

Coin-cell supercapacitors based on biochars: assembly pressure influence

Jefferson Josue Quiñon Acero, B. Eng.¹, and Antony Bazan-Aguilar, M. Sc.¹

¹Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Peru, U20223260@utp.edu.pe, abazana@utp.edu.pe

Abstract – The design of low-cost energy storage devices with high energy and potential densities become a scientific challenge, nowadays. Herein, it reports the conversion of residual biomass into graphene-based materials and their application in the design of electrochemical double-layer supercapacitors (EDLSCs). Graphene-based electrodes are obtained from sugar cane bagasse and orange peel through thermal treatment in an inert atmosphere. Both materials are used in the assembly of coin-type EDLSCs and the influence of the crimper pressure on the electrical properties of the energy store devices is discussed.

Keywords – Residual biomass, graphene-based electrodes, electrochemical double-layer supercapacitors, EDLCs, energy storage

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Coin-cell supercapacitors based on biochars: assembly pressure influence

Supercapacitores tipo-moneda basados en biocarbones: Influencia de la presión de ensamblaje

Jefferson Josue Quiñon Acero, B. Eng.¹, and Antony Bazan-Aguilar, M. Sc.¹

¹Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Peru, U20223260@utp.edu.pe, abazana@utp.edu.pe

Abstract – *The design of low-cost energy storage devices with high energy and potential densities become a scientific challenge, nowadays. Herein, it reports the conversion of residual biomass into graphene-based materials and their application in the design of electrochemical double-layer supercapacitors (EDLSCs). Graphene-based electrodes are obtained from sugar cane bagasse and orange peel through thermal treatment in an inert atmosphere. Both materials are used in the assembly of coin-type EDLSCs and the influence of the crimping pressure on the electrical properties of the energy store devices is discussed.*

Keywords – *Residual biomass, graphene-based electrodes, electrochemical double-layer supercapacitors, EDLCs, energy storage*

Resumen. – *El diseño de dispositivos de almacenamiento de energía de bajo coste con una alta densidad de energía y de potencia es un reto científico, hoy en día. La presente investigación reporta la conversión de biomasa residual en los materiales grafénicos para su aplicación en el diseño de supercapacitores electroquímicos de doble capa (SEDCs). Los electrodos grafénicos son obtenidos a partir del tratamiento térmico de bagazo de caña de azúcar y cáscara de naranja bajo un flujo de atmósfera inerte. Ambos materiales son utilizados como electrodos en el ensamble de SEDCs tipo moneda, y la influencia de presión de sellado sobre las propiedades eléctricas de los dispositivos construidos.*

Palabras claves – *Biomasa residual, electrodos grafénicos, supercapacitores electroquímicos de doble capa, SEDCs, almacenamiento de energía.*

I. INTRODUCCIÓN

Diversos estudios exploran nuevos paradigmas en el diseño de sistemas de almacenamiento de energía, tales como, los electrodos flexibles para supercondensadores que utilizan biomasa como material precursor. Este enfoque tiene como objetivo satisfacer los requisitos de los dispositivos electrónicos portátiles flexibles, destacando la versatilidad de los materiales derivados de la biomasa [1], [2]. En la mayoría de los estudios, el desarrollo de materiales derivados de la biomasa en supercondensadores, enfatizando su capacidad para satisfacer las necesidades actuales de densidad de energía, costo y sostenibilidad [3]. Además, se enfatiza la importancia de propiedades como la estructura porosa y la presencia de heteroátomos para mejorar el rendimiento del

supercondensador [4]. A pesar de los avances significativos, persisten desafíos continuos, como mejorar el rendimiento volumétrico, optimizar la porosidad de los electrodos y desarrollar una compresión más profunda de los mecanismos de almacenamiento de energía [5].

Investigaciones futuras se centran en resolver estos desafíos para promover aún más la aplicación de materiales de biomasa en dispositivos de almacenamiento de energía. Por ejemplo, la activación simple para obtener nano hojas de carbono activado con una sorprendente área superficial específica de $2943 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ y un volumen de poro abundante. Este material demostró un rendimiento electroquímico superior con una capacitancia específica de 588 F g^{-1} y una excelente estabilidad en electrolito de KOH. Además, el dispositivo supercondensador simétrico ensamblado exhibió un rendimiento destacado en un electrolito neutro, destacando su potencial para diversas aplicaciones de almacenamiento de energía [6]. Los carbones activados derivados de hojas de ginkgo para su uso como electrodos de supercondensadores. El material derivado de KOH-activación de hojas de ginkgo demostró la mejor capacitancia específica (374 F g^{-1} a 0.5 A g^{-1}) en comparación con otros materiales. Este enfoque ofrece una síntesis económica y sostenible de materiales de electrodos a partir de recursos renovables y abundantes [7].

Por su parte, los carbones microporosos derivados de residuos de linaza con microporos grandes (1-2 nm) que facilitan una alta capacidad de almacenamiento de carga. Este material exhibió una capacitancia específica impresionante de hasta 398 F g^{-1} en electrolitos de KOH y H_2SO_4 . El dispositivo supercondensador basado en este material mostró un rendimiento excepcional en términos de densidad de energía y capacidad de ciclado [8]. Por otra parte, el carbono poroso obtenido a partir de flores de *kapok* como electrodo de supercondensador. El carbono resultante mostró un rendimiento electroquímico notable con una capacitancia de 286.8 F/g a 1 A/g y una retención de capacitancia del 97.4% después de 5000 ciclos, resaltando la estabilidad cíclica del material [9]. Una visión general de los avances recientes en supercondensadores híbridos, destacando su capacidad mejorada de densidad de energía. La revisión destaca la importancia de nuevos materiales para la eficiencia energética y destaca los criterios de formación, componentes, materiales de electrodos y electrolitos, y sus aplicaciones [10].

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

En contraste, los carbones porosos derivados de semillas de pasto con dopado de nitrógeno y azufre exhibe una alta capacitancia gravimétrica de 358.0 F g^{-1} y una capacitancia volumétrica de 243.4 F cm^{-3} [1], [11]. Asimismo, la síntesis de carbones activados a partir de la cáscara de coco demostró una alta área superficial de $2056 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. Además de registrar una alta capacitancia específica y una destacada retención de carga después de ciclos prolongados [12]. Otro interesante reporte es el obtenido a partir de la evaluación de cáscara de castaña como un material de ánodo novedoso con estructura mesoporosa y microporosa. La activación química modificó con éxito la estructura de la cáscara de castaña, mejorando la eficiencia de transferencia de carga y logrando una densidad de potencia máxima en celdas de combustible microbianas (MFC) 2.3 veces mayor que un ánodo de tela de carbón. Este enfoque ofrece una estrategia prometedora para fabricar ánodos de alto rendimiento para MFC a partir de materiales naturales sostenibles y rentables [13].

Un enfoque ecológico y económico para sintetizar un electrodo completamente derivado de biomasa a partir de algodón mediante un proceso de pirólisis. Se demuestra que este electrodo de algodón carbonizado (CC) presenta un área superficial específica BET más alta, un mayor número de grupos funcionales que contienen oxígeno, una mejor mojabilidad y una mayor actividad catalítica para reacciones de vanadio que los papeles de carbono comerciales (CP). El CC mejora la reversibilidad hacia $\text{VO}_2^+/\text{VO}_2^+$ y exhibe una eficiencia de voltaje del 75.4%, superando a los CP oxidados (68.3%). El dispositivo ensamblado aplicando estos electrodos ofrece un rendimiento superior durante las pruebas de carga y descarga a diversas densidades de corriente, destacando el potencial de aplicación a gran escala [14].

El desarrollo de métodos sencillos, tales como la fabricación de carbones porosos dopado con nitrógeno (QPC-3) con una alta área superficial específica de $2597 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ a partir de quinua, permite exhibir una capacitancia específica notable de 330 F g^{-1} en KOH 6 M a una densidad de 1 A g^{-1} y una buena capacidad de respuesta a diferentes densidades de corriente. Los supercondensadores simétricos ensamblados con QPC-3 muestran altas capacitancias y densidades de energía tanto en electrolitos acuosos como orgánicos, destacando el potencial de este carbono poroso derivado de quinoa como material de electrodo para supercondensadores de alta capacitancia [15]. Este trabajo destaca la importancia de los supercondensadores, junto con las baterías, como tecnología prometedora de almacenamiento de energía electroquímica. El surgimiento reciente de dispositivos electrónicos portátiles flexibles ha impulsado la investigación de nuevos materiales, técnicas de procesamiento y diseños que puedan cumplir con las demandas de estabilidad mecánica al doblarse o estirarse, sin comprometer su rendimiento electroquímico, a un costo aceptable. Los carbones derivados de biomasa se presentan como materiales prometedores debido a su bajo costo, técnicas de procesamiento sencillas, estabilidad y versatilidad. Se exploran los precursores

renovables disponibles, el rendimiento actual y los desafíos en términos de flexibilidad y sostenibilidad [16].

La necesidad de materiales verdes y de bajo costo con altas prestaciones para abordar las limitaciones actuales en términos de densidad de energía, costo y seguridad en dispositivos de almacenamiento de energía. Se revisan los avances recientes en el uso de diversas biomásas como separadores, aglutinantes y materiales de electrodo en sistemas de almacenamiento de energía electroquímica. La revisión concluye con perspectivas relacionadas con los materiales derivados de biomasa para el almacenamiento de energía electroquímica [17].

Otros reportes evalúan el desafío inherente del bajo rendimiento volumétrico de los materiales de carbono bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) derivados de biomasa para supercondensadores utilizando biomasa (azufafa) como precursor de carbono. Estos resultados resaltan el potencial de este carbono poroso derivado de biomasa para aplicaciones en dispositivos portátiles [18].

Por ejemplo, se reporta el efecto de la porosidad del electrodo en la actividad electrocatalítica y la transferencia de carga en baterías de flujo redox de vanadio. Se utiliza carbono poroso derivado de té gastado como material de electrodo, y se modifica sistemáticamente la microestructura porosa del electrodo. Se demuestra que la porosidad ajustada influye significativamente en la migración de carga y mejora el rendimiento, destacando la importancia del diseño de electrodos porosos en sistemas de almacenamiento de energía [19]. Un estudio comparativo de materiales electrónicos aplicados al diseño de supercondensadores, se centra en la obtención de carbón activado derivado de la cáscara de naranja (OPAC) y un nanocompuesto de polianilina-OPAC. Se destaca la prometedora área superficial y la capacidad específica del OPAC, y se muestra que el nanocompuesto mejora significativamente la capacitancia específica. Los resultados sugieren la viabilidad de estos materiales derivados de biomasa para aplicaciones en supercondensadores híbridos a bajo costo [20].

Análogamente, los electrodos positivos de carbono poroso derivado completamente de cebollas, con partículas en la nano-escala, y electrodos negativos de carbono poroso que contiene iones Na^+ y Cl^- . Se demostró un mecanismo de almacenamiento de energía tipo redox farádico para el electrodo positivo, con una excelente capacitancia específica de 1805 F g^{-1} a una densidad de corriente de 3 A g^{-1} y una notable estabilidad cíclica a largo plazo. El electrodo negativo también exhibió una alta capacitancia específica y una excelente estabilidad cíclica. El supercondensador híbrido de estado cuasi-sólido, basado en un electrolito de gel de alcohol polivinílico-hidróxido de potasio, mostró una excelente densidad de energía y densidad de potencia, con una vida cíclica extremadamente larga. Además, se conectó el supercondensador a un panel solar para almacenar energía renovable, destacando su potencial aplicación en sistemas avanzados de almacenamiento de energía sostenible [21].

El comportamiento fisicoquímico de un material compuesto basado en nanopartículas de pentóxido de niobio

(Nb₂O₅) decoradas con grafeno (Gr) y sus propiedades electroquímicas prometedoras en supercondensadores acuosos neutros. El compuesto Nb₂O₅@Gr mostró propiedades destacadas, donde el Gr contribuye a la estabilidad electroquímica y al transporte electrónico ultrarrápido, mientras que el Nb₂O₅ ofrece reacciones redox superficiales sólidas, rápidas y reversibles. El Nb₂O₅@Gr mejoró significativamente las propiedades del dispositivo en términos de densidad de energía, densidad de potencia, voltaje celular y capacitancia aérea. Estos hallazgos alientan futuras investigaciones sobre las propiedades del electrodo compuesto Nb₂O₅@Gr en supercondensadores acuosos [22]. De igual manera, la síntesis de un electrodo sin aglutinante compuesto por nanopartículas de óxido de hierro (FeOx) soportadas en nano-fibras de carbono (CNF). El electrodo muestra una alta pseudocapacitancia de 239.2 F g⁻¹ debido a reacciones redox sólidas reversibles que involucran el par redox Fe^(II)/Fe^(III). El material compuesto exhibe comportamiento pseudocapacitivo, buena retención de carga por cada ciclo y baja resistencia en serie equivalente, lo que sugiere su idoneidad como material de electrodo para supercondensadores acuosos [23].

Los recientes avances en el uso de carbono derivado de biomasa como ánodo en baterías de iones de potasio (KIBs) destaca la idoneidad de los materiales de carbono basados en biomasa para sistemas de almacenamiento de energía sostenible debido a sus estructuras biológicas elaboradas, fuertes adsorciones fisicoquímicas, benignidad ambiental y bajo costo. Se proporciona una visión general de las microarquitecturas, estrategias de síntesis, mecanismos de almacenamiento de energía y características electroquímicas de los ánodos basados en carbono de biomasa, junto con desafíos futuros y direcciones de investigación [24], [25].

Una amplia gama de materiales derivados de biomasa, tales como, nano-láminas de carbono, carbón activado de hojas de ginkgo, carbón microporoso de desechos de linaza, carbón poroso de kapok, etc.; reportan excelentes propiedades electroquímicas, lo que proporciona soluciones sostenibles y económicas para aplicaciones en supercondensadores y otros dispositivos de almacenamiento de energía. A pesar de los avances significativos, persisten desafíos continuos, como mejorar el rendimiento volumétrico, optimizar la porosidad de los electrodos y desarrollar una comprensión más profunda de los mecanismos de almacenamiento de energía. Las investigaciones futuras se centrarán en resolver estos desafíos para promover aún más la aplicación de materiales de biomasa en dispositivos de almacenamiento de energía.

II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A. Materiales gráfenicos a partir de biomasa residual

1) *Pretratamiento de la biomasa residual*: en esta etapa la materia prima es secada entre un rango de temperatura de 150 – 200 °C durante 72 h, para luego ser molida en diversas ocasiones mediante un molino de bolas (esferas de

ZrO) y tamizada en una columna de cernidores hasta alcanzar un polvo homogéneo [26]–[28].

- 2) *Activación química en presencia de óxido de grafeno*: el polvo de biomasa residual es tratado en un medio ácido o básico para promover la generación de grupos químicos oxigenados (activación química) [20], [29]–[31]. La biomasa activada (BA) es mezclada con óxido de grafeno (GO), precursor químico del grafeno de multicapas, con la finalidad de generar una mezcla sólida de BA/GO.
- 3) *Tratamiento térmico para la obtención de matrices gráfenicas*: seguidamente a la etapa de activación, la mezcla BA/GO es tratada térmicamente a 800 - 1000 °C durante 1 h bajo el flujo de N₂(g) (atmosfera inerte) en un horno tubular [28], [32], [33]. De esta manera, se promueve la conversión térmica de la mezcla sólida BA/GO en biocarbón y grafeno de multicapas (BC/rGO).

B. Preparación de electrodos gráfenicos

Tras la preparación de los materiales gráfenicos se disponen para la elaboración de tintas de carbón y su soporte sobre colectores eléctricos metálicos. Específicamente, se elaboraron 50 mg de una mezcla gráfenica de biocarbón de bagazo de caña de azúcar (CA) o cascara de naranja (NA) con carbón superconductor (super-P). La mezcla gráfenica es suspendida en 5 mL de una mezcla orgánica de N-metil-2-pirrolidona (NMP) y fluoruro de polivinilo (PVDF) hasta alcanzar una suspensión estable mediante agitación continua. Seguidamente, la tinta gráfenica es soportada en colectores eléctricos de papel de Al y Cu de alta pureza mediante la técnica de “Dr. Blade” (Fig. 1). Tras alcanzar un recubrimiento homogéneo, las muestras son secadas a 80 °C en la estufa durante de 10 min (Fig. 1). Las láminas de material gráfenico son rotuladas como Al| BC/rGO y | BC/rGO |Cu las cuales representan a la sección catódica y anódica del supercapacitor a ensamblar. Previamente a la construcción del supercapacitor gráfenico, las láminas son cortadas en discos de 2 cm de diámetro para su inserción en las celdas tipo-moneda CR2032.

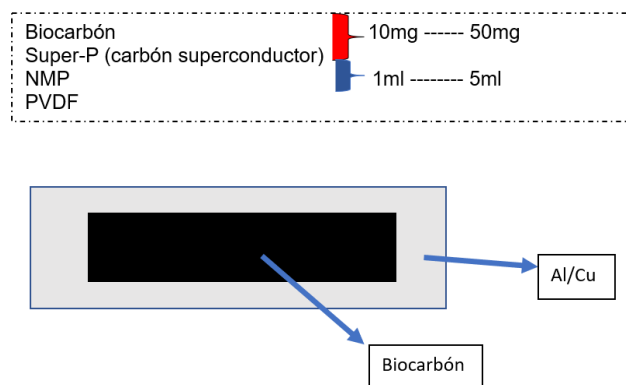


Fig. 1: Esquema de la preparación de los electrodos gráfenicos de Al| BC/rGO y BC/rGO |Cu.

C. Protocolo de ensamblaje de un supercapacitor tipo-moneda (CR2032)

Los discos de electrodos a base de biocarbón son insertados en una celda CR2032 de 2 cm de diámetro y 3.2 cm de espesor para luego ser selladas mediante una prensa hidráulica manual de tipo-moneda. En este punto, se evaluó la presión óptima que es requerida para obtener la menor resistencia y el potencial a circuito abierto (OCP de celda).

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los materiales grafénicos fueron preparados a partir de la conversión térmica de cascara de naranja y bagazo de caña de azúcar tratadas con una solución de ácido fosfórico al 1 y 2 mol L⁻¹. La carbonización de estas biomásas residuales se llevó a cabo a 800 °C en una atmósfera inerte de Ar (99,99 % de pureza) y durante 30 min.

Seguidamente, los materiales obtenidos son pulverizados y utilizados en la preparación de tintas de carbón, con las

cuales, se ejecuta su soporte en los colectores eléctricos de Cu o Al y elaboran electrodos grafénicos con una configuración de disco. Los electrodos son insertados en las celdas CR2032 y separados por un disco de celulosa humectada con un electrolito de KOH 1 mol L⁻¹, para finalmente, ser sellados con una prensa hidráulica tipo-moneda.

La Figura 2 presenta los resultados del análisis morfológico de los materiales en estudio. Las Figura 2 y 3 muestra la influencia del tratamiento ácido sobre el material grafénico obtenido. Específicamente, la Figura 2 revela una mayor fragmentación en el carbón a base de cascara de naranja cuando la concentración de ácido fosfórico se eleva desde (Fig. 2a, 2b) 1,0 a (Fig. 2c, 2d) 2,0 mol L⁻¹.

Por su parte, la Figura 3 revela que el tratamiento ácido sobre el material carbonoso obtenido a partir de caña de azúcar limita la fragmentación de los granos de la matriz, pero eleva la porosidad en la microestructura analizada (Fig. 3a – 3d).

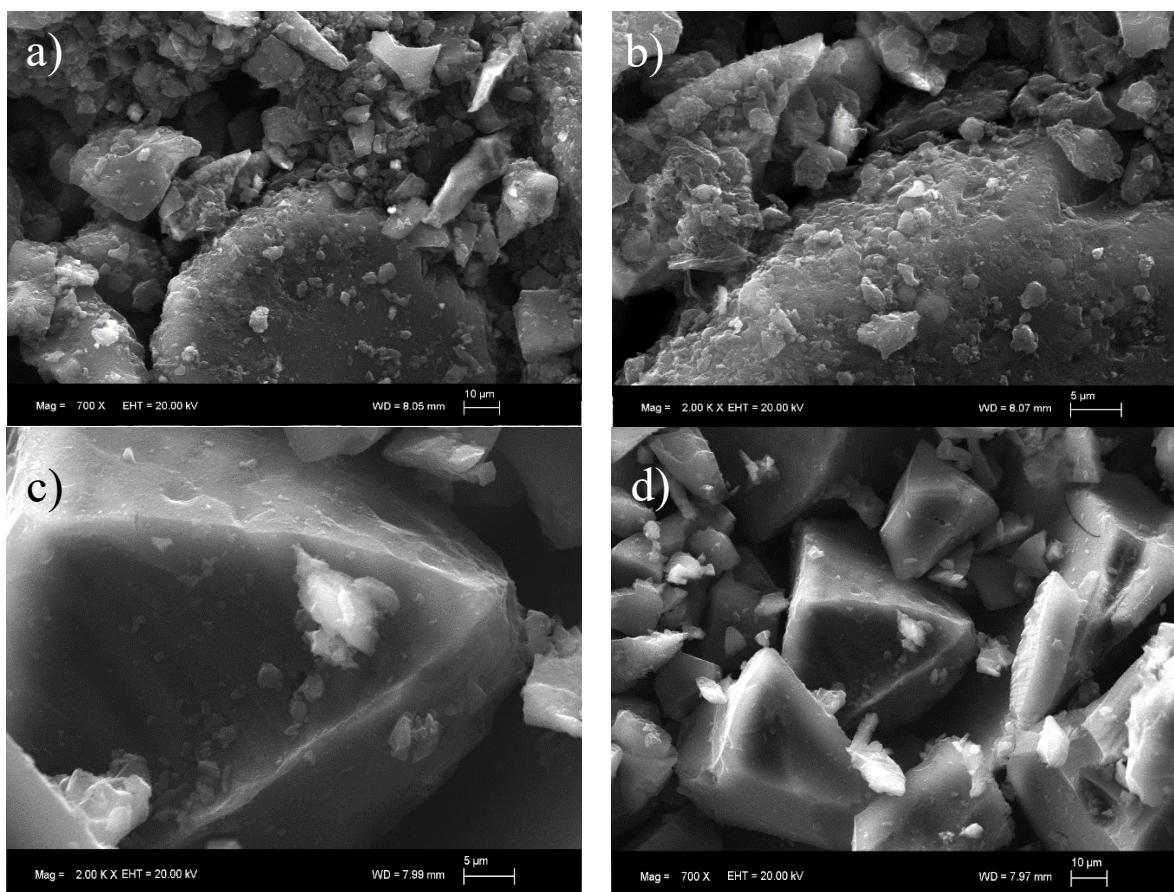


Fig. 2: Microscopía electrónica de barrido (SEM) de biocarbón activado obtenido a partir de cáscara de naranja tratada con (a, b) 1, (c, d) 2 y (e, f) 4 mol L⁻¹ de ácido fosfórico.

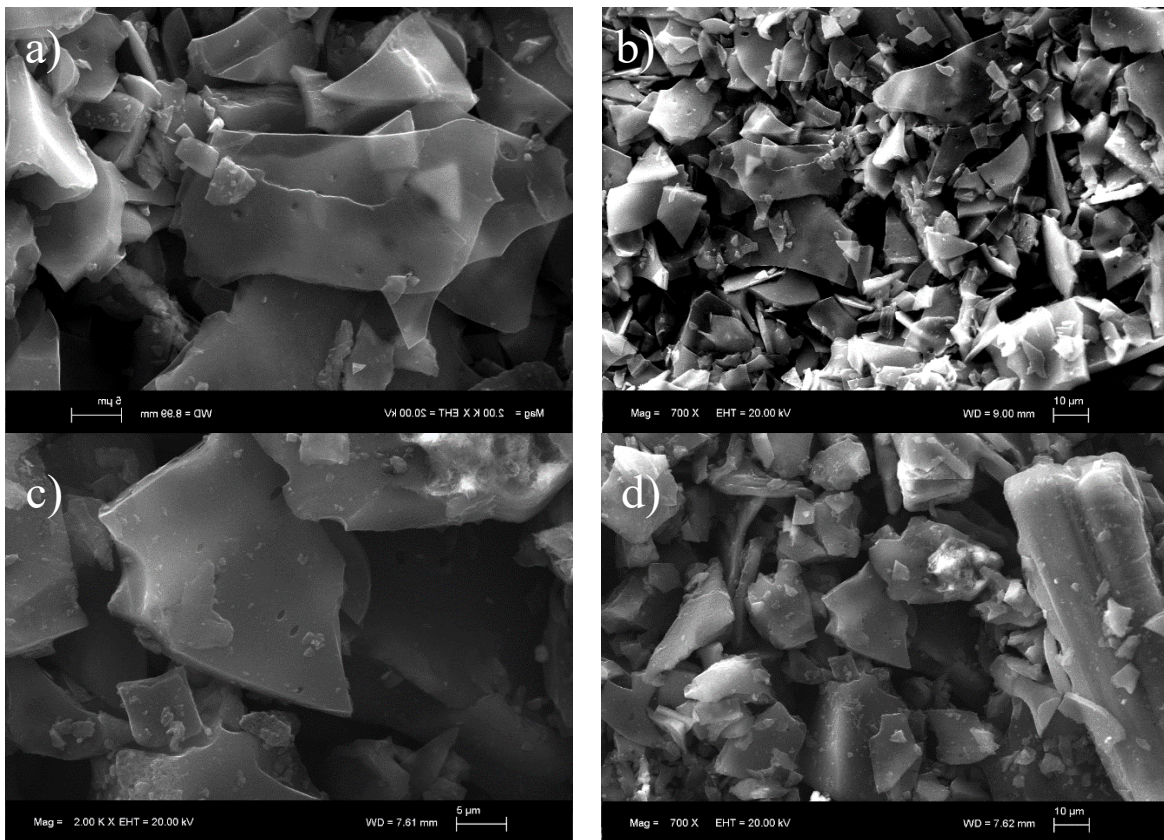


Fig. 3: Microscopía electrónica de barrido (SEM) de biocarbón activado obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar tratado con (a, b) 1, y (c, d) 2 mol L⁻¹ de ácido fosfórico.

Se inició la preparación de los componentes de la moneda, incluyendo la elaboración de la tinta conductora. Para ello, se pesó cuidadosamente el carbón y cada uno de los componentes que conforman la tinta utilizando una balanza especial. Además, se procedió a recortar las láminas de aluminio y cobre, así como las partes que se iban a ensamblar.

Una vez preparada la tinta, se aplicó meticulosamente sobre las láminas de cobre y aluminio. Para asegurar la adherencia de la tinta a las láminas, se utilizó un horno precalentado a 130 grados Celsius durante 45 minutos. Tras el tiempo de horneado, las láminas fueron retiradas y posteriormente cortadas al tamaño adecuado para la moneda. Además, se recortaron pedazos de papel del tamaño de la moneda para utilizarlos como material de celulosa. Una vez obtenidos todos los componentes, se procedió al ensamblaje, realizando diversas combinaciones para observar el comportamiento de los materiales en diferentes configuraciones. Este proceso de preparación y ensamblaje fue crucial para obtener los dispositivos de supercapacitores basados en biocarbón y permitió realizar análisis detallados sobre su rendimiento y eficiencia en términos de almacenamiento de energía.

Una vez ensambladas las distintas monedas, se procedió a utilizar la prensa para aplicar presión variada, comenzando desde niveles bajos hasta el punto en que la moneda mostraba

signos de deformación. Este proceso nos permitió obtener varias muestras que posteriormente fueron sometidas a pruebas exhaustivas para evaluar su almacenamiento, resistencia interna y conductividad.

Para investigar cómo afectaban las diferentes presiones y combinaciones internas a las monedas, se empleó un enfoque meticuloso. Se utilizó un multímetro para llevar a cabo mediciones precisas, lo que nos permitió obtener datos detallados sobre el rendimiento electroquímico de cada muestra. Este análisis nos ayudó a comprender mejor cómo la presión de ensamblaje y la configuración interna influyen en las propiedades y el funcionamiento de los supercapacitores basados en biocarbón.

TABLA I
INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN LAS PROPIEDADES ELECTRICAS DE LOS SUPERCAPACITORES TIPO-MONEDA

Muestra	Presión / bar	Potencial a circuito abierto (V _{OCP}) / V	Resistencia / kΩ
M1	10	0.54	10
M2	25	0.35	200
M3	50	0.55	110
M4	60	1.00	0.9
M5	80	0.90	0.46
M6	100	1.10	0.9

Se decidió cambiar el tipo de carbón utilizado por uno derivado de la cáscara de naranja, explorando así nuevas posibilidades. Se procedió a la preparación de una nueva tinta utilizando diversos compuestos químicos, con especial atención a la seguridad y el control de la contaminación. Para ello, se llevó a cabo el proceso en una extractora de gases para prevenir la dispersión de sustancias nocivas. Además, se utilizó una calentadora para mejorar la uniformidad y la unión de la tinta, garantizando así un resultado consistente y homogéneo.

IV. CONCLUSIONES

La presión de ensamblaje entre 50 y 80 bar mostró un impacto significativo en el rendimiento de los supercapacitores, con una mejor capacitancia específica.

Se identificaron tres combinaciones de materiales que demostraron un rendimiento prometedor para los electrodos de biocarbón en los supercapacitores, lo que destaca la importancia de seleccionar cuidadosamente los materiales y estructuras de ensamblaje.

Los resultados respaldan la viabilidad del biocarbón como material de electrodo en supercapacitores, debido a su disponibilidad, bajo costo y naturaleza renovable.

Se destacó la importancia de optimizar el proceso de fabricación, incluida la preparación de la tinta conductora y el ensamblaje de los dispositivos, para mejorar el rendimiento y la durabilidad de los supercapacitores basados en biocarbón.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por la Dirección de Investigación de la Universidad Tecnológica del Perú para la ejecución de la presente investigación mediante el contrato de investigación P-2023-LIM-04.

REFERENCIAS

[1] M. Zhang, J. Zhang, S. Ran, W. Sun, and Z. Zhu, "Biomass-Derived sustainable carbon materials in energy conversion and storage applications: Status and opportunities. A mini review," *Electrochem. commun.*, vol. 138, no. April, p. 107283, 2022.

[2] A. Afif, S. M. Rahman, A. Tasfiah Azad, J. Zaini, M. A. Islan, and A. K. Azad, "Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage – A review," *J. Energy Storage*, vol. 25, no. July, p. 100852, 2019.

[3] M. Shanmuga Priya, P. Divya, and R. Rajalakshmi, "A review status on characterization and electrochemical behaviour of biomass derived carbon materials for energy storage supercapacitors," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 16, no. February, p. 100243, 2020.

[4] C. G. Real *et al.*, "Analyses of dispersive effects and the distributed capacitance in the time and frequency domains of activated carbon nanofiber electrodes as symmetric supercapacitors," *Electrochim. Acta*, vol. 402, p. 139299, 2022.

[5] S. Lin, F. Wang, and Z. Shao, "Biomass applied in supercapacitor energy storage devices," *J. Mater. Sci.*, vol. 56, no. 3, pp. 1943–1979, 2021.

[6] A. R. Selvaraj, A. Muthusamy, Inho-Cho, H. J. Kim, K. Senthil, and K. Prabakar, "Ultrahigh surface area biomass derived 3D hierarchical porous carbon nanosheet electrodes for high energy density supercapacitors," *Carbon N. Y.*, vol. 174, pp. 463–474, 2021.

[7] X. Zhu *et al.*, "Sustainable activated carbons from dead ginkgo leaves for supercapacitor electrode active materials," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 181, pp. 36–45, 2018.

[8] Y. Li *et al.*, "Biomass-derived microporous carbon with large micropore size for high-performance supercapacitors," *J. Power Sources*, vol. 448, no. July 2019, p. 227396, 2020.

[9] L. H. Zheng, M. H. Chen, S. X. Liang, and Q. F. Lü, "Oxygen-rich hierarchical porous carbon derived from biomass waste-kapok flower for supercapacitor electrode," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 113, no. December 2020, p. 108267, 2021.

[10] A. Muzaffar, M. B. Ahamed, K. Deshmukh, and J. Thirumalai, "A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 101, no. October 2018, pp. 123–145, 2019.

[11] X. Liang, R. Liu, and X. Wu, "Biomass waste derived functionalized hierarchical porous carbon with high gravimetric and volumetric capacitances for supercapacitors," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 310, no. September 2020, p. 110659, 2021.

[12] T. Sesuk, P. Tammawat, P. Jivaganont, K. Somton, P. Limthongkul, and W. Kobsiriphat, "Activated carbon derived from coconut coir pith as high performance supercapacitor electrode material," *J. Energy Storage*, vol. 25, no. June, p. 100910, 2019.

[13] Q. Chen *et al.*, "Activated microporous-mesoporous carbon derived from chestnut shell as a sustainable anode material for high performance microbial fuel cells," *Bioresour. Technol.*, vol. 249, pp. 567–573, 2018.

[14] Z. H. Zhang, T. S. Zhao, B. F. Bai, L. Zeng, and L. Wei, "A highly active biomass-derived electrode for all vanadium redox flow batteries," *Electrochim. Acta*, vol. 248, pp. 197–205, 2017.

[15] Y. Sun *et al.*, "Biomass-derived porous carbon electrodes for high-performance supercapacitors," *J. Mater. Sci.*, vol. 55, no. 12, pp. 5166–5176, 2020.

[16] S. Herou, P. Schlee, A. B. Jorge, and M. Titirici, "Biomass-derived electrodes for flexible supercapacitors," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 9, pp. 18–24, 2018.

[17] L. Zhang, Z. Liu, G. Cui, and L. Chen, "Biomass-derived materials for electrochemical energy storages," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 43, pp. 136–164, 2015.

[18] X. Liu *et al.*, "Biomass-derived robust three-dimensional porous carbon for high volumetric performance supercapacitors," *J. Power Sources*, vol. 412, no. August 2018, pp. 1–9, 2019.

[19] A. Abbas *et al.*, "Effect of electrode porosity on the charge transfer in vanadium redox flow battery," *J. Power Sources*, vol. 488, p. 229411, 2021.

[20] K. M. Ajay, M. N. Dinesh, G. Byatarayappa, M. G. Radhika, N. Kathyayini, and H. Vijeth, "Electrochemical investigations on low cost KOH activated carbon derived from orange-peel and polyaniline for hybrid supercapacitors," *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 127, no. February, p. 108523, 2021.

[21] E. G. Shankar, A. K. Das, and J. S. Yu, "Entire onion source-derived redox porous carbon electrodes towards efficient quasi-solid-state solar charged hybrid supercapacitor," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 125, pp. 118–127, 2022.

[22] R. Vicentini *et al.*, "Niobium pentoxide nanoparticles decorated graphene as electrode material in aqueous-based supercapacitors: Accurate determination of the working voltage window and the analysis of the distributed capacitance in the time domain," *J. Energy Storage*, vol. 44, no. October, 2021.

[23] M. Alexandreli *et al.*, "Pseudocapacitive behaviour of iron oxides supported on carbon nanofibers as a composite electrode material for aqueous-based supercapacitors," *J. Energy Storage*, vol. 42, no. May, p. 103052, 2021.

[24] X. Yuan, B. Zhu, J. Feng, C. Wang, X. Cai, and R. Qin, "Recent advance of biomass-derived carbon as anode for sustainable potassium ion battery," *Chem. Eng. J.*, vol. 405, p. 126897, 2021.

[25] K. M. Shell *et al.*, "Supercapacitor performance of corn stover-derived biocarbon produced from the solid co-products of a hydrothermal liquefaction process," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 13, no. December 2020, p. 100625, 2021.

[26] S. Mehta, S. Jha, and H. Liang, "Lignocellulose materials for

- supercapacitor and battery electrodes: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 134, no. October 2019, p. 110345, 2020.
- [27] L. Chen, T. Ji, L. Mu, and J. Zhu, “Cotton fabric derived hierarchically porous carbon and nitrogen doping for sustainable capacitor electrode,” *Carbon N. Y.*, vol. 111, pp. 839–848, 2017.
- [28] A. Bazan-Aguilar, E. O. López, M. Ponce-Vargas, and A. M. Baena-Moncada, “Biomass-Based Carbon Electrodes in the Design of Supercapacitors: An Electrochemical Point of View,” *Supercapacitors [Working Title]*, 2021.
- [29] C. Wei, J. Yu, X. Yang, and G. Zhang, “Activated Carbon Fibers with Hierarchical Nanostructure Derived from Waste Cotton Gloves as High-Performance Electrodes for Supercapacitors,” *NANOSCALE Res. Lett.*, vol. 12, 2017.
- [30] J. Wang and S. Kaskel, “KOH activation of carbon-based materials for energy storage,” *J. Mater. Chem.*, vol. 22, no. 45, pp. 23710–23725, 2012.
- [31] P. Manasa, S. Sambasivam, and F. Ran, “Recent progress on biomass waste derived activated carbon electrode materials for supercapacitors applications—A review,” *J. Energy Storage*, vol. 54, no. June, p. 105290, 2022.
- [32] A. Bazan-Aguilar, M. Ponce-Vargas, C. L. Caycho, A. La Rosa-Toro, and A. M. Baena-Moncada, “Highly Porous Reduced Graphene Oxide-Coated Carbonized Cotton Fibers as Supercapacitor Electrodes,” *ACS Omega*, vol. 5, no. 50, pp. 32149–32159, Dec. 2020.
- [33] A. M. Baena-Moncada, A. Bazan-Aguilar, E. Pastor, and G. Á. Planes, “Methanol conversion efficiency to CO₂ on PtRu nanoparticles supported catalysts, a DEMS study,” *J. Power Sources*, vol. 437, 2019.