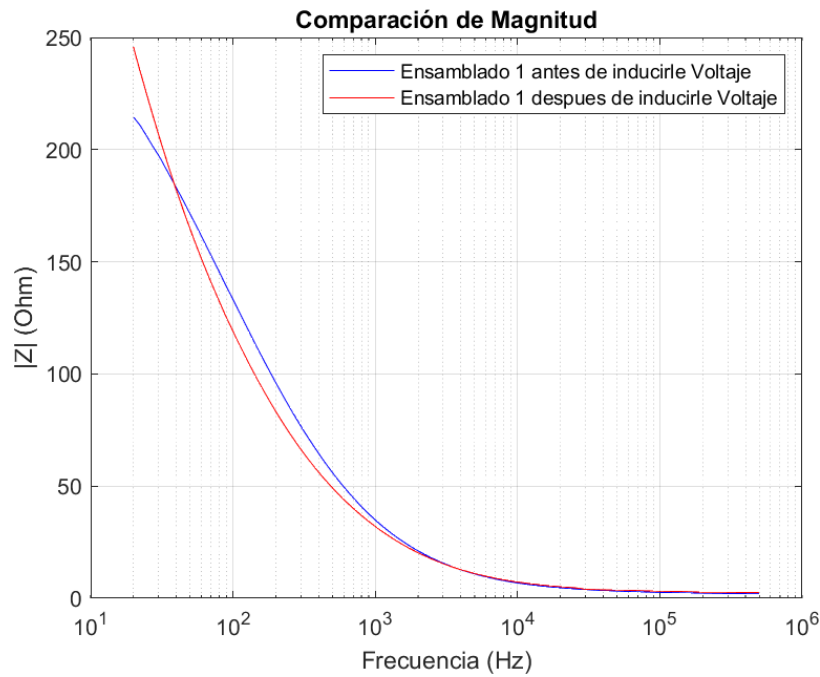


Figura 16: Respuesta de la magnitud de impedancia ($|Z|$) en función de la frecuencia para el ensamblado antes y después de polarizar a 1,5 V.

En la figura 16 se observa que la magnitud de la impedancia ($|Z|$) en bajas frecuencias (20 Hz) experimentó un leve incremento tras la polarización de 1,5 V, pasando de aproximadamente 215 Ω a 245 Ω , asociado a la reorganización y empaquetamiento compacto de los iones dentro de la estructura microporosa del carbón activado. En la región de frecuencias intermedias (50 Hz a 2 kHz), el ensamblado polarizado exhibió una menor impedancia global frente al estado de reposo. A frecuencias superiores a 3 kHz, ambas curvas convergieron hacia la resistencia serie del electrolito y contactos ($R_s \approx 2,5 \Omega$), demostrando que el voltaje continuo aplicado no alteró la integridad estructural ni la resistividad del gel.

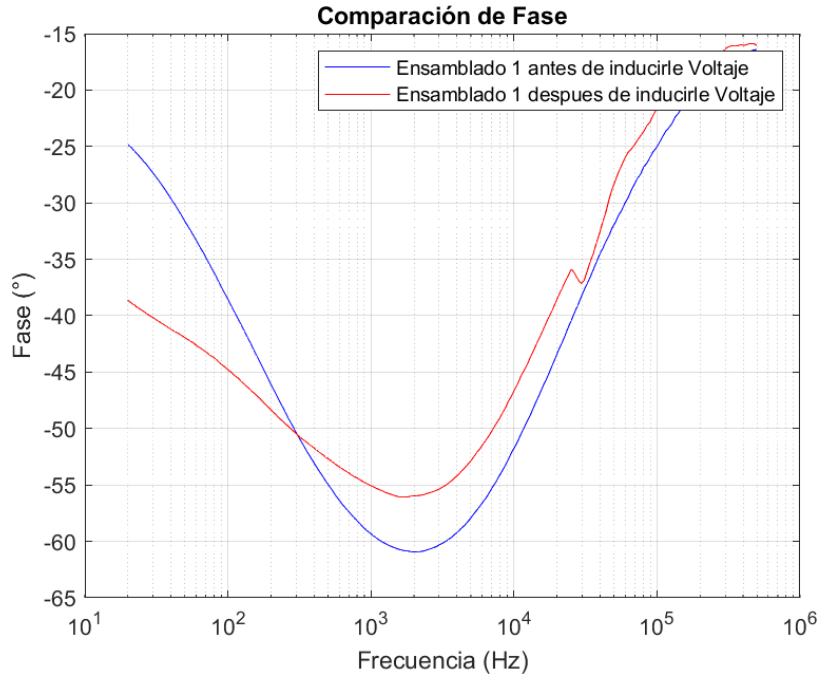


Figura 17: Ángulo de fase en función de la frecuencia para el dispositivo ensamblado antes y después de aplicar un potencial de 1,5 V.

La respuesta de fase (figura 17) confirma una activación electroquímica interfacial. Tras la polarización a 1,5 V, el ángulo de fase a bajas frecuencias (20 Hz) se tornó más capacitivo, desplazándose desde -25° en reposo hasta -39° . Asimismo, en el intervalo de 1 a 3 kHz, la celda polarizada conservó un ángulo mínimo estabilizado en -56° . Este desplazamiento hacia valores más negativos refleja que el campo eléctrico aplicado induce una orientación ordenada de los iones Na^+ y SO_4^{2-} sobre la superficie porosa del electrodo.

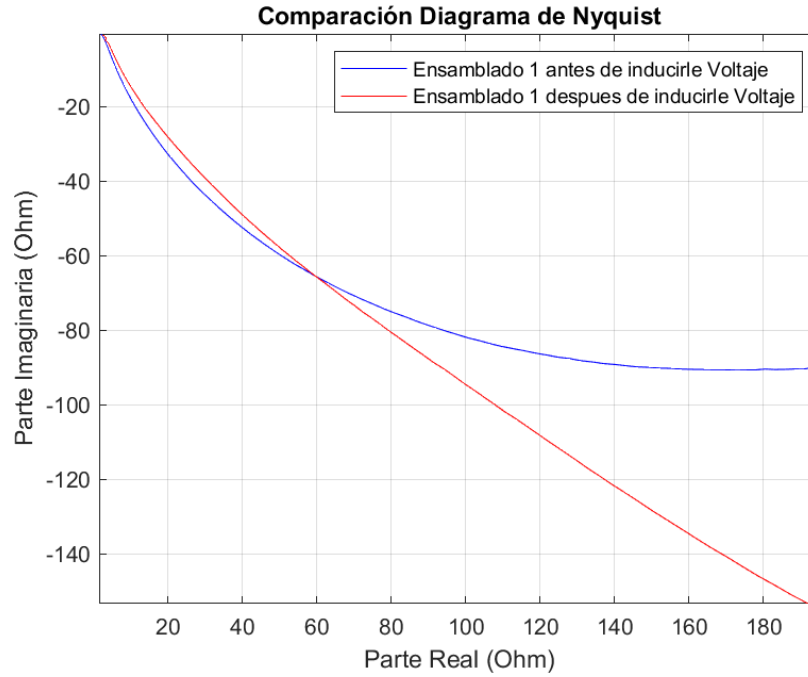


Figura 18: Diagrama de Nyquist comparativo del ensamblado antes y después de aplicar polarización continua de 1,5 V.

El diagrama de Nyquist (figura 18) ilustra la transición en los mecanismos de transporte. Antes de polarizar, el sistema exhibió una curvatura con tendencia dispersiva a lo largo del eje real. Tras inducir el potencial de 1,5 V, el espectro adquirió una trayectoria lineal con pendiente capacitiva pronunciada hacia el semiplano negativo (alcanzando -160Ω en Z''), comportamiento característico de la formación consolidada de una doble capa eléctrica (EDL) con difusión de Warburg en electrodos porosos.

Para cuantificar los parámetros óhmicos del dispositivo completo, se evaluó la resistencia serie (R_s) a alta frecuencia (500 kHz) y la conductividad iónica asociada (σ), cuyos valores se resumen en la tabla 18.

Condición operativa	R_s (Ω)	Conductividad σ (mS/cm)
Sin polarizar (0,0 V)	2,50	6,00
Polarizado (1,5 V)	2,45	6,12

Tabla 18: Resistencia serie (R_s) y conductividad iónica (σ) del dispositivo ensamblado antes y después de polarización ($t = 0,3$ cm, $A = 20$ cm²).

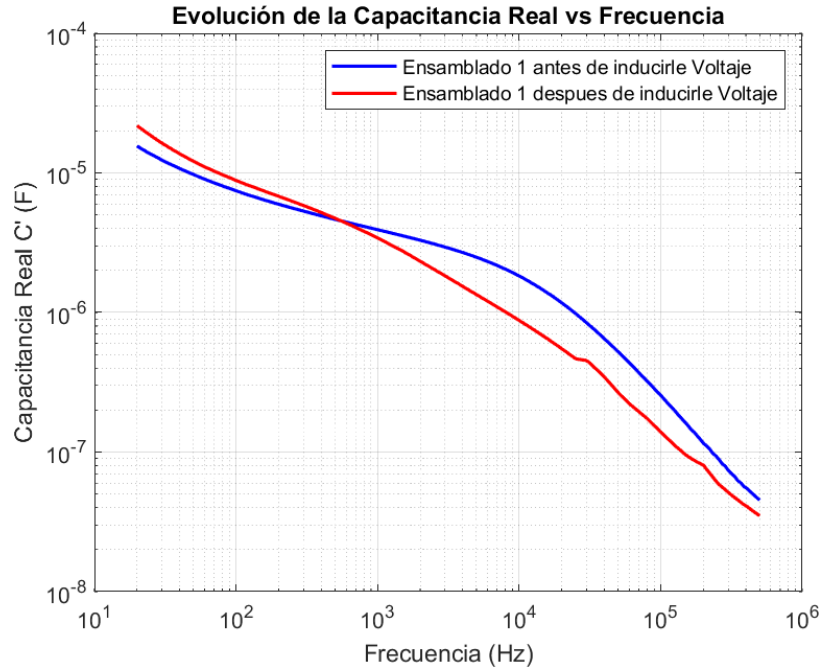


Figura 19: Evolución de la capacitancia real (C') frente a la frecuencia para el dispositivo ensamblado antes y después de polarizar a 1,5 V.

Finalmente, la evolución de la capacitancia real (C') presentada en la figura 19 ratifica el incremento en el almacenamiento de energía en el régimen de baja frecuencia (20 a 500 Hz). Los valores cuantitativos extraídos en frecuencias representativas se resumen en la tabla 19.

Condición operativa	$C'_{20\text{Hz}}$ (μF)	$C'_{1\text{kHz}}$ (μF)	$C'_{500\text{kHz}}$ (nF)
Sin polarizar (0,0 V)	15,5	3,8	4,8
Polarizado (1,5 V)	21,8	3,1	3,7
Variación (%)	+40,6 %	−18,4 %	−22,9 %

Tabla 19: Capacitancia real (C') del dispositivo ensamblado antes y después de aplicar polarización continua de 1,5 V.

Como se evidencia en la tabla 19, tras polarizar a 1,5 V, la capacitancia interfacial en régimen cuasiestacionario (20 Hz) se incrementó de 15,5 μF a 21,8 μF , representando una ganancia neta del 40,6 %. Este incremento a bajas frecuencias confirma la activación electrostática de los microporos sin inducir electrólisis del solvente ni degradación farádica en los electrodos.

3.7. Análisis de voltamperometría cíclica

Antes de la caracterización por espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), se evaluó la respuesta dinámica mediante voltamperometría cíclica (CV) empleando placas de baquelita cobreada como colectores de corriente preliminares. Este ensayo permitió corroborar la morfología de las curvas de barrido y validar la reversibilidad del almacenamiento de carga. El análisis se focalizó en la formulación escalada M×2 (4,0 g de Na₂SO₄ en 50,0 mL de solvente), evaluada a una velocidad de barrido $\nu = 20$ mV/s (0,02 V/s) a lo largo de cuatro ciclos consecutivos.

La capacitancia a partir del área integrada de los lazos de corriente se determinó mediante la ecuación (11):

$$C = \frac{A_{CV}}{2 \cdot \nu \cdot \Delta V} \quad (11)$$

donde A_{CV} representa el área total encerrada por la curva ($A \cdot V$), ν es la velocidad de barrido (V/s) y ΔV es la ventana de potencial efectiva (V). La incertidumbre combinada (δC) se evaluó a partir de la propagación cuadrática de errores debida a la resolución de potencial ($\delta(\Delta V) = \pm 0,0001$ V) y la integración numérica del área (δA_{CV}), según la ecuación (12):

$$\delta C = C \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta A_{CV}}{A_{CV}}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta V)}{\Delta V}\right)^2} \quad (12)$$

Los parámetros metrológicos obtenidos para cada ciclo se resumen en la tabla 20.

Ciclo	Ventana de potencial ΔV (V)	Área integrada A_{CV} (A · V)	Capacitancia C (mF)
<i>Scan 1</i>	$0,9967 \pm 0,0001$	$6,5245 \times 10^{-5}$	$1,6365 \pm 0,0005$
<i>Scan 2</i>	$0,9953 \pm 0,0001$	$6,5734 \times 10^{-5}$	$1,6511 \pm 0,0005$
<i>Scan 3</i>	$0,9952 \pm 0,0001$	$7,2091 \times 10^{-5}$	$1,8109 \pm 0,0005$
<i>Scan 4</i>	$0,9835 \pm 0,0001$	$6,6156 \times 10^{-5}$	$1,6817 \pm 0,0005$

Tabla 20: Resultados de la integración de área, ventana de potencial y capacitancia para la formulación escalada M×2 ($\nu = 20$ mV/s).

3.7.1. Interpretación del comportamiento dinámico

Las pruebas preliminares de voltamperometría cíclica se ejecutaron sobre sustratos cobreados para evaluar la respuesta interfacial del gel. A pesar del potencial teórico de oxidación del cobre en medio acuoso, las curvas registradas no evidencian picos farádicos agudos de óxido-reducción en la ventana evaluada (0 a 1,0 V), confirmando que la respuesta electroquímica observada obedece predominantemente al almacenamiento capacitivo por doble capa eléctrica (EDL) en el gel de almidón soluble $(C_6H_{10}O_5)_n$ dopado con Na_2SO_4 . Durante los dos primeros ciclos (*scans* 1 y 2), el dispositivo registró una capacitancia inicial de 1,6365 mF y 1,6511 mF, respectivamente. Esta respuesta evidencia la etapa formativa de la doble capa electroquímica y confirma una adecuada permeación del electrolito en la superficie del colector sin histéresis resistiva apreciable, como se ilustra en las figuras 20 y 21.

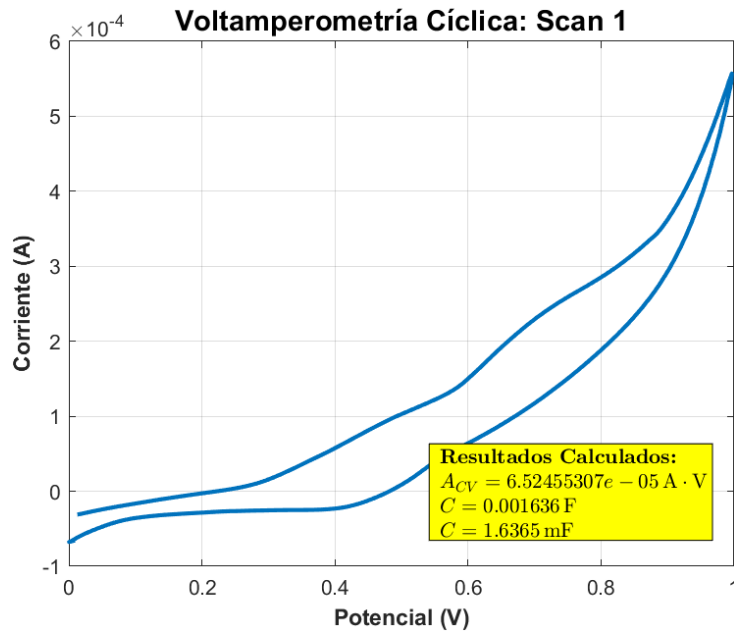


Figura 20: Curva de voltamperometría cíclica para el *Scan* 1 ($C = 1,6365 \pm 0,0005 \text{ mF}$, $\nu = 20 \text{ mV/s}$).

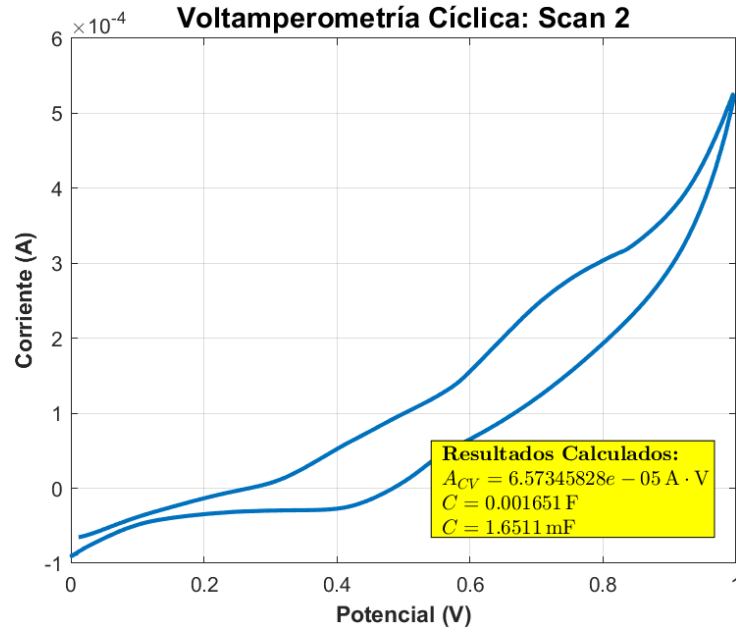


Figura 21: Curva de voltamperometría cíclica para el *Scan 2* ($C = 1,6511 \pm 0,0005 \text{ mF}$, $\nu = 20 \text{ mV/s}$).

En el tercer ciclo (*scan 3*, figura 22), el sistema alcanzó su punto de máxima activación interfacial con $1,8109 \text{ mF}$, lo que representó un incremento del $10,6\%$ respecto al ciclo inicial. Este incremento se atribuye a la penetración progresiva de los iones solvatados en la microrrugosidad del sustrato conductor, optimizando el área superficial efectiva de contacto.

Posteriormente, en el cuarto ciclo (*scan 4*, figura 23), la capacitancia se estabilizó en $1,6817 \text{ mF}$ con una ventana de potencial $\Delta V = 0,9835 \text{ V}$, marcando la transición hacia un régimen electroquímico cuasiestacionario.

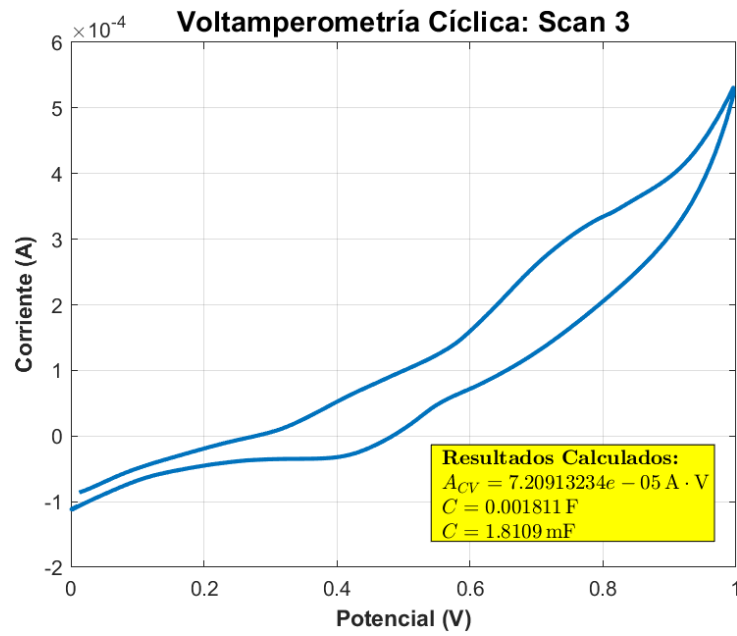


Figura 22: Curva de voltamperometría cíclica para el *Scan* 3 ($C = 1,8109 \pm 0,0005 \text{ mF}$, $\nu = 20 \text{ mV/s}$).

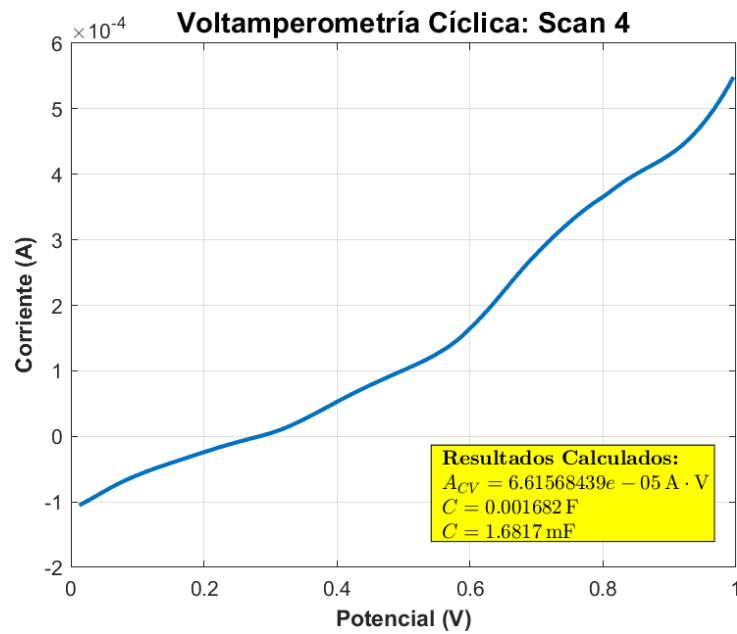


Figura 23: Curva de voltamperometría cíclica para el *Scan* 4 ($C = 1,6817 \pm 0,0005 \text{ mF}$, $\nu = 20 \text{ mV/s}$).

La morfología cuasirrectangular que mantienen las curvas a lo largo de los cuatro ciclos confirma que el mecanismo de almacenamiento es puramente capacitivo y reversible, validando la estabilidad operativa del gel electrolítico ante ciclos continuos de polarización.

Conclusiones

Tras el desarrollo experimental, la caracterización electroquímica y la evaluación temporal de las distintas formulaciones de gel electrolítico basadas en almidón soluble $(C_6H_{10}O_5)_n$ y sulfato de sodio (Na_2SO_4) , se establecen las siguientes conclusiones principales:

1. Se sintetizaron cinco formulaciones de gel electrolítico biodegradable variando la concentración de Na_2SO_4 (0,2 g a 2,2 g) bajo proporciones constantes de matriz polimérica, plastificante y solvente. El análisis por espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) determinó que la formulación M5 alcanzó la conductividad iónica más alta (2,31 mS/cm, con $R_s = 6,50 \Omega$), superando en un 61,5 % a la formulación M1 (1,43 mS/cm). Esto corrobora que la densidad de portadores de carga y la percolación iónica en la red determinan la eficiencia de transporte del electrolito.
2. La evaluación mediante voltamperometría cíclica (CV) a 20 mV/s confirmó la reversibilidad electroquímica y el mecanismo de acumulación de carga por doble capa eléctrica (EDL). Las curvas de barrido no evidenciaron picos farádicos agudos en la ventana de trabajo (0 a 1,0 V), alcanzando una capacitancia de $1,8109 \pm 0,0005$ mF en el ciclo de máxima activación interfacial y estabilizándose en 1,6817 mF en régimen cuasiestacionario.
3. El análisis de capacitancia real (C'') en estado inicial ratificó la dependencia directa entre la concentración salina y el almacenamiento interfacial. La formulación M5 registró la mayor capacitancia en baja frecuencia (20,0 μ F a 20 Hz), favorecida por la movilidad de los iones Na^+ y SO_4^{2-} y la plastificación con glicerol, antes de entrar en la zona de relajación dieléctrica a frecuencias superiores a 1 kHz.
4. El monitoreo de durabilidad tras seis semanas (1008 h) demostró una alta estabilidad estructural y funcional. Las formulaciones con mayor dopaje salino (M4 y M5) retuvieron más del 90 % de su conductividad inicial y preservaron ángulos de fase capacitivos cercanos a -75° , mientras que la muestra M1 conservó una baja impedancia global ($\approx 360 \Omega$) y una capacitancia cuasiestacionaria de 21,5 μ F.
5. La caracterización del dispositivo ensamblado completo (formulación M3) evidenció una activación interfacial efectiva tras aplicar una polarización continua de 1,5 V. Este estímulo incrementó la capacitancia

real en baja frecuencia de $15,5 \mu\text{F}$ a $21,8 \mu\text{F}$ (+40,6 %) y desplazó el ángulo de fase de -25° a -39° , comprobando el ordenamiento electrostático de los iones sin inducir degradación farádica ni electrólisis del electrolito.

6. La formulación obtenida a partir de almidón y plastificante constituye una matriz cuasi-sólida biodegradable y no tóxica con propiedades de transporte iónico estables, presentándose como una alternativa técnica y ambientalmente viable frente a los electrolitos líquidos convencionales para supercapacitores.

Recomendaciones

A partir del desarrollo experimental, el análisis electroquímico y las observaciones recopiladas durante la caracterización de los geles electrolíticos biodegradables, se plantean las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

1. Para mitigar los efectos inductivos parásitos en altas frecuencias y optimizar la reproducibilidad interfacial, se recomienda estandarizar el encapsulado definitivo mediante celdas tipo moneda comerciales (*coin cells* CR2032) o celdas tipo bolsa (*pouch cells*) con colectores de corriente de acero inoxidable 316L o láminas de grafito flexible, sustituyendo por completo los colectores cobreados preliminares empleados en la voltamperometría y garantizando un sellado hermético frente a la evaporación del solvente y la humedad ambiental.
2. Dado que las formulaciones M4 y M5 demostraron la mayor retención capacitiva tras seis semanas (1008 h), se aconseja extender las evaluaciones de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) a periodos de 12 y 24 semanas, complementándolas con análisis termogravimétricos (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) para cuantificar la tasa de deshidratación y la estabilidad térmica del plastificante en la matriz biopolimérica.
3. Considerando que la formulación M5 alcanzó la mayor capacitancia real (20,0 μF) y la conductividad iónica más elevada (2,31 mS/cm), se sugiere evaluar concentraciones de sal superiores a 2,2 g de Na_2SO_4 para determinar con precisión el límite de percolación iónica y el umbral de saturación por precipitación salina (*salting-out*) en el gel de almidón soluble $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$.
4. Se recomienda profundizar en la caracterización dinámica de las celdas ensambladas mediante ensayos de ciclado galvanostático de carga y descarga (GCD) a diferentes densidades de corriente, lo que permitirá construir los diagramas de Ragone y cuantificar experimentalmente la densidad de energía (Wh/kg), la densidad de potencia (W/kg) y la eficiencia colómbica del supercapacitor biodegradable.
5. Se aconseja integrar en la herramienta de adquisición y procesamiento desarrollada en Python-PyQt5 algoritmos de ajuste no lineal por mínimos cuadrados complejos (CNLS) para modelos de circuitos equivalentes (tales como modelos de Randles modificados con elementos de fase constante, CPE), permitiendo estimar de forma automatizada la

resistencia de transferencia de carga (R_{ct}) y la capacitancia de la doble capa (C_{dl}) directamente desde las lecturas del medidor LCR.

Anexos

Anexo A: Script de Python para la toma de datos con el LCR [21]

```
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, QHeaderView
13 )
14 from matplotlib.backends.backend_qt5agg import FigureCanvasQTAff as
15     FigureCanvas
16 from matplotlib.figure import Figure
17 import matplotlib.ticker as ticker
18
19 class Ventana(QMainWindow):
20     def __init__(self):
21         super().__init__()
22         self.setWindowTitle("Barrido LCR - Tiempo Real")
23         self.setGeometry(100, 100, 1200, 800)
24         self.showMaximized()
25
26         self.running = False
27         self.f = []
28         self.val1 = []
29         self.val2 = []
30
31         self.setup_ui()
32         self.setup_lcr()
33
34     def setup_ui(self):
35         main_layout = QHBoxLayout()
36         left_panel = QVBoxLayout()
37         right_panel = QVBoxLayout()
38
39         self.tabla_valores = QTableWidgetItem(0, 4)
40         self.tabla_valores.setHorizontalHeaderLabels(["#", "Frecuencia (Hz)"
41             , "Valor Primario", "Valor Secundario"])
42         header = self.tabla_valores.horizontalHeader()
43         header.setSectionResizeMode(0, QHeaderView.ResizeToContents)
44         header.setSectionResizeMode(1, QHeaderView.ResizeToContents)
45         header.setSectionResizeMode(2, QHeaderView.ResizeToContents)
46         header.setSectionResizeMode(3, QHeaderView.ResizeToContents)
47         header.setStretchLastSection(False)
48         self.tabla_valores.setMinimumWidth(450)
49         self.tabla_valores.verticalHeader().setDefaultSectionSize(22)
50         self.tabla_valores.setWordWrap(False)
51
52         # Configurar seleccion automatica de fila
53         self.tabla_valores.setSelectionBehavior(QTableWidgetItem.SelectRows)
54         self.tabla_valores.setSelectionMode(QTableWidgetItem.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 Datos")
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))
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
76                                     ; color: green; padding: 4px; background: #f0f0f0;")
77
78     self.label_estado = QLabel("Listo - Presiona Iniciar")
79     self.label_estado.setStyleSheet("font-weight: bold; color: blue;
80                                     padding: 4px;")
81
82     right_panel.addWidget(self.canvas, 1)
83     bottom_panel = QHBoxLayout()
84     bottom_panel.addWidget(self.label_valores)
85     bottom_panel.addWidget(self.label_estado)
86     right_panel.addLayout(bottom_panel)
87
88     main_layout.addLayout(left_panel, 1)
89     main_layout.addLayout(right_panel, 3)
90
91     contenedor = QWidget()
92     contenedor.setLayout(main_layout)
93     self.setCentralWidget(contenedor)
94
95 def setup_lcr(self):
96     self.rm = pyvisa.ResourceManager()
97     try:
98         print("Recursos VISA:", self.rm.list_resources())
99         self.lcr = self.rm.open_resource('USB0::0x0471::0x2827::479
100                                         A25127::INSTR')
101
102         self.lcr.timeout = 10000
103         self.lcr.write_termination = '\n'
104         self.lcr.read_termination = '\n'
105         self.lcr.clear()
106
107         print("Equipo:", self.lcr.query('*IDN?'))
108         self.label_estado.setText("LCR conectado")
109     except Exception as e:
110         print(f"Error LCR: {e}")
111         self.label_estado.setText("Error conexion")
112
113 def scroll_to_bottom(self):
114     """Desplaza la tabla hasta la ultima fila"""

```

```

112         row_count = self.tabla_valores.rowCount()
113         if row_count > 0:
114             self.tabla_valores.scrollToBottom()
115             self.tabla_valores.selectRow(row_count - 1)
116
117     def iniciar_barrido(self):
118         if self.running:
119             return
120
121         self.running = True
122         self.boton.setEnabled(False)
123         self.boton_stop.setEnabled(True)
124         self.boton_guardar.setEnabled(False)
125         self.label_estado.setText("Midiendo...")
126
127         freds = np.logspace(np.log10(20), np.log10(500000), 201)
128         self.f = []
129         self.val1 = []
130         self.val2 = []
131         self.tabla_valores.setRowCount(0)
132
133         # Graficas
134         self.fig.clear()
135         self.ax1 = self.fig.add_subplot(211)
136         self.ax2 = self.fig.add_subplot(212)
137         self.line1, = self.ax1.plot([], [], 'b-', linewidth=2, label="Valor
138             Primario")
139         self.line2, = self.ax2.plot([], [], 'r-', linewidth=2, label="Valor
140             Secundario")
141         self.ax1.set_xscale('log')
142         self.ax2.set_xscale('log')
143
144         # Formateador de frecuencia en eje X
145         def format_func(value, pos):
146             if value >= 1000:
147                 if value >= 1000000:
148                     return f'{int(value/1000000)}M'
149                 elif value >= 1000:
150                     return f'{int(value/1000)}k'
151                 return f'{int(value)}'
152
153         self.ax1.xaxis.set_major_formatter(ticker.FuncFormatter(format_func)
154             )
155         self.ax2.xaxis.set_major_formatter(ticker.FuncFormatter(format_func)
156             )
157
158         self.ax1.xaxis.set_major_locator(ticker.LogLocator(base=10, subs
159             =[1,2,5,10]))
160         self.ax2.xaxis.set_major_locator(ticker.LogLocator(base=10, subs
161             =[1,2,5,10]))
162
163         self.ax1.set_ylabel("Valor Primario")
164         self.ax2.set_ylabel("Valor Secundario")
165         self.ax2.set_xlabel("Frecuencia (Hz)")
166         self.ax1.grid(alpha=0.3)
167         self.ax2.grid(alpha=0.3)
168         self.ax1.legend()
169         self.ax2.legend()
170
171         self.fig.tight_layout()
172         self.canvas.draw()

```

```

168     for i, freq in enumerate(frecs):
169         if not self.running:
170             break
171
172         try:
173             # 1. Configurar frecuencia
174             self.lcr.write(f'FREQ {freq:.2f}')
175
176             # 2. Esperar fin de operacion
177             self.lcr.write('*OPC')
178             opc = self.lcr.query('*OPC?')
179
180             # 3. Limpiar buffer
181             self.lcr.clear()
182
183             # 4. Adquisicion de datos
184             data = self.lcr.query('FETC?').strip()
185             valores = data.split(',')
186             v1 = float(valores[0])
187             v2 = float(valores[1])
188
189             self.f.append(freq)
190             self.val1.append(v1)
191             self.val2.append(v2)
192
193             # Actualizar tabla
194             row = self.tabla_valores.rowCount()
195             self.tabla_valores.insertRow(row)
196             self.tabla_valores.setItem(row, 0, QTableWidgetItem(str(i +
197                                     1)))
198             self.tabla_valores.setItem(row, 1, QTableWidgetItem(f"{freq
199                                     :.2f}"))
200             self.tabla_valores.setItem(row, 2, QTableWidgetItem(f"{v1:.6
201                                     f}"))
202             self.tabla_valores.setItem(row, 3, QTableWidgetItem(f"{v2:.6
203                                     f}"))
204
205             self.scroll_to_bottom()
206
207             # Actualizar etiqueta y trazado
208             self.label_valores.setText(f"Frec: {freq:.2f} Hz | V1: {v1
209                                     :.6f} | V2: {v2:.6f}")
210             self.line1.set_data(self.f, self.val1)
211             self.line2.set_data(self.f, self.val2)
212             self.ax1.relim()
213             self.ax1.autoscale_view()
214             self.ax2.relim()
215             self.ax2.autoscale_view()
216             self.canvas.draw()
217             QApplication.processEvents()
218
219             time.sleep(0.05)
220
221         except Exception as e:
222             print(f"Error punto {i+1}: {e}")
223             self.label_estado.setText(f"Error punto {i+1}")
224             continue
225
226     self.running = False
227     self.boton.setEnabled(True)
228     self.boton_stop.setEnabled(False)
229     self.boton_guardar.setEnabled(True)

```

```

225         self.label_estado.setText("Barrido completo")
226
227     def detener(self):
228         self.running = False
229         self.label_estado.setText("Detenido")
230
231     def guardar_datos(self):
232         if not self.f:
233             self.label_estado.setText("No hay datos")
234             return
235
236         timestamp = datetime.now().strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
237         filename, _ = QFileDialog.getSaveFileName(
238             self,
239             "Guardar datos",
240             f"lcr_{timestamp}.xlsx",
241             "Excel (*.xlsx)"
242         )
243
244         if filename:
245             df = pd.DataFrame({
246                 'Frecuencia (Hz)': self.f,
247                 'Valor Primario': self.val1,
248                 'Valor Secundario': self.val2
249             })
250             df.to_excel(filename, index=False, float_format='%.10f')
251             self.label_estado.setText("Guardado correctamente")
252
253     def closeEvent(self, event):
254         if hasattr(self, 'lcr'):
255             self.lcr.close()
256             event.accept()
257
258 if __name__ == "__main__":
259     app = QApplication(sys.argv)
260     ventana = Ventana()
261     ventana.show()
262     sys.exit(app.exec_())

```

Listing 1: Script de Python con interfaz gráfica en PyQt5 y PyVISA para la automatización y adquisición de datos en tiempo real del medidor LCR.

Anexo B: Script de MATLAB para comparación de Impedancia, Fase y Nyquist [22]

```
1  % Lectura de archivos de impedancia
2  datos1 = readtable('PRUEBA 1.xlsx');
3  datos2 = readtable('PRUEBA 2.xlsx');
4  datos3 = readtable('PRUEBA 3.xlsx');
5  datos4 = readtable('PRUEBA 4.xlsx');
6  datos5 = readtable('PRUEBA 5.xlsx');
7
8  % Procesamiento de Muestra 1
9  f1 = datos1.Frecuencia;
10 R1 = datos1.Resistencia;
11 theta1 = deg2rad(datos1.Grados);
12 Z1 = R1 .* exp(1j * theta1);
13
14 % Procesamiento de Muestra 2
15 f2 = datos2.Frecuencia;
16 R2 = datos2.Resistencia;
17 theta2 = deg2rad(datos2.Grados);
18 Z2 = R2 .* exp(1j * theta2);
19
20 % Procesamiento de Muestra 3
21 f3 = datos3.Frecuencia;
22 R3 = datos3.Resistencia;
23 theta3 = deg2rad(datos3.Grados);
24 Z3 = R3 .* exp(1j * theta3);
25
26 % Procesamiento de Muestra 4
27 f4 = datos4.Frecuencia;
28 R4 = datos4.Resistencia;
29 theta4 = deg2rad(datos4.Grados);
30 Z4 = R4 .* exp(1j * theta4);
31
32 % Procesamiento de Muestra 5
33 f5 = datos5.Frecuencia;
34 R5 = datos5.Resistencia;
35 theta5 = deg2rad(datos5.Grados);
36 Z5 = R5 .* exp(1j * theta5);
37
38 % FIGURA 1: MAGNITUD DE IMPEDANCIA
39 figure;
40 semilogx(f1, abs(Z1), 'b', ...
```

```

41         f2, abs(Z2), 'r', ...
42         f3, abs(Z3), 'g', ...
43         f4, abs(Z4), 'k', ...
44         f5, abs(Z5), 'm');
45 grid on;
46 xlabel('Frecuencia (Hz)');
47 ylabel('|Z| (Ohm)');
48 title('Comparacion de Magnitud de Impedancia');
49 legend('Muestra 1', 'Muestra 2', 'Muestra 3', 'Muestra 4',
        'Muestra 5');
50
51 % FIGURA 2: ANGULO DE FASE
52 figure;
53 semilogx(f1, rad2deg(angle(Z1)), 'b', ...
54          f2, rad2deg(angle(Z2)), 'r', ...
55          f3, rad2deg(angle(Z3)), 'g', ...
56          f4, rad2deg(angle(Z4)), 'k', ...
57          f5, rad2deg(angle(Z5)), 'm');
58 grid on;
59 xlabel('Frecuencia (Hz)');
60 ylabel('Fase (deg)');
61 title('Comparacion de Fase');
62 legend('Muestra 1', 'Muestra 2', 'Muestra 3', 'Muestra 4',
        'Muestra 5');
63
64 % FIGURA 3: DIAGRAMA DE NYQUIST
65 figure;
66 plot(real(Z1), imag(Z1), 'b', ...
67       real(Z2), imag(Z2), 'r', ...
68       real(Z3), imag(Z3), 'g', ...
69       real(Z4), imag(Z4), 'k', ...
70       real(Z5), imag(Z5), 'm');
71 grid on;
72 xlabel('Parte Real (Ohm)');
73 ylabel('Parte Imaginaria (Ohm)');
74 title('Comparacion Diagrama de Nyquist');
75 legend('Muestra 1', 'Muestra 2', 'Muestra 3', 'Muestra 4',
        'Muestra 5');
76 axis equal;

```

Listing 2: Script de MATLAB para la comparación espectral de Magnitud de Impedancia, Fase y diagrama de Nyquist (Formulaciones M1 a M5).

Anexo C: Script de MATLAB para la evaluación de la capacitancia real [23]

```
1  % Lectura de matrices de datos
2  datos1 = readtable('MUESTRA 1 COMPLETO V3.xlsx');
3  datos2 = readtable('MUESTRA 2 COMPLETO V3.xlsx');
4  datos3 = readtable('MUESTRA 3 COMPLETO V3.xlsx');
5  datos4 = readtable('MUESTRA 4 COMPLETO V3.xlsx');
6  datos5 = readtable('MUESTRA 5 COMPLETO V3.xlsx');
7
8  % Extraccion de Frecuencia y Capacitancia Real C'
9  f1 = datos1{:, 1};    C1_real = datos1{:, 6};
10 f2 = datos2{:, 1};    C2_real = datos2{:, 6};
11 f3 = datos3{:, 1};    C3_real = datos3{:, 6};
12 f4 = datos4{:, 1};    C4_real = datos4{:, 6};
13 f5 = datos5{:, 1};    C5_real = datos5{:, 6};
14
15 % Generacion de curva log-log
16 figure;
17 loglog(f1, C1_real, 'b', ...
18         f2, C2_real, 'r', ...
19         f3, C3_real, 'g', ...
20         f4, C4_real, 'k', ...
21         f5, C5_real, 'm', 'LineWidth', 1.5);
22 grid on;
23 xlabel('Frecuencia (Hz)');
24 ylabel('Capacitancia Real C'' (F)');
25 title('Evolucion de la Capacitancia Real vs Frecuencia')
26 ;
27 legend('Muestra 1', 'Muestra 2', 'Muestra 3', 'Muestra 4',
28        'Muestra 5');
```

Listing 3: Script de MATLAB para la generacion del espectro de Capacitancia Real (C') en funcion de la frecuencia.

Anexo D: Script de MATLAB para voltamperometría cíclica y determinación de capacitancia [24]

```
1  % Formulación: Mx2 (Sulfato de Sodio) / Velocidad de
   % barrido: 20 mV/s
2  clc; clear; close all;
3
4  nombreArchivo = 'x2 20mV.xlsx';
5  try
6      data = readtable(nombreArchivo);
7      % 1=Scan, 4=Potencial(V), 5=Corriente(A)
8      ScanIdx = data(:, 1);
9      V_total = data(:, 4);
10     I_total = data(:, 5);
11     scan_rate = 0.02; % 20 mV/s convertido a V/s
12 catch
13     error('Error: El archivo "%s" no se encontro.',
14           nombreArchivo);
15 end
16
17 lista_scans = [1, 2, 3, 4];
18
19 for s = 1:length(lista_scans)
20     id = lista_scans(s);
21
22     indices = (ScanIdx == id);
23     V = V_total(indices);
24     I = I_total(indices);
25
26     validos = ~isnan(V) & ~isnan(I);
27     V = V(validos);
28     I = I(validos);
29
30     % Calculos matematicos
31     area_cv = polyarea(V, I);
32     dV = max(V) - min(V);
33     capacitancia = area_cv / (2 * scan_rate * dV);
34
35     % Generacion de figura
36     figure('Name', ['Análisis Detallado - Scan ',
37                     num2str(id)], 'Color', 'w');
38     plot(V, I, 'LineWidth', 2, 'Color', [0 0.4470
39                                             0.7410]);
```

```

37 grid on;
38 xlabel('Potencial (V)', 'FontSize', 11, 'FontWeight'
    , 'bold');
39 ylabel('Corriente (A)', 'FontSize', 11, 'FontWeight'
    , 'bold');
40 title(['Voltamperometria Ciclica: Scan ', num2str(id
    )], 'FontSize', 14);
41
42 % Cuadro de formulas
43 txt_formulas = {
44     '\bfFormulas empleadas:', ...
45     'A_{CV} = \oint I \, dV', ...
46     'C = \frac{A_{CV}}{2 \cdot \nu \cdot \Delta V}',
47     ...,
48     '\bfVariables:', ...
49     ['\nu = ', num2str(scan_rate), ' V/s'], ...
50     ['\Delta V = ', num2str(dV, '%.4f'), ' V']
51 };
52
53 % Cuadro de resultados
54 txt_resultados = {
55     '\bfResultados Calculados:', ...
56     ['Area (A_{CV}) = ', num2str(area_cv, '%.8e'), '
57     A\cdot V'], ...
58     ['Capacitancia (C) = ', num2str(capacitancia, '
59     %.6f'), ' F'], ...
60     ['Capacitancia (C) = ', num2str(capacitancia
61     *1000, '%.4f'), ' mF']
62 };
63
64 annotation('textbox', [0.15, 0.65, 0.25, 0.2], '
65     String', txt_formulas, ...
66     'FontSize', 10, 'BackgroundColor', 'w', '
67     EdgeColor', 'k', 'Interpreter', 'tex');
68
69 annotation('textbox', [0.55, 0.15, 0.33, 0.15], '
70     String', txt_resultados, ...
71     'FontSize', 10, 'BackgroundColor', 'y', '
72     EdgeColor', 'k', 'Interpreter', 'tex');
73
74 end

```

```
68 fprintf('Análisis completado. Se han generado 4 figuras  
    independientes.\n');
```

Listing 4: Código en MATLAB para el procesamiento de curvas de Voltamperometría Cíclica, integración de área y cálculo de capacitancia.

Anexos fotográficos

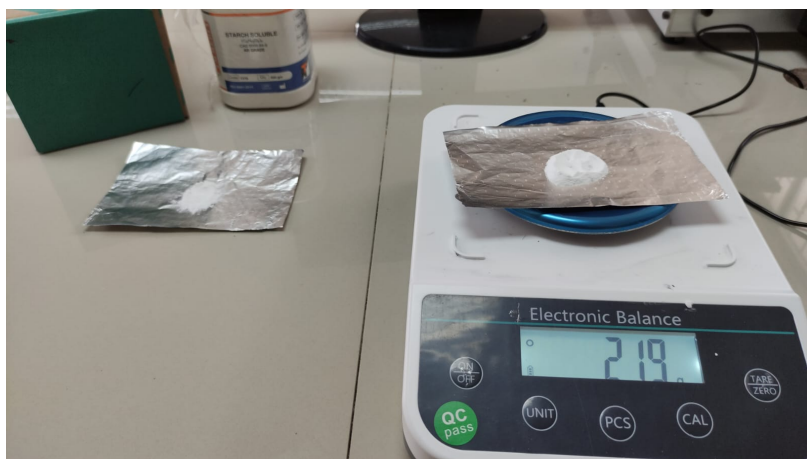


Figura 24: Dosificación de reactivos (almidón soluble y sulfato de sodio) mediante balanza analítica electrónica.



Figura 25: Proceso de agitación energética y homogeneización de la mezcla precursora utilizando el agitador tipo vórtice (modelo VM200).



Figura 26: Vertido de los solutos junto con los solventes en cápsula de Petri sobre el agitador magnético para el inicio de la gelatinización.



Figura 27: Proceso de curado y estabilización térmica de las películas de hidrogel en el horno de secado Memmert UN 55.



Figura 28: Área de trabajo y reactivos empleados durante la síntesis y preparación de las muestras del gel electrolítico.



Figura 29: Adición y dosificación de glicerol como agente plastificante para la matriz polimérica.



Figura 30: Preparación y evaluación de premuestras para inspección visual de consistencia física.



Figura 31: Caracterización electroquímica directa de las celdas mediante el medidor LCR BK Precision 894 con pinzas Kelvin.

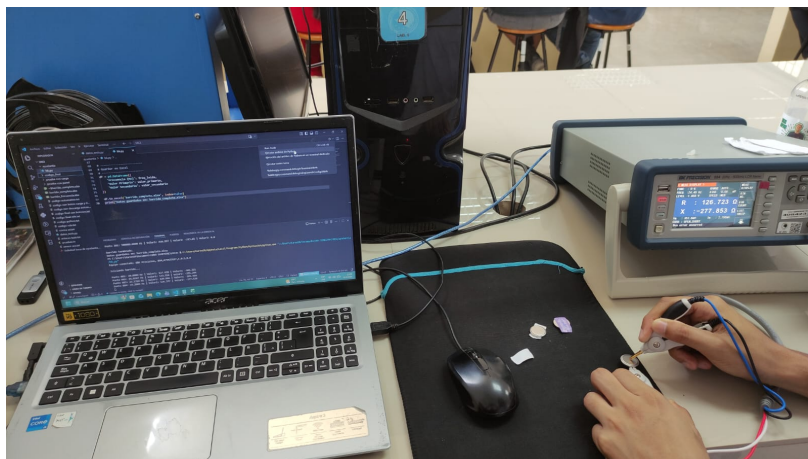


Figura 32: Adquisición automatizada de datos de impedancia y fase en tiempo real mediante interfaz de Python conectada al medidor LCR.



Figura 33: Identificación y rotulado de las celdas de prueba según su dosificación salina (M1 a M5).

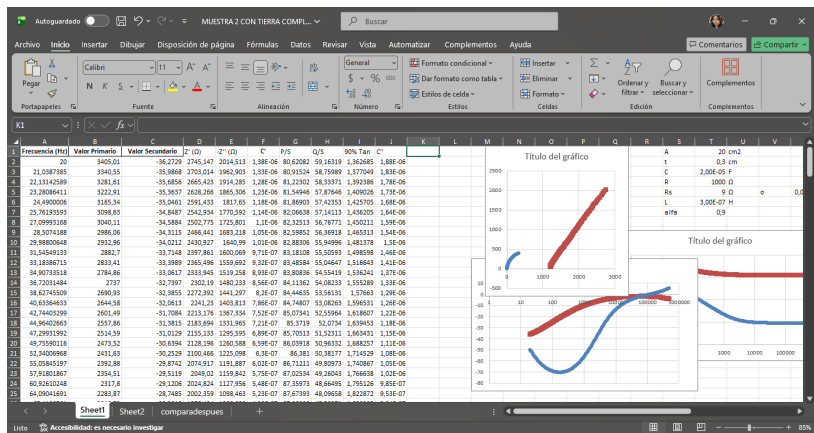


Figura 34: Estructura de la hoja de cálculo empleada para la tabulación de lecturas espectrales y cálculo de parámetros electroquímicos.

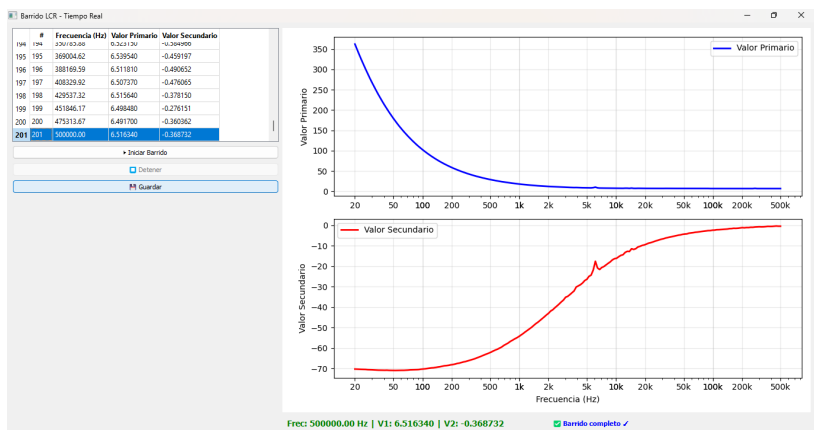


Figura 35: Interfaz gráfica de usuario (GUI) en Python-PyQt5 desarrollada para la adquisición y trazado en tiempo real durante el barrido con el medidor LCR.

Referencias

- [1] B. Pal, S. Yang, S. Ramesh, V. Thangadurai, y R. Jose, “Electrolyte selection for supercapacitive devices: a critical review,” *Nanoscale Advances*, vol. 1, no. 10, pp. 3807–3835, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1039/c9na00374f>.
- [2] S. Sharma y P. Chand, “Supercapacitor and electrochemical techniques: A brief review,” *Results in Chemistry*, vol. 5, Art. no. 100885, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100885>.
- [3] S. B. Aziz *et al.*, “Starch-based polymer electrolytes: A review on ion transport and electrochemical applications,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 182, pp. 1974–1992, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.160>.
- [4] C. W. Liew *et al.*, “Ionic conductivity and dielectric relaxation of starch-based polymer electrolytes doped with ionic solutes,” *Electrochimica Acta*, vol. 157, pp. 257–264, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.11.196>.
- [5] Y. Sudhakar *et al.*, “Role of glycerol as a plasticizer in starch-based solid polymer electrolytes,” *Polymer-Plastics Technology and Materials*, vol. 60, no. 4, pp. 355–370, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/25740881.2020.1785507>.
- [6] M. J. Lencwe, T. O. Olwal, S. D. Chowdhury, y M. Sibanyoni, “Non-solitary two-way DC-to-DC converters for hybrid battery and supercapacitor energy storage systems: A comprehensive survey,” *Energy Reports*, vol. 11, pp. 2737–2767, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2024.02.024>.
- [7] S. Vanmathi, H. Awasthi, A. Pal, y S. Goel, “IoT enabled carbon cloth-based 3D printed hydrogen fuel cell integrated with supercapacitor for low-power microelectronic devices,” *Scientific Reports*, vol. 14, Art. no. 16953, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67759-3>.
- [8] A. Ch. Lazanas y M. I. Prodromidis, “Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial,” *ACS Measurement Science Au*, vol. 3, no. 3, pp. 162–193, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00070>.
- [9] G. Landi *et al.*, “Impact of Acetate-Based Hydrogel Electrolyte on Electrical Performance and Stability of Eco-Friendly Supercapacitors,”

- ChemElectroChem*, vol. 10, no. 21, Art. no. e202300443, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/ce1c.202300443>.
- [10] Asamblea Nacional del Ecuador, “Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva,” *Registro Oficial Cuarto Suplemento No. 488*, Quito, Ecuador, 6 de julio de 2021.
 - [11] H. Nakamura y K. Saito, “Biodegradable starch-based gel electrolytes for electrochemical applications,” *Journal of Polymer Science*, vol. 60, no. 12, pp. 1234–1245, 2022.
 - [12] C. V. Vélez Martínez, X. S. Zambrano Murillo, M. H. Delgado Demera, G. A. Burgos Briones, y C. A. Cedeño Palacios, “Almidones de cáscara de yuca (*Manihot esculenta*) y papa (*Solanum tuberosum*) para producción de bioplásticos: propiedades mecánicas y efecto gelatinizante,” *Revista Bases de la Ciencia*, vol. 6, no. 2, pp. 137–152, 2021.
 - [13] Desarrollo de metodologías de estimación para sistemas de almacenamiento de energía no convencionales en topologías híbridas, *Research-Gate*, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-19-Esquemático-de-un-supercapacitor_fig2_369595919.
 - [14] Wylder, “Resumen: Introducción a la pseudocapacidad,” *Zhihu*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/143066460>.
 - [15] Y. Chen, T. Wang, y H. Li, “Enhancing Ionic Transport in Starch-Based Polymer Electrolytes,” *Electrochimica Acta*, vol. 321, Art. no. 134678, 2019.
 - [16] K. C. S. Lakshmi y B. Vedhanarayanan, “High-Performance Supercapacitors: A Comprehensive Review on Paradigm Shift of Conventional Energy Storage Devices,” *Batteries*, vol. 9, no. 4, Art. no. 202, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries9040202>.
 - [17] J. González-Hernández y J. García-Céspedes, “Voltamperometría: fundamentos electroquímicos y aplicaciones,” *Revista de Química PUCP*, vol. 38, no. 2, pp. 2–17, 2024.
 - [18] X. Zhao, Y. Liu, y M. Li, “High-conductivity nanocellulose-PVA gel electrolytes for flexible solid-state supercapacitors,” *Advanced Materials Interfaces*, vol. 10, no. 4, pp. 1–10, 2023.

- [19] Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, “Acuerdo Ministerial No. MAATE-2022-067: Instructivo para la aplicación de la responsabilidad extendida en la gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) de origen doméstico,” *Registro Oficial Suplemento No. 117*, Quito, Ecuador, 2022.
- [20] S. Wang y L. Chen, “Exploring Bio-based Electrolytes: Materials, Properties and Applications in Energy Storage,” *Renewable Energy Reviews*, vol. 158, Art. no. 112120, 2022.
- [21] 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>.
- [22] 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-d-e-los-datos-obtenidos-con-el-LCR.git>.
- [23] 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>.
- [24] 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-C-apacitancia.git>.