



**CONFORME SOLICITAÇÃO DO AUTOR, ESTA  
PRODUÇÃO INTELECTUAL POSSUI RESTRIÇÃO  
DE ACESSO**

**CAXIAS DO SUL  
2025**

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E**  
**ENGENHARIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PROCESSOS E TECNOLOGIAS**

**Eletrodos para supercapacitores baseados em biochar  
modificado obtido a partir de fonte renovável**

Tese de Doutorado

**Andrielen Braz Vanzetto**

Caxias do Sul, 2026

**Andrielen Braz Vanzetto**

**Eletrodos para supercapacitores baseados em biochar  
modificado obtido a partir de fonte renovável**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção de grau de Doutora em Engenharia de Processos e Tecnologias, orientada pelo Prof. Dr. Ademir José Zattera e co-orientada pelo Dr. Otávio Augusto Titton Dias, com colaboração do Prof. Dr. Matheus Poletto.

Caxias do Sul, 2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Universidade de Caxias do Sul  
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

V285e Vanzetto, Andrielen Braz

Eletrodos para supercapacitores baseados em biochar modificado obtido a partir de fonte renovável [recurso eletrônico] / Andrielen Braz Vanzetto. – 2026.

Dados eletrônicos.

Tese (Doutorado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, 2026.

Orientação: Ademir José Zattera.

Coorientação: Otávio Augusto Titton Dias.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Biochar. 2. Biomassa. 3. Supercapacitores. I. Zattera, Ademir José, orient. II. Dias, Otávio Augusto Titton, coorient. III. Título.

CDU 2. ed.: 622.333

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)  
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

**Andrielen Braz Vanzetto**

## **Eletrodos para supercapacitores baseados em biochar modificado obtido a partir de fonte renovável**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção de grau de Doutora em Engenharia de Processos e Tecnologias, orientada pelo Prof. Dr. Ademir José Zattera e co-orientada pelo Dr. Otávio Augusto Tilton Dias, com colaboração do Prof. Dr. Matheus Poletto.

**TESE APROVADA EM 16 DE MARÇO DE 2026.**

Orientador: Dr. Ademir José Zattera

### **Banca Examinadora**

Prof. Dra Ivana Cesarino Leão/Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira/Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Dra. Daniele Perondi/UCSGraphene

Prof. Dr. Giovani Dambros Telli/Universidade de Caxias do Sul (UCS)

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por quem Ele é e por todo o Seu amor.

À Universidade de Caxias do Sul (UCS) e ao PGEPROTEC, meu berço de formação e porto seguro, onde encontrei um ambiente acolhedor para me desenvolver como pesquisadora. Agradeço à Coordenação e Colegiado do PGEPROTEC e a todos os professores, colegas e funcionários.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de pesquisa e pelos recursos financeiros, indispensáveis para a execução deste trabalho.

Aos meus orientadores, Dr. Ademir José Zattera e Dr. Otávio Tilton Dias, e aos colaboradores Dr. Matheus Poletto e Dra. Lídia Lazzari que concederam-me as condições necessárias para o exercício da investigação e da escrita científica com rigor e solidez.

Agradeço ao Professor Dr. Ademir José Zattera pela oportunidade concedida de viajar a Toronto (Canadá) e conhecer a *University of Toronto* (UofT) onde, recebida pelo Dr. Otávio Tilton Dias, pude aprofundar meus conhecimentos na manufatura de dispositivos de armazenamento de energia. Esta experiência, embora desafiadora, foi um importante marco em minha vida.

Aos colegas do projeto CNPq Grafeno Energia e do grupo de pesquisa do LABAT, Patrícia Aznar, Mateus Beltrami, Marielen Longhi e Francisco Teloken, pelas trocas de aprendizado e pelo suporte na execução experimental.

Aos colegas do LEBio, em especial ao Oscar de Almeida Neuwald e à Márcia Borghetti, por todo o apoio e ensinamentos.

Às técnicas Magda Matos de Borba, Elisangela Ceconello e Joicei Duarte, pela paciência, sinceridade e pelos abraços sempre acolhedores.

Aos colegas do LCOR Pesquisa e LCOR Serviços, em especial à Professora Dra. Lílian Rossa Beltrami, pelo acolhimento, ensinamentos, oportunidades e pela convivência nestes anos. Agradeço também às amigas Daniela Cecatto e Vanessa Bueno, por me ouvirem em tantos momentos; o LCOR tornou meus dias mais felizes. Sou grata a todos que fizeram e fazem parte dele.

Aos colegas da Ford Motor Company, pelo apoio, compreensão e incentivo.

Escrever esta seção é a parte mais especial da tese. Ela me leva a revisitar os meus últimos anos, as minhas lutas e as dores, mas também me permite reconhecer a compaixão e o carinho que recebi. Um doutorado não se faz sozinho e, para além de um título acadêmico, este trabalho reflete uma jornada profunda de autodesenvolvimento e crescimento.

Por isso, não posso deixar de mencionar o momento em que eu caí e pensei que não me levantaria. Algumas pessoas foram como lâmpada em meu caminho para que eu pudesse continuar, serei eternamente grata a elas. Especialmente à Lídia Lazzari, que segurou minha mão e não soltou, amiga e mentora, sua generosidade e seu apoio ficarão marcados para sempre em meu coração.

Às amigas Elisa Hoepfner, Verônica Veloso, Taiana Santos, Karytha Corrêa, Thuany Maraschin, Alice Martelli, Tatiane Scopel, Gislaine Bisoto, Clarissa Ghinzelli e Luana Gaike, que, em cada conversa, fizeram meu coração sentir-se mais leve e fortalecido. A amizade de vocês é preciosa.

À minha mãe do coração, Laurita Scapin, e à minha grande amiga e irmã em Cristo, Adriana Sperluk, pelas incontáveis orações que, pela Graça de Deus, mantiveram-me em pé.

À toda minha família, em especial ao meu pai, Ivo Vanzetto, que sempre esteve ao meu lado, incentivando-me a prosseguir com força, integridade e coragem.

Ao amor da minha vida e maior presente que recebi de Deus, meu marido Jean de Souza de Oliveira, por ter vivido cada etapa deste processo ao meu lado e à sua família, em especial a pequena Melissa, seu sorriso e seus olhinhos brilhantes fizeram tudo valer a pena. Este título também será de vocês.

Por fim, agradeço a mim mesma, por ter sonhado e persistido até o fim.

*“ [ ... ] não eu, mas a graça de Deus que está comigo.”  
1 Coríntios 15:10*

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	18
1.1 Contextualização	18
1.2 Motivação, inovação e relevância	21
<b>2 OBJETIVOS</b>	23
2.1 Objetivo Geral	23
2.2 Objetivos Específicos	23
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA</b>	24
3.1 Dispositivos de armazenamento de energia	24
3.1.1 <i>Supercapacitores</i>	24
3.1.2 <i>Parâmetros de avaliação em supercapacitores</i>	30
3.2 Biochar	32
3.2.1 <i>Biomassas</i>	33
3.2.2 <i>Casca de Arroz</i>	34
3.2.3 <i>Processos de obtenção de biochar</i>	36
3.2.4 <i>Ativação e modificação de biochar</i>	39
3.2.5 <i>Caracterização do biochar</i>	45
3.3 Eletrodos de carbono para supercapacitores	46
3.4 Estado da arte e lacunas de investigação	52
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	55
4.1 Materiais	55
4.2 Metodologia	55
4.2.1 <i>Tratamento ácido do carvão ativado comercial</i>	56
4.2.2 <i>Deposição de metais sobre o carvão ativado comercial modificado</i>	57
4.2.3 <i>Obtenção de biochar a partir da casca de arroz</i>	57
4.2.4 <i>Modificação do biochar de casca de arroz</i>	59
4.2.5 <i>Desenvolvimento dos eletrodos</i>	59
4.3 Caracterização dos carvões	61
4.4 Caracterização dos eletrodos	62

<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	69
5.1 Resultados da Fase 1	69
5.1.1 <i>Caracterização do carvão ativado comercial modificado</i>	69
5.1.2 <i>Deposição de metais</i>	74
5.2 Resultados da Fase 2	88
5.2.1 <i>Caracterização do biochar da casca de arroz - Rota 1</i>	88
5.2.2 <i>Caracterização do biochar de casca de arroz – Rota 2</i>	99
5.2.3 <i>Deposição de metais sobre o biochar de casca de arroz</i>	107
5.2.4 <i>Resultados eletroquímicos dos eletrodos de biochar de casca de arroz</i>	109
<b>6 SÍNTESE DE RESULTADOS</b>	126
<b>7 CONCLUSÕES</b>	128
<b>8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	129
<b>REFERÊNCIAS</b>	130

## LISTA DE ABREVIACOES

BET - Método de Brunauer, Emmett, Teller

CGD - Carga e descarga galvanostática

DRX - Difro de Raios-X

ECS - Eletrodo de calomelano saturado

EDLC - *Electric Double Layer Capacitor*

EDS - Espectroscopia por dispersão de energia de Raios-X

EIE - Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

FTIR - Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

MEV-FEG - Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo

COP 30 - Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanas Climáticas de 2025

ONU - Organização das Nações Unidas

PVD - *Physical Vapor Deposition*

$R_{ESR}$  - Resistência em Série Equivalente

TG - Termogravimetria

VC - Voltametria cíclica

XPS - Espectroscopia de Fóton Elétrons excitados por Raios-X

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU relacionados à tese.....	p. 22
Figura 2: Mecanismo de armazenamento de energia em supercapacitores por separação de cargas.....	p. 25
Figura 3: Diagrama de Ragone: densidade de energia versus densidade de potência de diferentes dispositivos.....	p. 26
Figura 4: Ilustração dos processos de armazenamento de carga que ocorrem em a) eletrodos capacitivos de dupla camada, b) pseudocapacitivos e c) eletrodos faradaicos.....	p. 27
Figura 5: Relação dos processos de armazenamento com a cinética de transferência de carga.....	p. 29
Figura 6: Aspecto típico das curvas de voltametria cíclica para diferentes tipos de dispositivos supercapacitores.....	p. 31
Figura 7: Microestruturas derivadas de diferentes precursores de biomassa.....	p. 34
Figura 8: Ilustração representativa do cultivar de arroz.....	p. 35
Figura 9: Diferenças estruturais do biochar obtido a diferentes temperaturas de pirólise.....	p. 37
Figura 10: Variação nas propriedades do biochar com o aumento da temperatura de pirólise.....	p. 38
Figura 11: Influência da estrutura porosa do biochar na adsorção e transporte de íons.....	p. 41
Figura 12: Percolação elétrica entre as partículas do eletrodo de carbono e o coletor de corrente.....	p. 42
Figura 13: Parâmetros significantes do processo de obtenção de biochar que afetam o desempenho dos eletrodos.....	p. 44
Figura 14: Características relacionadas a estrutura dos materiais de carbono que afetam o desempenho eletroquímico do supercapacitor.....	p. 47
Figura 15: Linha do tempo sobre o desenvolvimento de supercapacitores baseados em biomassa.....	p. 49
Figura 16: Representação esquemática do processo de <i>Magnetron Sputtering</i> .....	p. 51
Figura 17: Sistemas integrados de micro-supercapacitores.....	p. 53
Figura 18: Fluxograma das fases experimentais.....	p. 56
Figura 19: Câmara do moinho de bolas utilizado.....	p. 60

Figura 20: Aspecto físico da pasta ( <i>slurry</i> ) para formar o eletrodo e aspecto após aplicação sobre alumínio.....	p. 60
Figura 21: Representação esquemática de uma célula eletroquímica para experimentos de voltametria cíclica.....	p. 63
Figura 22: Micrografias de MEV-FEG da amostra CAc.....	p. 70
Figura 23: Micrografias de MEV-FEG da amostra CAc-AF.....	p. 70
Figura 24: Micrografias de MEV-FEG da amostras CAc-AS.....	p. 71
Figura 25: Voltamogramas cíclicos das amostras CAc, CAc-AF e CAc-AS nas taxas de varredura de 30, 50 e 100 mV.s <sup>-1</sup> em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1M.....	p. 73
Figura 26: Micrografias de MEV-FEG para CAc-AS-Co, CAc-AS-Cu e CAc-AS-Ni.....	p. 75
Figura 27: Mapas de EDS das amostras CAc-AS-Co, CAc-AS-Cu e CAc-AS-Ni.....	p. 76
Figura 28: Espectro de varredura ( <i>Survey</i> ) de XPS para as amostras CAc-AS-Co, CAc-AS-Cu e CAc-AS-Ni.....	p. 77
Figura 29: Espectros de XPS de C1s e O1s de CAc-AS-Co, CAc-AS-Cu e CAc-AS-Ni... p. 79	
Figura 30: Voltamogramas cíclicos de CAc-AS-Co, CAc-AS-Cu e CAc-AS-Ni em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1M.....	p. 81
Figura 31: Curvas de carga e descarga dos eletrodos a 10 mA.g <sup>-1</sup> .....	p. 83
Figura 32: Diagrama de Nyquist de CAc-AS-Co, CAc-AS-Cu e CAc-AS-Ni.....	p. 86
Figura 33: Micrografias de MEV-FEG de CA, CA 750, CA 850 e CA 950.....	p. 89
Figura 34: Micrografias de MEV-FEG de CA 750 AF, CA 850 AF e CA 950 AF.....	p. 90
Figura 35: Mapas de EDS de CA 950 e CA 950 AF.....	p. 92
Figura 36: Espectros de FTIR das amostras de resíduos de casca de arroz, biochar obtido a diferentes temperaturas e CA 950 após o tratamento ácido.....	p. 95
Figura 37: Difratoformas de raios-X da casca de arroz e seus biochars.....	p. 97
Figura 38: Espectros Raman do biochar de casca de arroz obtidos a diferentes temperaturas.....	p. 98
Figura 39: Micrografias de MEV-FEG para as amostras de biochar de casca de arroz antes e após tratamento com HF.....	p. 100
Figura 40: Difratoforma de raios X para as amostras de biochar de casca de arroz antes e após tratamento com HF.....	p. 101
Figura 41: Espectros Raman de CA 500 e CA500-HFv.....	p. 102
Figura 42: Curvas de TGA e DTG do biochar de casca de arroz antes e após o tratamento com HF.....	p. 104
Figura 43: Mapa de elementos e espectro de EDS de CA500.....	p. 105

Figura 44: Mapa de elementos e espectro de EDS de CA500-HFv.....	p. 106
Figura 45: Mapa de elementos e espectro de EDS de CA500-2%Ni.....	p. 108
Figura 46: Mapa de elementos e espectro EDS de CA500-Hfv-2%Ni.....	p. 109
Figura 47: Micrografias de MEV-FEG de CA500-2%Ni e CA500-HFv-2%Ni.....	p. 110
Figura 48: Voltamograma cíclico do eletrodo produzido com CA 950 em diferentes taxas de varredura em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1M .....	p. 112
Figura 49: Gráfico representativo de um ciclo de carga/descarga galvanostática de CA950 comparado com CAc.....	p. 114
Figura 50: Curvas de voltametria cíclica representativas dos eletrodos produzidos com CA500 e CA500-HFv em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1M.....	p. 115
Figura 51: Gráfico de <i>Nyquist</i> dos eletrodos produzidos com CA500 e CA500-HFv....	p. 119
Figura 52: Curvas de voltametria cíclica representativas dos eletrodos produzidos com CA500-2%Ni e CA500-HFv-2%Ni em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1M.....	p. 120
Figura 53: Gráficos de <i>Nyquist</i> dos eletrodos produzidos com CA500-2%Ni e CA500-HFv-2%Ni.....	p. 123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Preço em dólares, no ano de 2020, de diferentes materiais de carbono para eletrodos e valores de capacitância relatados na literatura.....	p. 20
Tabela 2: Parâmetros de obtenção e resultados de biochars obtidos de casca de arroz como eletrodos em supercapacitores.....	p. 43
Tabela 3: Parâmetros do processo de <i>sputtering</i> para deposição de metais sobre o carvão ativado.....	p. 57
Tabela 4: Propriedades texturais do carvão ativado comercial e tratado com ácidos fósforico e sulfúrico.....	p. 71
Tabela 5: Capacitância específica para as amostras de carvão ativado comercial tratado com ácidos a uma taxa de varredura de 100 mV/s.....	p. 74
Tabela 6: Propriedades texturais do carvão ativado comercial, tratado com ácido sulfúrico contendo metais.....	p. 75
Tabela 7: Capacitância específica para as amostras de carvão ativado contendo metais a uma taxa de varredura de 100 mV/s.....	p. 82
Tabela 8: Valores de densidade de energia (E) e densidade de potência (P) para as amostras de carvão ativado comercial modificado contendo metais.....	p. 85
Tabela 9: Ângulo de contato com a água e imagens representativas no tempo zero para cada amostra da Fase 1.....	p. 87
Tabela 10: Rendimento percentual de biochar por temperatura de pirólise.....	p. 88
Tabela 11: Propriedades texturais de CA 950 e CA 950 AF.....	p. 94
Tabela 12: Valores de intensidade das bandas D e G e relação entre elas para CA 750, CA 850 e CA 950.....	p. 99
Tabela 13: Valores de rendimento do processo de pirólise de CA500 e CA500-HFv.....	p. 99
Tabela 14: Propriedades texturais do biochar obtido pela Rota 2.....	p. 100
Tabela 15: Valores de intensidade das bandas D e G e relação entre elas.....	p. 102
Tabela 16: Propriedades texturais do biochar de casca de arroz após deposição de níquel.....	p. 111
Tabela 17: Capacitância específica obtida por voltametria cíclica da amostra CA 950 a diferentes taxas de varredura e diferença de potencial de 0,3 V.....	p. 113
Tabela 18: Densidade de energia e de potência de CA950 e CAc.....	p. 114

Tabela 19: Capacitância específica obtida por voltametria cíclica de CA500 a diferentes taxas de varredura e diferença de potencial de 1 V.....	p. 116
Tabela 20: Capacitância específica obtida por voltametria cíclica de CA500-HFv a diferentes taxas de varredura e diferença de potencial de 0,8 V.....	p. 116
Tabela 21: Resultados da aplicação do método de Dunn aos dados de VC da amostra CA-HFv (análise da varredura anódica).....	p. 117
Tabela 22: Resultados da aplicação do método de Dunn aos dados de VC da amostra CA-HFv (análise da varredura catódica).....	p. 117
Tabela 23: Capacitância específica obtida por voltametria cíclica da amostra CA500-2%Ni e CA500-HFv-2%Ni a uma taxa de varredura de 100 mV/s e diferença de potencial de 0,6 V.....	p. 121
Tabela 24: Decomposição da corrente a 100 mV/s da varredura catódica de CA500-HFv-2%Ni.....	p. 121
Tabela 25: Ângulo de contato com a água em $t = 0s$ dos eletrodos de biochar de casca de arroz, tratados e contendo metais.....	p. 124
Tabela 26: Resumo de resultados de área superficial e capacitância específicas obtidos neste trabalho .....	p. 127

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Relação de amostras e caracterização da Fase 1.....	p. 66
Quadro 2: Relação de amostras e caracterização da Fase 2, Rota 1.....	p. 67
Quadro 3: Relação de amostras e caracterização da Fase 2, Rota 2.....	p. 68

## RESUMO

O biochar é um material carbonáceo versátil e de baixo custo quando comparado a outros materiais de carbono, o qual pode ser obtido pela pirólise de diferentes biomassas, tais como resíduos agroindustriais. Dentre as diversas aplicações em que pode ser inserido, o biochar tem se mostrado promissor como componente em eletrodos para dispositivos de armazenamento de energia (baterias e supercapacitores). O objetivo deste trabalho é avaliar a potencial aplicação do biochar obtido a partir de resíduos de casca de arroz como eletrodo em supercapacitores em substituição aos tradicionais materiais de carbono atualmente empregados. Para isso, o biochar foi obtido a partir da pirólise da casca de arroz, resíduo abundante no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Os experimentos foram conduzidos em duas fases distintas. Na Fase 1, realizou-se um estudo da modificação de carvão ativado comercial por meio de tratamentos químicos com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) e deposição dos metais Cobre (Cu), Níquel (Ni) e Cobalto (Co) via *sputtering* para fins de comparação. Foram realizadas caracterizações morfológicas, químicas e estruturais por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-FEG), Espectroscopia de dispersão de energia de raios-X (EDS), Espectroscopia de Fóton Elétrons excitados por Raios-X (XPS) e isotermas de sorção e dessorção de  $N_2$ . Na Fase 2, a casca de arroz serviu como precursor para a obtenção do biochar por meio de duas rotas de processamento diferentes, visando comparar e aprimorar as propriedades superficiais do biochar de casca de arroz e a resposta eletroquímica dos eletrodos produzidos com o mesmo. Na Rota 1, foi realizada uma etapa térmica (pirólise) seguida do tratamento químico com os ácidos sulfúrico e fosfórico. As temperaturas de pirólise nesta rota foram 750, 850 e 950 °C com taxa de aquecimento de  $10^\circ C \cdot min^{-1}$ . Na Rota 2, após a primeira etapa térmica (pirólise a 500 °C e taxa de aquecimento de  $5^\circ C \cdot min^{-1}$ ), o tratamento químico com ácido fluorídrico (HF) precedeu uma etapa de ativação física com vapor a 700 °C. O biochar obtido da casca de arroz em ambas as rotas, foi caracterizado quanto à sua estrutura cristalina por meio de difração de raios-X (DRX) e Espectroscopia Raman, quanto à sua estrutura química por meio de Espectroscopia no Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e EDS e quanto à morfologia e estrutura de poros por meio de MEV-FEG e propriedades texturais via isotermas de sorção e dessorção de  $N_2$ , pelo método de Brunauer, Emmett, Teller (BET). O desenvolvimento dos eletrodos em ambas as Fases (1 e 2) foi realizado pela técnica de “*slurry*” e caracterizado quanto a sua capacitância específica, capacidade de carga e descarga e impedância, através de medidas

eletroquímicas para avaliar a viabilidade de utilização em dispositivos de armazenamento de energia. Obteve-se uma densidade de energia de 3,29 kWh/kg e potência de 9900 W/kg para o biochar da casca de arroz frente à 1,68 kWh/kg e 4942 W/kg, respectivamente, para o carvão ativado comercial. O biochar de casca de arroz tratado com ácido fluorídrico (HF) e ativado a vapor a 700 °C atingiu uma área superficial específica de 313 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> e os eletrodos com ele produzidos alcançaram valores de capacitância específica de 61,5 F.g<sup>-1</sup>, frente à 37,7 F.g<sup>-1</sup> do carvão ativado comercial tratado com ácido sulfúrico. A partir dos resultados obtidos neste estudo, foi possível concluir que a casca de arroz apresenta o potencial de substituir o carvão ativado comercial para a aplicação como eletrodo em dispositivos de armazenamento de energia, especialmente supercapacitores.

**Palavras-Chave:** biochar, biomassa, casca de arroz, eletrodos, dispositivos de armazenamento de energia, supercapacitores.

## ABSTRACT

Biochar is a versatile and low-cost carbonaceous material compared to other carbon materials, which can be obtained by pyrolysis of different biomasses, such as agro-industrial waste. Among the various applications in which it can be used, biochar has shown promise as a component in electrodes for energy storage devices (batteries and supercapacitors). The objective of this work is to evaluate the potential application of biochar obtained from rice husk waste as an electrode in supercapacitors, replacing the traditional carbon materials currently used. For this purpose, biochar was obtained from the pyrolysis of rice husk, an abundant residue in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The experiments were conducted in two distinct phases. In Phase 1, a study was carried out on the modification of commercial activated carbon through chemical treatments with sulfuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) and phosphoric acid ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) and deposition of the metals Copper (Cu), Nickel (Ni) and Cobalt (Co) via sputtering for comparison purposes. Morphological, chemical, and structural characterizations were performed using Scanning Electron Microscopy (SEM-FEG), Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), X-ray Photon-Electron Spectroscopy (XPS), and  $\text{N}_2$  sorption and desorption isotherms. In Phase 2, rice husk served as a precursor for obtaining biochar through two different processing routes, aiming to compare and improve the surface properties of rice husk biochar and the electrochemical response of the electrodes produced with it. In Route 1, a thermal step (pyrolysis) was performed followed by chemical treatment with sulfuric and phosphoric acids. The pyrolysis temperatures in this route were 750, 850, and 950 °C with a heating rate of 10 °C.min<sup>-1</sup>. In Route 2, after the first thermal stage (pyrolysis at 500 °C and a heating rate of 5 °C.min<sup>-1</sup>), chemical treatment with hydrofluoric acid (HF) preceded a physical activation stage with steam at 700 °C. The biochar obtained from rice husk in both routes was characterized in terms of its crystalline structure by X-ray diffraction (XRD) and Raman spectroscopy, its chemical structure by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and EDS, and its morphology and pore structure by SEM-FEG and textural properties via  $\text{N}_2$  sorption and desorption isotherms, using the Brunauer, Emmett, Teller (BET) method. The development of electrodes in both Phases (1 and 2) was carried out using the "slurry" technique and characterized in terms of their specific capacitance, charge and discharge capacity, and impedance, through electrochemical measurements to evaluate the

feasibility of use in energy storage devices. An energy density of 3.29 kWh/kg and a power of 9900 W/kg were obtained for rice husk biochar compared to 1.68 kWh/kg and 4942 W/kg, respectively, for commercial activated carbon. Rice husk biochar treated with hydrofluoric acid (HF) and steam-activated at 700 °C reached a surface area of 313 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, and the electrodes produced with it achieved specific capacitance values of 61.5 F.g<sup>-1</sup>, compared to 37.7 F.g<sup>-1</sup> for commercial activated carbon treated with sulfuric acid. Based on the results obtained in this study, it was possible to conclude that rice husk has the potential to replace commercial activated carbon for use as an electrode in energy storage devices, especially supercapacitors.

**Keywords:** biochar, biomass, rice husk, electrodes, energy storage devices, supercapacitors.