

Desenvolvimento de eletrodos nanoestruturados de nióbio@biocarvão para dispositivos simétricos de armazenamento de energia usando eletrólito orgânico LiPF6 (EC/DMC)

Glauco Meireles Mascarenhas Morandi Lustosa (CTI) glauco.lustosa@cti.gov.br

Resumo

Neste trabalho foi desenvolvida, a partir da pirólise controlada do bagaço da cana-de-açúcar e dopagem com nitrogênio, a síntese de um material compósito à base de biocarvão e óxido de nióbio. Através da Microscopia Eletrônica de Varredura foi possível verificar as nanoestruturas de nióbio ancoradas na superfície do biocarvão com morfologias de agulhas com comprimento entre 300-900 nm e espessura entre 20-50 nm. Pela técnica de DRX foi identificada a estrutura cristalina ortorrômbica do Nb₂O₅. A partir do compósito nióbio@biocarvão preparou-se uma pasta carbonácea com adição de negro de fumo e PVDF na proporção 8:1:1, dispersos em NMP, e depositado por drop casting em eletrodos circulares (16 mm de diâmetro) de espuma de níquel. Foram preparados dispositivos simétricos coin cell (CR2032 model) utilizando o eletrólito 1M LiPF6 EC/DMC. Por Voltametria Cíclica verificou-se a estabilidade eletroquímica em uma janela de potência de 3 Volts (-1,5 a +1,5). Através da caracterização por Carga-Descarga, analisada na densidade de corrente de 0,1 A/g, foram calculadas as propriedades de capacidade a 4,6 F/g, densidade de energia de 2,6 W.h/kg e densidade de força de 288 W/kg.

Palavras-chave: Biocarvão; Nióbio Nanoestruturado; Armazenamento de Energia.

1. Introdução

A transição energética global, impulsionada pela necessidade urgente de integrar fontes renováveis intermitentes (como solar e eólica) e pela eletrificação acelerada da mobilidade e de dispositivos portáteis, criou uma demanda sem precedentes por soluções de armazenamento de energia que sejam, simultaneamente, eficientes, sustentáveis e robustas. Neste cenário, dispositivos eletroquímicos como baterias e supercapacitores (SCs) são pilares centrais da pesquisa. Enquanto as baterias se destacam pela alta densidade de energia (capacidade de armazenar grandes quantidades de carga), os supercapacitores oferecem uma maior densidade de potência, ou seja, possuem capacidade de entregar ou absorver energia mais rapidamente. (SUN e colab., 2024; THOMAS e colab., 2019; YU, Xingwen e MANTHIRAM, 2021)

Os supercapacitores, também conhecidos como capacitores eletroquímicos, despertam crescente interesse devido a um conjunto único de vantagens: uma vida útil longa (ciclagem), estabilidade operacional e processos de carga e descarga rápidos e altamente reversíveis. O desempenho de um supercapacitor está intrinsecamente ligado ao seu mecanismo de armazenamento de carga, o que permite sua classificação em duas categorias principais: capacitores eletroquímicos de dupla camada (EDLCs) e pseudocapacitores (PCs). Os PCs armazenam energia por meio de reações redox faradaicas (envolvendo transferência rápida e reversível de elétrons entre o material do eletrodo e o eletrólito). Ao mesmo tempo, os EDLCs dependem da adsorção eletrostática de íons na interface entre a superfície do eletrodo e o eletrólito (ao aplicar uma diferença de potencial, os íons do eletrólito se acumulam na interface eletrodo-eletrólito, formando então uma dupla camada elétrica). (FISCHER e colab., 2022; POOCHAI e colab., 2019; QU e colab., 2022; RAWAT e colab., 2022)

Embora haja essa classificação dos sistemas de armazenamento de energia, atualmente muitos sistemas modernos são híbridos, fazendo a combinação de ambos os mecanismos. Recentemente muitas pesquisas são feitas na área de materiais compósitos para o desenvolvimento de eletrodos avançados, promovendo assim uma sinergia entre as propriedades dos materiais e armazenando carga simultaneamente pelos dois mecanismos. Esses materiais compósitos podem ser adaptados para atender às necessidades específicas de uma ampla gama de aplicações, tornando-as uma solução de armazenamento de energia altamente desejável. No entanto, as pesquisas em andamento visam desenvolver dispositivos mais ecológicos e mais eficientes, com foco no desenvolvimento de materiais de eletrodo sustentáveis. (LI e colab., 2021; ZHANG e colab., 2020)

Materiais de carbono têm sido estudados como eletrodos em SCs devido às suas características únicas e vantajosas de armazenamento de energia e adaptabilidade a requisitos específicos. Esses materiais apresentam boa condutividade elétrica, alta área superficial e estabilidade química. Entre os candidatos emergentes como precursores alternativos de carbono para dispositivos EDLC, os materiais derivados de biomassa têm recebido atenção significativa devido às suas propriedades únicas, renovabilidade e potencial para enfrentar desafios ambientais e energéticos. A biomassa, matéria orgânica de origem vegetal, pode ser utilizada para produzir carvão ativado (ou seja, biocarvão) e, devido à sua abundância na natureza, apresenta baixo custo. Além disso, o biocarvão é caracterizado por uma estrutura porosa com alta área superficial e sua produção é de fácil escalabilidade, tornando-o um candidato potencial para aplicações de armazenamento de energia, não apenas oferecendo uma alternativa sustentável aos sistemas tradicionais baseados em combustíveis fósseis, mas também abordando as questões de gestão de resíduos e sequestro de carbono. (NATARAJAN e colab., 2019; NGIDI e colab., 2024; YANG e PARK, 2018)

O Nb₂O₅ surge como um candidato potencial devido ao seu grande espaçamento intercamada de 3,9 Å para promover a inserção/extração de íons em processos de carga-descarga. Dentro de sua estrutura ortorrômbica (T-Nb₂O₅), os íons de nióbio são configurados em poliedros (NbO₆ ou NbO₇) coordenados por íons de oxigênio, representando canais abertos e uma estrutura em camadas interconectadas, oferecendo assim caminhos rápidos e promovendo a difusão iônica. Além disso, esta fase cristalina apresenta alta estabilidade química, capacidade intrínseca de intercalar íons eletrolíticos sem estressar sua estrutura cristalina, exibindo comportamento de pseudocapacitância, alta capacidade teórica (~200 mAh.g⁻¹) e alta janela de potencial operacional, demonstrando expectativas superiores para materiais pseudocapacitivos de alto desempenho à base de nióbio e aplicações de armazenamento de energia. (MA e colab., 2024; MENG e colab., 2022; YI e colab., 2021; YU, Cuiping e colab., 2025)

Assim, esse trabalho busca otimizar a síntese do compósito de biocarvão, realizando um estudo de proporção dos materiais e da morfologia do óxido de nióbio, objetivando desenvolver dispositivos de armazenamento de energia que apresentem alta densidade de potência, como nos EDLCs, enquanto alcançam uma densidade de energia que começa a se aproximar das baterias.

2. Procedimento Experimental

2.1. Matérias-Primas

Ácido sulfúrico (H₂SO₄), ácido fosfórico (H₃PO₄), ureia (CH₄N₂O), poli(fluoreto de vinilideno) (PVDF) e N-metil-2-pirrolidona (NMP) eram todos de pureza analítica da Sigma-Aldrich e utilizados sem purificação adicional. O bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) foi obtido de uma fazenda no estado de São Paulo, Brasil. O oxalato de nióbio e amônio (NH₄[NbO(C₂O₄)₂(H₂O)₂].(H₂O)n) e o negro de fumo (LITX 300) foram doados pela CBMM® e pela Cabot®, respectivamente.

2.2. Síntese do compósito Nióbio@Biocarvão

A biomassa seca foi macerada e misturada com os reagentes diluídos em água deionizada. Foi utilizada uma proporção mássica fixa de 1:2 (p/p) de ureia em relação à biomassa seca, e as proporções do precursor de nióbio foram variadas (1:1, 1:2, 1:3). Biocarvão puro (ou seja, sem a adição de precursores, nomeado como S0-0) também foi sintetizado para comparar as propriedades elétricas. A mistura foi colocada em um cadrinho de alumina e, posteriormente, em um forno tubular para carbonização termoquímica a 750 °C/4 horas com atmosfera de N₂. O produto resultante, biocarvão, foi macerado e peneirado em uma peneira de 200 mesh.

2.3. Caracterizações Estruturais

A estrutura cristalina das amostras de pó foi analisada por difração de raios X (XRD), utilizando um difratômetro de raios X Shimadzu XRD7000, em uma faixa de 2θ = 20 a 80° com incremento de Δ2θ = 0,02° (radiação CuKα, λ = 1,5460 Å), e os resultados foram comparados com os padrões de cartão JCPDS. Para avaliar o tamanho e a forma dos pós carbonizados e das nanopartículas metálicas, foi realizada a Microscopia Eletrônica de Varredura por Canhão de Emissão de Campo (FEG-SEM) utilizando um Tescan modelo Mira 3 XMU. O software ImageJ foi utilizado para análise e determinação dos tamanhos das partículas.

2.4. Preparação dos Eletrodos

Uma pasta foi preparada misturando ~20 mg do compósito à base de biocarvão, fluoreto de polivinilideno (PVDF), negro de fumo (LITX300), na proporção mássica de 8:1:1, e uma alíquota de N-metil-2-pirrolidona (NMP). Após homogeneização, essa pasta foi depositada em substrato poroso de espuma de níquel que foram previamente cortados em pedaços circulares de 16 mm de diâmetro e em seguida foram levados para secagem em estufa a 100 °C/12 horas. Esses eletrodos foram utilizados montagem de uma célula simétrica tipo moeda (coincell CR2032 model). Um eletrodo foi colocado em cada lado da coin cell, com um papel de filtro de celulose usado como separador, e 1M LiPF6 (EC/DMC) foi adicionado como eletrólito.

2.5. Desempenho Eletroquímico

As caracterizações elétricas foram conduzidas em um Potenciómetro AutoLab (modelo PGSTAT302N) à temperatura ambiente. A Voltametria Cíclica (VC) foi realizada em diferentes taxas de varredura de 10 a 200 mV.s⁻¹ dentro da faixa de varredura de -1,5 a 1,5 V. A Espectroscopia de Impedância (EI) foi realizada em tensão CC de offset de 0,2 V, nas frequências de 1000 a 0,1 Hz e amplitude de 100 mV. A Carga-Descarga Galvanostática (GCD) foi realizada em diferentes densidades de corrente (0,1 e 0,5 A.g⁻¹). Em seguida, a partir da última curva de descarga, foram determinadas as propriedades de Capacitância (C, em F/g), Densidade de Energia (E, em W.h/kg) e Densidade de Potência (P, em W/kg) a partir das seguintes equações: (NASIT e colab., 2025; SELVARAJ e colab., 2023)

$$C_{sp} = \frac{2.I.\Delta t}{m_t\Delta V} \quad (1)$$

$$C_{cell} = \frac{4.I.\Delta t}{m_t\Delta V} \quad (2)$$

$$E_{cell} = \frac{0.25x C_{cell}x(\Delta V)^2}{3.6} \quad (3)$$

$$P_{cell} = \frac{E_{cell}}{\frac{\Delta t}{3600}} \quad (4)$$

onde m_t representa a massa total de biocarvão de ambos os eletrodos, ΔV é a janela de potencial, Δt é o tempo de descarga, C_{cell} é a capacitância específica da célula completa no sistema simétrico de dois eletrodos e C_{sp} é a capacitância específica do material do eletrodo único no sistema simétrico de dois eletrodos.

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterização Morfológica e Estrutural

A partir da caracterização por DRX foram identificados os planos cristalinos (001), (100), (101), (002), (110), (102) e (112) da estrutura do óxido de nióbio na sua fase ortorrômbica ($T\text{-Nb}_2\text{O}_5$), de acordo com a ficha catalográfica padrão JCPDS nº 30-0873 (LIU, Jun e colab., 2011; LIU, Meian e colab., 2015). Com o aumento do reagente precursor de nióbio na etapa de calcinação da biomassa, os pós compósitos à base de biocarvão apresentaram o aumento da cristalinidade (definição e intensidade) dos picos característicos à fase cristalina do Nb_2O_5 . A banda larga observada na região de 25–30° está relacionada a uma estrutura de carbono amorfado $C<002>$ com folhas aromáticas orientadas aleatoriamente (DEHKHODA e colab., 2014).

A caracterização morfológica do biocarvão puro por Microscopia Eletrônica de Varredura revelou a morfologia esperada, caracterizada por estruturas de carbono porosas e de escala micrométrica. Enquanto que para os compósitos foram observadas mudanças estruturais com o aumento da quantidade de precursor de nióbio na síntese. Na amostra SNb2-1, com a menor adição de nióbio, observou-se a formação de partículas esféricas de nióbio ancoradas na superfície da matriz de carbono, de diâmetro na faixa de 20–40 nm. Com um aumento do precursor de nióbio na síntese das amostras SNb2-2 e SNb2-3, observou-se que foi induzido um crescimento uniaxial, alterando a morfologia das nanopartículas, resultando na formação de nanoagulhas. Embora a espessura destas nanoestruturas tenha se mantido similar (na faixa de 20–50 nm), no compósito SNb2-3 foi verificado um crescimento uniaxial maior, resultando em nanoestruturas com comprimentos na faixa entre 600–900 nm, enquanto no compósito SNb2-2 o comprimento observado ficou na faixa entre 250–600 nm.

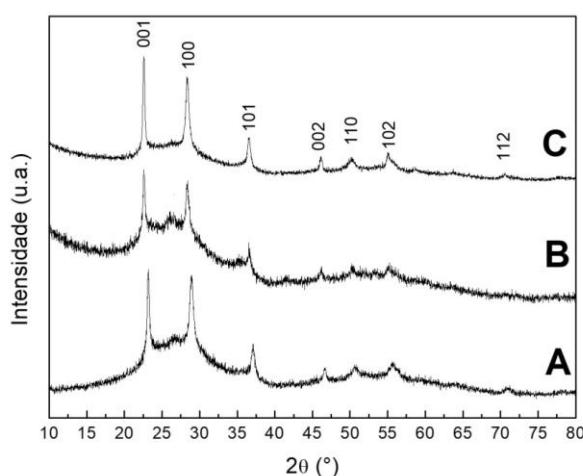


Figura 1 – DRX dos pós compósitos de nióbio@biocarvão: (A) SNb2-1, (B) SNb2-2 e (C) SNb2-3

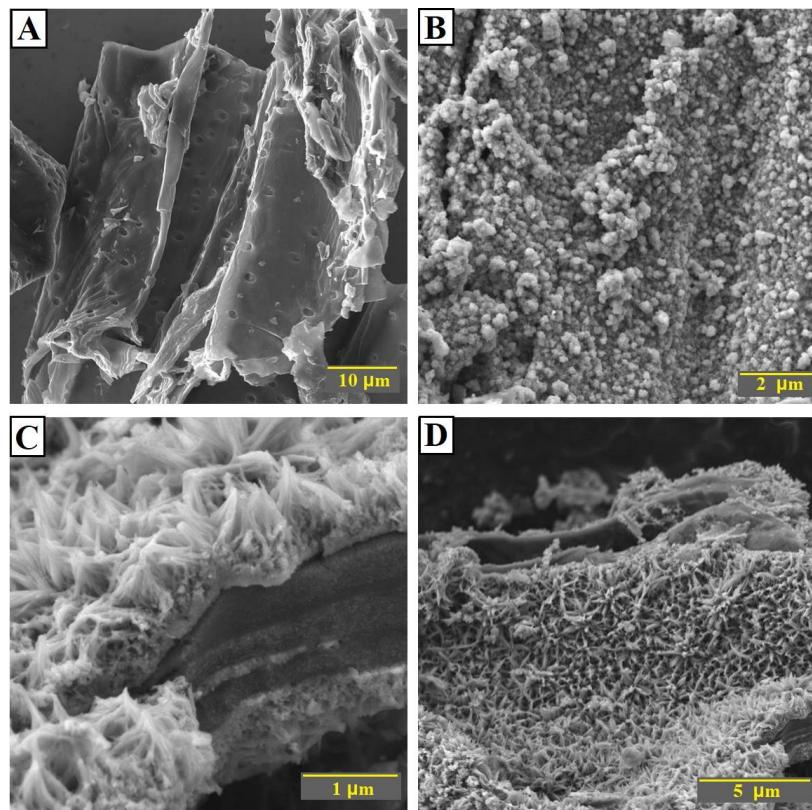


Figura 2 – MEV dos pós compósitos de biocarvão: (A) S0-0, (B) SNb2-1, (C) SNb2-2 e (D) SNb2-3

3.2. Caracterização Eletroquímica

A análise por Voltametria Cíclica (VC), demonstrada na Figura 3, foi realizada em uma janela de potencial de -1,5 V a +1,5 V. Os voltamogramas resultantes apresentaram um formato quasi-retangular, característico do comportamento de capacitores eletroquímicos de dupla camada (EDLCs). Observou-se um alargamento progressivo das curvas de VC de acordo com o aumento da taxa de varredura, o que indica uma boa resposta capacitativa e eficiente transporte de íons em diferentes condições. Não foram observados a presença de picos redox ou sinais de reações parasitas (como a evolução de hidrogênio ou oxigênio), confirmando assim a natureza predominantemente capacitativa do armazenamento de carga e a reversibilidade eletroquímica do dispositivo dentro desta faixa de tensão analisada.

Os dispositivos simétricos também foram avaliados em janelas de potencial operacionais progressivamente maiores, variando de 0 V até 2,0 V (Figura 4). A ampliação da janela de tensão operacional é uma estratégia fundamental para o avanço dos supercapacitores, pois a densidade de energia aumenta quadraticamente com a tensão. Para aplicações práticas, maximizar a tensão operacional é, portanto, uma abordagem mais impactante para alcançar alto desempenho do que focar apenas na capacidade específica. A capacidade demonstrada pelo dispositivo de operar estavelmente em tensões ampliadas corrobora com a potencialidade do compósito para aplicação em sistemas de armazenamento de energia.

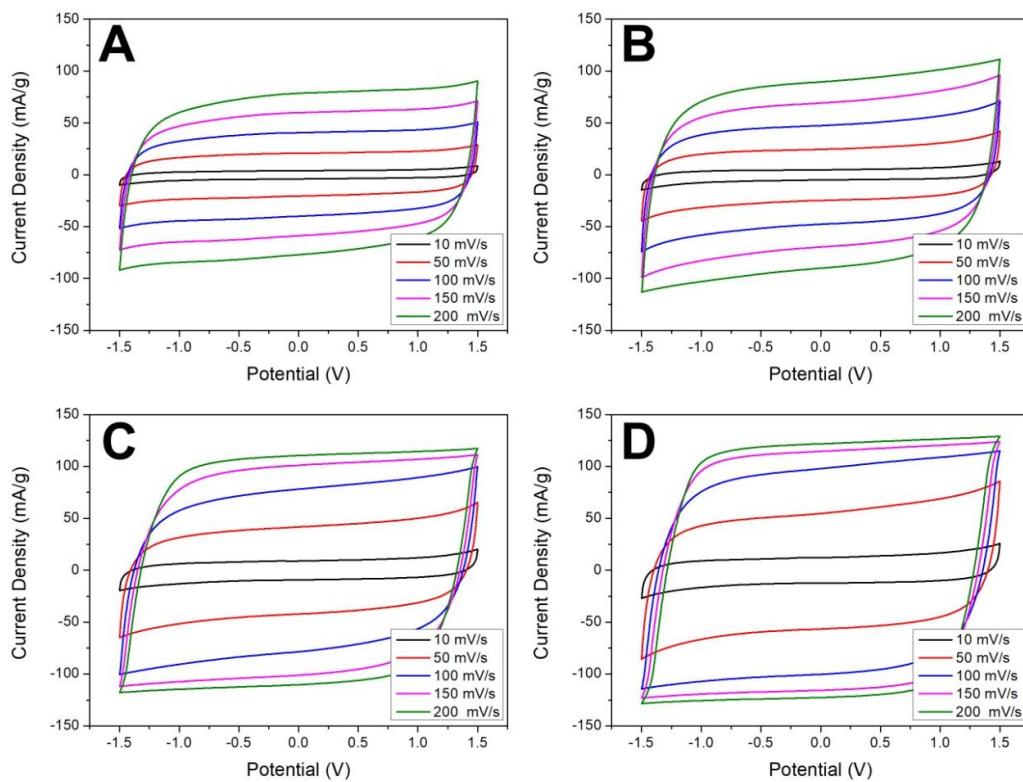


Figura 3 – Voltametria cíclica com variação da velocidade de varredura dos dispositivos simétricos coincell dos eletrodos: (A) S0-0, (B) SNb2-1, (C) SNb2-2 e (D) SNb2-3

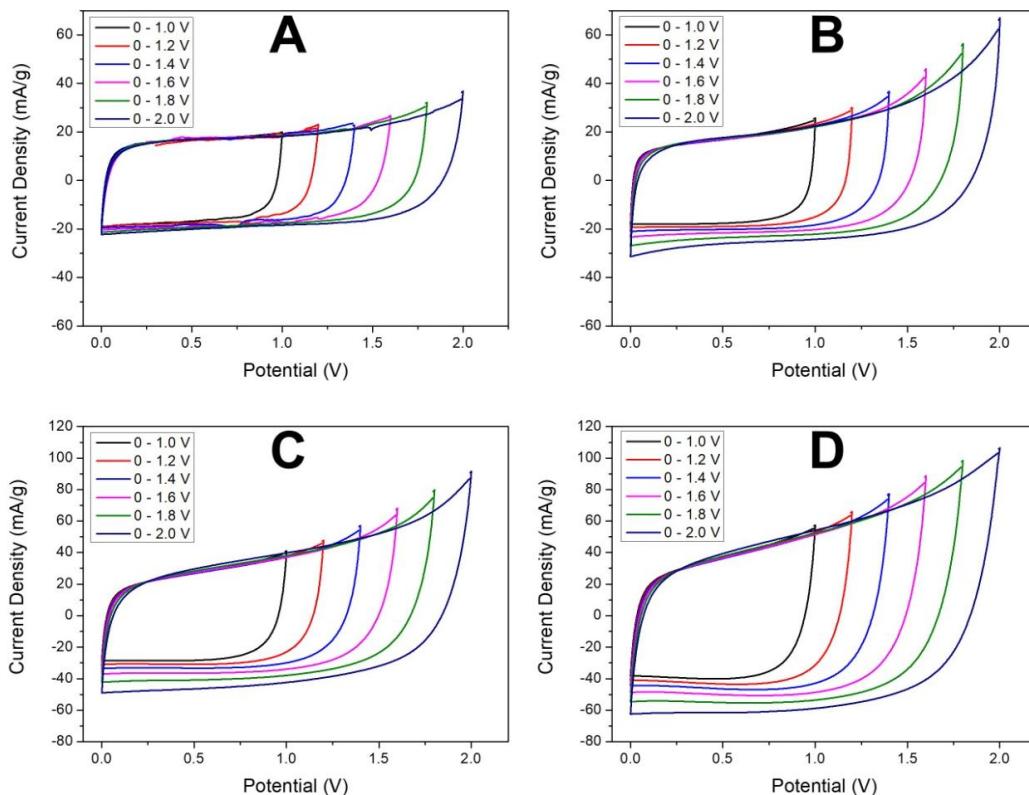


Figura 4 – Voltametria cíclica em diferentes janelas de potencial dos dispositivos simétricos coincell dos eletrodos: (A) S0-0, (B) SNb2-1, (C) SNb2-2 e (D) SNb2-3

A partir da caracterização por Impedância Eletroquímica, foram obtidos os diagramas de Nyquist (Figura 5), que exibem um semicírculo em altas frequências e uma linha inclinada com a diminuição da frequência. Os dados de impedância foram analisados usando o software Zview, ajustando o gráfico de Nyquist com o circuito equivalente R1(CPE1[R2W]), conforme indicado na Figura 5. A região inicial está relacionada à resistência intrínseca da solução eletrolítica (denominada R1), e na sequência encontra-se a região da resistência do material: um elemento de fase constante (CPE) em combinação paralela com uma resistência de transferência de carga (R2) e um elemento de impedância de Warburg (W) na região de baixa frequência (representada pela linha quase vertical), característica de natureza capacitiva. O semicírculo ilustra a impedância complexa da interface eletrodo-eletrolito, representando a resistência e a capacidade nessa região. O diâmetro está diretamente relacionado à resistência da interface (R2) no mecanismo de transferência e armazenamento de carga. A partir do fitting, obteve-se os valores de $7,23\ \Omega$ para SNb2-1, $5,68\ \Omega$ para SNb2-2 e $3,94\ \Omega$ para SNb2-3. Esses baixos valores, seguidos pela linha de Warburg nas regiões de baixa frequência, indicam o transporte rápido de elétrons durante o processo de carga e descarga.

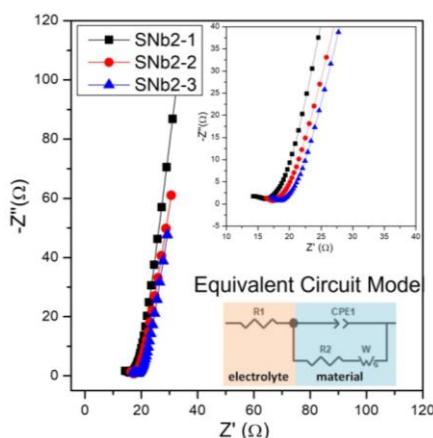


Figura 5 – Diagrama de Nyquist da caracterização EIS dos dispositivos simétricos coincell dos eletrodos: (A) SNb2-1, (B) SNb2-2 e (C) SNb2-3

Os desempenhos de carga e descarga dos dispositivos preparados foram analisados aplicando-se densidades de corrente constantes de 0,1 e 0,5 A/g e definindo-se -1,5 V como limite inferior de potencial para o ciclo de descarga e +1,5 V como limite superior de potencial para o ciclo de carga, apresentados nos gráficos da Figura 6. Os parâmetros para nossa célula simétrica dos compósitos $Nb_2O_5@biocarvão$ foram calculados a partir das Equações 2-4, e estão detalhados na Tabela 1. As curvas de CDG exibem um perfil triangular quase simétrico, comportamento característico de um Capacitor Eletroquímico de Dupla Camada (EDLC) e em concordância com os resultados da Voltametria Cíclica. Observa-se em ambos os gráficos uma pequena queda de potencial no início de cada ciclo de descarga, conhecida como IR drop (queda ôhmica). Este fenômeno é uma medida direta da resistência interna do dispositivo, que inclui a resistência da solução do eletrolito, a resistência intrínseca dos materiais do eletrodo e a resistência de contato na interface eletrodo/coletor de corrente. Conforme esperado, o valor do IR drop aumentou com o aumento da densidade de corrente, pois uma corrente maior amplifica as perdas de tensão através dessa resistência fixa. Foram observados quedas de potencial de 0,05 V para a densidade de corrente 0,1 A/g e de 0,19 V para a densidade de corrente 0,5 A/g na amostra SNb2-1; de 0,10 V para a densidade de corrente 0,1 A/g e de 0,48 V para a densidade de corrente 0,5 A/g na amostra SNb2-2 e de 0,12 V para a densidade de corrente 0,1 A/g e 0,48 V para a densidade de corrente 0,5 A/g na amostra SNb2-3.

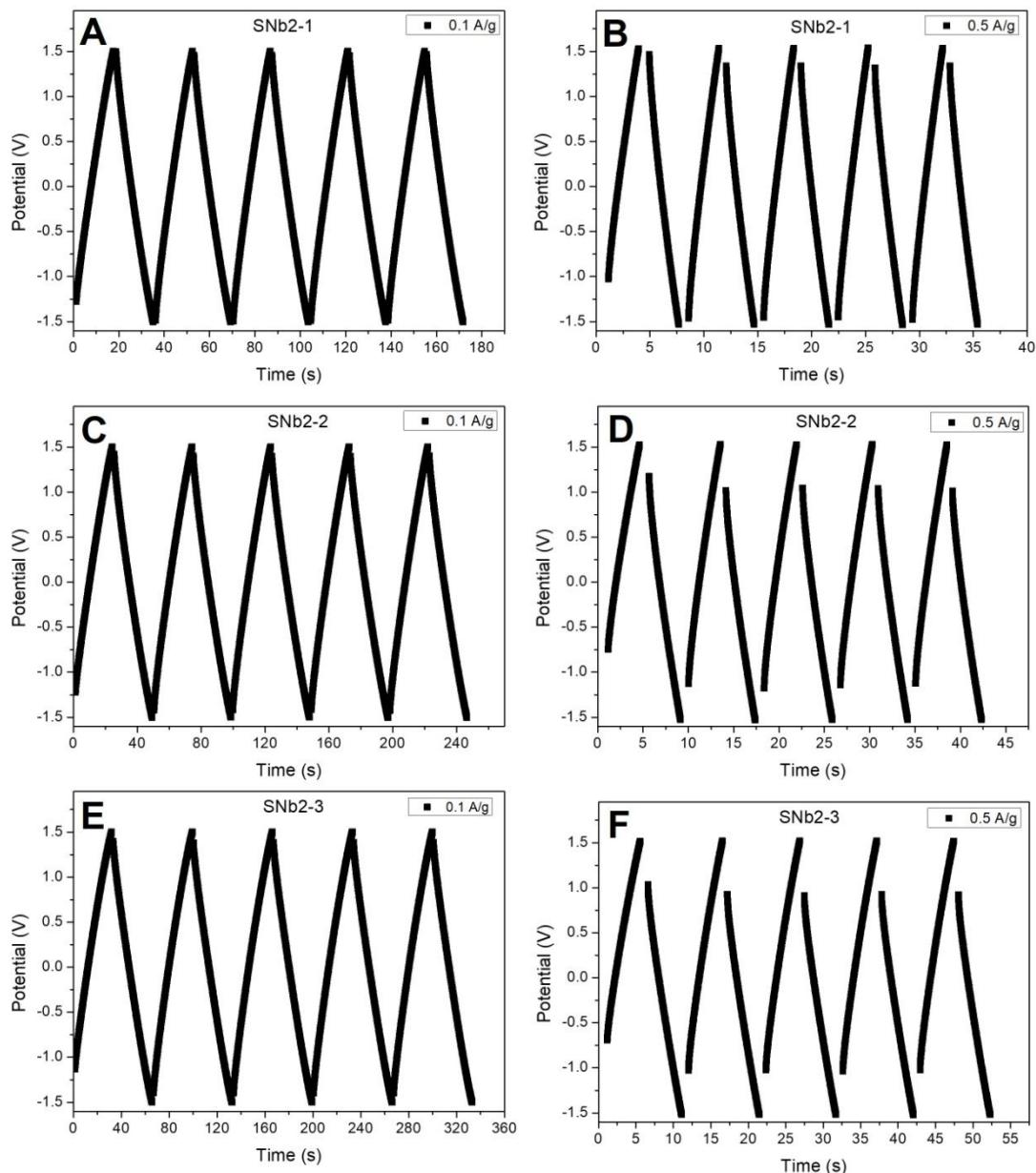


Figura 6 – Curvas de carga-descarga em diferentes densidades de corrente para os dispositivos simétricos coincell dos eletrodos: (A,B) S0-0, (C,D) SNb2-1, (E,F) SNb2-2 e (G,H) SNb2-3

Dispositivo Coincell	Massa ativa (g)	Densidade de Corrente (A/g)	Capacitância (F/g)	Densidade de Energia (W.h/kg)	Densidade de Força (W/kg)
S0-0	0,0406	0,1	1,64	0,95	287,90
		0,5	1,36	0,67	1334,69
SNb2-1	0,0389	0,1	2,16	1,32	297,14
		0,5	1,80	1,03	1437,20
SNb2-2	0,0457	0,1	2,64	1,77	291,36
		0,5	2,52	1,13	1269,89
SNb2-3	0,0437	0,1	4,46	2,58	288,54
		0,5	3,46	1,43	1220,05

Tabela 1 – Propriedades calculadas a partir da caracterização Carga-Descarga

A Tabela 1 revela que os melhores valores de capacidade e densidade de energia foram obtidos na menor densidade de corrente (0,1 A/g). Este comportamento é característico de materiais porosos, pois, em uma menor densidade de corrente, a velocidade de carga-descarga é mais longa para atingir os limites operacionais colocados, permitindo que os íons do eletrólito permeiem mais profundamente nos microporos da matriz de biocarvão, maximizando a formação da dupla camada. Por outro lado, usando uma maior densidade de corrente, o tempo é insuficiente para promover uma difusão iônica completa, limitando o armazenamento de carga às superfícies externas do material e resultando em uma capacidade aparente menor.

A análise comparativa dos compósitos demonstrou que os melhores valores de capacidade e densidade de energia foram obtidos para o compósito sintetizado com a maior quantidade de nióbio (SNb2-3). Esse aumento da capacidade de armazenamento de energia origina de um duplo mecanismo de armazenamento de carga, resultado da sinergia entre os materiais: o biocarvão fornece condutividade e porosidade para a formação da dupla camada elétrica, enquanto que o óxido de nióbio contribuiativamente para o armazenamento de carga através de mecanismos pseudocapacitivos, que armazenam elétrons dentro da estrutura do material, e não apenas em sua superfície. Este mecanismo Faradaico rápido é fundamental para o desempenho do material. Pode-se também correlacionar a melhoria das propriedades com a morfologia das nanoestruturas, como observado por MEV, pois há aumento da área de superfície específica acessível aos íons e, ao mesmo tempo, as nanoagulhas atuam como caminhos eficientes para o transporte de elétrons. O efeito sinérgico entre a matriz de biocarvão condutora e porosa e a área superficial das nanoagulhas maximiza os sítios ativos para armazenamento de carga.

4. Considerações Finais

Neste trabalho foi desenvolvido uma rota de síntese de compósitos nanoestruturados de biocarvão e óxido de nióbio a partir de resíduos de bagaço de cana-de-açúcar, submetidos à calcinação a 750 °C. A caracterização estrutural por Difração de Raios X (DRX) confirmou a formação da fase cristalina ortorrômbica do Nb₂O₅. A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelou uma morfologia em forma de agulha para as nanoestruturas de nióbio, com uma espessura fina de 20–50 nm e comprimentos que variam entre 300 e 900 nm. Eletrodos espuma de níquel foram usados como coletor de corrente, onde foram depositados uma pasta carbonácea à base do biocarvão, negro de fumo e PVDF, e assim utilizados para a preparação de dispositivos simétricos do tipo coincell. Foi utilizado o eletrólito orgânico LiPF₆ em EC/DMC. A Voltametria Cíclica demonstrou a alta estabilidade do material em uma ampla janela de tensão de -1,5 a 1,5 V e sua capacidade de armazenamento de energia, onde foi observado o formato quasi-retangular, característico dos sistemas de armazenamento de energia. Os melhores resultados obtidos para a caracterização Carga-Descarga foram do dispositivo preparado com o compósito SNb2-3, que exibiu uma capacidade de aproximadamente 4,5 F/g, uma densidade de energia de 2,6 Wh/kg e uma densidade de potência de 288 W/kg.

Referências

- DEHKHODA, A. M.; ELLIS, N.; GYENGE, E. Electrosorption on activated biochar: Effect of thermo-chemical activation treatment on the electric double layer capacitance. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 44, n. 1, p. 141–157, 2014.
- FISCHER, J.; POHLE, B.; DMITRIEVA, E.; et al. Symmetric supercapacitors with cellulose-derived carbons and Na₂SO₄ electrolytes operating in a wide temperature range. **Journal of Energy Storage**, v. 55, n. June, 2022.
- LI, J.; ZOU, Y.; XIANG, C.; et al. Osmanthus fragrans-derived N-doped porous carbon for supercapacitor applications. **Journal of Energy Storage**, v. 42, n. July, 2021.

LIU, J.; XUE, D.; LI, K. Single-crystalline nanoporous Nb₂O₅ nanotubes. **Nanoscale Research Letters**, v. 6, n. 1, p. 138, 2011. Springer Open Ltd. Disponível em: <<http://www.nanoscalereslett.com/content/6/1/138>>..

LIU, M.; YAN, C.; ZHANG, Y. Fabrication of Nb₂O₅ nanosheets for high-rate lithium ion storage applications. **Scientific Reports**, v. 5, p. 8326, 2015.

MA, J.; QIN, J.; ZHENG, S.; et al. Hierarchically Structured Nb₂O₅ Microflowers with Enhanced Capacity and Fast-Charging Capability for Flexible Planar Sodium Ion Micro-Supercapacitors. **Nano-Micro Letters**, v. 16, n. 1, 2024.

MENG, X.; GUAN, Z.; ZHAO, J.; et al. Lithium-pre-intercalated T-Nb₂O₅/graphene composite promoting pseudocapacitive performance for ultralong lifespan capacitors. **Chemical Engineering Journal**, v. 438, n. November 2021, p. 135492, 2022.

NASIT, M.; VIJ, A.; KUMARI, K.; et al. Fabrication and improvement in the electrochemical performance of a 2D g-C₃N₄-based symmetric supercapacitor device. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 1013, p. 178428, 2025.

NATARAJAN, S.; LEE, Y.-S.; ARAVINDAN, V. Biomass-Derived Carbon Materials as Prospective Electrodes for High-Energy Lithium- and Sodium-Ion Capacitors. **Chemistry – An Asian Journal**, v. 14, n. 7, p. 936–951, 2019. John Wiley & Sons, Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/asia.201900030>>..

NGIDI, N. P. D.; KOEKEMOER, A. F.; NDLELA, S. S. Recent advancement in the electrochemical performance of electrochemical capacitors based on biomass-derived porous carbon: A review. **Journal of Energy Storage**, v. 89, n. April, 2024.

POOCHAI, C.; SRIPRACHUABWONG, C.; SRISAMRARN, N.; et al. High performance coin-cell and pouch-cell supercapacitors based on nitrogen-doped reduced graphene oxide electrodes with phenylenediamine-mediated organic electrolyte. **Applied Surface Science**, v. 489, n. May, p. 989–1001, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.330>>..

QU, K.; LU, X.; HUANG, Z.; LIU, J. Synthesis strategies of optimized cathodes and mechanisms for zinc ion capacitors. **Materials Today Energy**, v. 30, p. 101188, 2022. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mtener.2022.101188>>..

RAWAT, S.; BOOBALAN, T.; KRISHNA, B. B.; et al. Biochar for Supercapacitor Application: A Comparative Study. **Chemistry - An Asian Journal**, v. 17, n. 24, 2022.

SELVARAJ, M.; BALAMOORTHY, E.; MANIVASAGAM, T. G. Biomass derived nitrogen-doped activated carbon and novel biocompatible gel electrolytes for solid-state supercapacitor applications. **Journal of Energy Storage**, v. 72, n. June, 2023.

SUN, J.; JAYAKUMAR, A.; DÍAZ-MAROTO, C. G.; et al. The role of feedstock and activation process on supercapacitor performance of lignocellulosic biochar. **Biomass and Bioenergy**, v. 184, n. March, 2024.

THOMAS, P.; LAI, C. W.; BIN JOHAN, M. R. Recent developments in biomass-derived carbon as a potential sustainable material for super-capacitor-based energy storage and environmental applications. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 140, n. November 2018, p. 54–85, 2019.

YANG, G.; PARK, S.-J. MnO₂ and biomass-derived 3D porous carbon composites electrodes for high performance supercapacitor applications. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 741, p. 360–367, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838818301099>>..

YI, T. F.; SARI, H. M. K.; LI, XUEZHONG; et al. A review of niobium oxides based nanocomposites for lithium-ion batteries, sodium-ion batteries and supercapacitors. **Nano Energy**, v. 85, n. January, p. 105955, 2021.

YU, C.; LIN, Y.; WANG, Y.; et al. Interfacial oxygen bridges engineering between Nb₂O₅ and graphene towards advanced sodium ion capacitors. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 684, n. October 2024, p. 403–411, 2025.

YU, X.; MANTHIRAM, A. Sustainable Battery Materials for Next-Generation Electrical Energy Storage. **Advanced Energy and Sustainability Research**, v. 2, n. 5, 2021.

ZHANG, M.; SONG, Z.; LIU, H.; MA, T. Biomass-derived highly porous nitrogen-doped graphene orderly supported NiMn₂O₄ nanocrystals as efficient electrode materials for asymmetric supercapacitors. **Applied Surface Science**, v. 507, n. November 2019, 2020.