

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta
Dissertação será disponibilizado
somente a partir de 25/07/2027.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

UNESP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

POSMAT

Arthur Pimentel de Carvalho

A utilização de resíduos agroindustriais da cana-de-açúcar para o aproveitamento energético e aplicação em dispositivos de armazenamento de energia.

Curso de Mestrado

Rosana

2025

Arthur Pimentel de Carvalho

A utilização de resíduos agroindustriais da cana-de-açúcar para o aproveitamento energético e aplicação em dispositivos de armazenamento de energia.

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de concentração Ciência de Materiais, sob orientação do Prof. Dr. Leonardo Lataro Paim.

Rosana

2025

C331u	Carvalho, Arthur Pimentel utilização de resíduos agroindustriais da cana-de-açúcar para o aproveitamento energético e aplicação em dispositivos de armazenamento de energia / Arthur Pimentel Carvalho. -- Rosana, 2025 89 f. : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana Orientador: Leonardo Lataro Paim 1. Biochar. 2. XPS. 3. Eletrodos compósitos. 4. Ferroceno. I. Título.
-------	--

FOLHA DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ARTHUR PIMENTEL DE CARVALHO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CÂMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE.

Aos 24 dias do mês de julho do ano de 2025, às 14h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ARTHUR PIMENTEL DE CARVALHO, intitulada **A utilização de resíduos agroindustriais da cana-de-açúcar para o aproveitamento energético e aplicação em dispositivos de armazenamento de energia.**, sob orientação do Prof. Dr. Leonardo Lataro Paim. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. LEONARDO LATARO PAIM (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia / UNESP/Câmpus de Rosana, Prof. Dr. RODRIGO ALEJANDRO ABARZA MUNOZ (Participação Virtual) do(a) Universidade Federal de Uberlândia, Prof. Dr. SABIR KHAN (Participação Virtual) do(a) Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais / Universidade Federal de Pelotas. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: **APROVADO** . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. LEONARDO LATARO PAIM



Documento assinado digitalmente
LEONARDO LATARO PAIM
Data: 28/07/2025 09:20:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Resumo

O biochar tem se destacado por sua versatilidade e potencial de aplicação em energia, filtração e obtenção de materiais avançados. Este trabalho investigou o biochar produzido a partir de resíduos industriais de uma usina sucroalcooleira, com foco em suas propriedades estruturais, químicas, morfológicas, eletroquímicas e energéticas. Os materiais foram obtidos por rota termoquímica e caracterizados por análises elementares, imediatas e espectroscópicas. O resíduo sólido da caldeira (RSCB) apresentou o maior poder calorífico inferior (PCI), com 24,72 MJ/kg, além de razões atômicas H/C e O/C inferiores a 0,3, evidenciando alta aromaticidade e estabilidade do material. A análise de FTIR indicou que o uso de ferroceno não promoveu alterações estruturais significativas. Por sua vez, a espectroscopia de fotoelétrons por raios X (XPS) revelou aumento da transição π - π^* com o tratamento térmico, enquanto a espectroscopia Raman indicou maior desordem estrutural no RSCB, com razão I_D/I_G de 1,17. Imagens de MEV mostraram o surgimento de poros com o aumento da temperatura de pirólise. Nos testes eletroquímicos, o RSCB também se destacou com a maior capacitância específica, atingindo 104 F/g, superando os biochars do bagaço tratado com e sem ferroceno. Esses resultados reforçam o potencial do RSCB como material energético sustentável e como precursor de carbono grafítico para aplicações em armazenamento de energia.

Palavras-chave: Biochar. XPS, eletrodos compósitos, ferroceno, armazenamento de energia, Raman.

Abstract

Biochar has gained increasing attention due to its versatility and potential applications in energy, filtration, and the development of advanced carbon materials. This study investigated the biochar produced from industrial residues of a sugar and ethanol mill, focusing on its structural, chemical, morphological, electrochemical, and energetic properties. The materials were obtained through a thermochemical route and characterized by elemental, proximate, and spectroscopic analyses. The solid residue from the boiler (RSCB) exhibited the highest lower heating value (LHV), reaching 24.72 MJ/kg, along with H/C and O/C atomic ratios below 0.3, indicating high aromaticity and thermal stability. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) revealed no significant structural changes with the use of ferrocene. In contrast, X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) showed an increase in π - π^* transitions with thermal treatment, while Raman spectroscopy indicated a higher degree of structural disorder for RSCB, with an I_D/I_G ratio of 1.17. Scanning electron microscopy (SEM) revealed the formation of pores as the pyrolysis temperature increased. Electrochemical tests demonstrated that RSCB achieved the highest specific capacitance, reaching 104 F/g, outperforming the biochars derived from thermally treated bagasse with and without ferrocene. These results highlight the potential of RSCB as a sustainable energy material and as a precursor for graphitic carbon in energy storage applications.

Keywords: Biochar, XPS, nanomaterials, composite electrodes, ferrocene, energy storage, Raman.

Lista de Figuras

Figura 1: Contribuição do biochar para economia circular	21
Figura 2: Principais rotas termoquímicas para obtenção de biochar	22
Figura 3: Evolução das publicações científicas sobre aplicações do biochar	26
Figura 4: Comportamento eletroquímico para o teste de voltametria cíclica	34
Figura 5: Comportamento eletroquímico para ensaio de carga-descarga	35
Figura 6: Local de coleta do bagaço de cana de açúcar	38
Figura 7: Evolução do tratamento do bagaço de cana de açúcar.	39
Figura 8: Local de coleta do resíduo da caldeira de geração de vapor	40
Figura 9: Análise elementar do bagaço tratado termicamente a diferentes temperaturas e resíduo da caldeira.	46
Figura 10: Diagrama de Van Krevelen para o biochar obtido a diferentes temperaturas e resíduo da caldeira.	47
Figura 11:a) Espectros FTIR para a) bagaço de cana de açúcar b) bagaço tratado termicamente c) bagaço + ferroceno.	51
Figura 12: Espectro Raman das amostras B250, B300, B350, B450, RSCB, OG250, OG400, OG450.	54
Figura 13: Comparativo Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por Raios X (XPS) C1s e O1s das amostras B250, B300, B350 e RSCB.	57
Figura 14: Microscopia de superfície e EDS para a) B250 b) B300 c) B350 d) B450 e) RSCB f) OG 300	60
Figura 15: Poder calorífico superior, inferior e rendimento energético	63
Figura 16: Comparativo de varredura de potencial para os eletrodos B250, B300, B350, B400, B450, RSCB	66
Figura 17: Comparativo de varredura de potencial para os eletrodos OG250, OG300, OG400 e OG450.	67
Figura 18: Comparativo de capacitância específica para os B250, B300, B350, B400, B450, RSCB	69
Figura 19: Comparativo de capacitância específica para os eletrodos das amostras OG250, OG300, OG400 e OG450.	70
Figura 20: Comparativo Carga e Descarga para diferentes densidades de corrente das amostras B250, B300, B350, B400, B450, RSCB.	71
Figura 21: Comparativo Carga e Descarga para diferentes densidades de corrente das amostras OG250, OG300, OG400 e OG450.	72

Lista de Tabelas

Tabela 1: Resumo das características dos principais processos termoquímicos para obtenção de biochar.....	24
Tabela 2: Tecnologias de armazenamento de energia.....	32
Tabela 3: Análise imediata para biochar obtido a diferentes temperaturas e resíduo.	48
Tabela 4: Tabela 4: Bandas D, G e Id/Ig para amostras de biochar, bagaço/ferroceno e resíduo da caldeira.	52
Tabela 5: Composição das bandas C1s e O1s para biochar, bagaço/ferroceno e resíduo da caldeira.	55
Tabela 6: Comparação de Capacitância específica	73

Lista de Siglas

B250 – Biocarvão tratado a 250 °C
B300 – Biocarvão tratado a 300 °C
B350 – Biocarvão tratado a 350 °C
B400 – Biocarvão tratado a 400 °C
B450 – Biocarvão tratado a 450 °C
C – Carbono
CA – Carvão ativado
CF – Carbono fixo
CV – Voltametria cíclica
EDS – Espectroscopia no raio X por energia dispersiva
EDLC – Capacitor de dupla camada elétrica
FTIR – Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier
GCD – Carga e descarga galvanostática
GEE – Gases do efeito estufa
H – Hidrogênio
LSCK – Biochar ativado à base de cápsula de semente
LPCK – Biochar ativado à base de pecíolo de lótus
MEV – Microscopia eletrônica de varredura
N – Nitrogênio
NMP – N-metil-2-pirrolidona
O – Oxigênio
OG – Óxido de grafeno
OG250 – Biocarvão obtido a partir de bagaço de cana + ferroceno a 250 °C
OG300 – Biocarvão obtido a partir de bagaço de cana + ferroceno a 300 °C
OG400 – Biocarvão obtido a partir de bagaço de cana + ferroceno a 400 °C
OG450 – Biocarvão obtido a partir de bagaço de cana + ferroceno a 450 °C
PCI – Poder calorífico inferior
PVDF – Poli(fluoreto de vinilideno)
Raman – Espectroscopia Raman
RGO/AuNP – Óxido de grafeno reduzido decorado com nanopartículas de ouro
RSCB – Resíduo da caldeira de geração de vapor
S – Enxofre
SCB – Bagaço de cana-de-açúcar

SCFBA – Cinzas volantes do bagaço de cana-de-açúcar

SGNP/AuNP – Nanofibras de grafeno empilhadas decoradas com nanopartículas de ouro

SPCK – Biochar ativado à base de placa de girassol

SSE – Aço inoxidável 304

VM – Matéria volátil

XPS – Espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X

Lista de Símbolos

C – Capacitância (F)

C_s – Capacitância específica ($F \cdot g^{-1}$)

D_t – Coeficiente de difusão ($m^2 \cdot s^{-1}$)

E – Potencial (V)

Δt – Variação de tempo (s)

ΔV – Variação de potencial (V)

E_d – Densidade energética ($Wh \cdot kg^{-1}$)

E_y – Rendimento energético (%)

H/C – Razão atômica hidrogênio/carbono ($mol \cdot mol^{-1}$)

I – Ampere

l – Comprimento (m)

O/C – Razão atômica oxigênio/carbono ($mol \cdot mol^{-1}$)

ϵ_0 – Permissividade elétrica do vácuo ($8,854 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$)

ϵ_r – Permissividade relativa (adimensional)

ρ_a – Densidade aparente ($g \cdot cm^{-3}$)

y – Rendimento em massa (%)

Sumário

1 Introdução.....	13
2 Justificativas	17
2.1 Cenário nacional.....	19
2.1.1 Economia Circular e o Papel do Biochar na Indústria e Agroindústria.....	20
2.2 Biochar	21
2.3 Propriedades e características do biochar.....	24
2.4 Aplicações do biochar	25
2.5 Grafeno.....	26
2.6 Sistemas de Armazenamento de Energia	29
2.6.1 Classificação dos Sistemas de Armazenamento de Energia.....	31
2.6.2 Mecanismos de Armazenamento de Energia em Supercapacitores	32
2.7 Fundamentos de Eletroquímica Aplicados ao Armazenamento de Energia.....	33
3 Objetivos gerais.....	37
3.1 Objetivos específicos.....	37
4 Metodologia	38
4.1 Obtenção e preparação do bagaço de cana de açúcar	38
4.2 Obtenção do biochar a partir do bagaço de cana de açúcar	39
4.3 Obtenção e preparação do resíduo da caldeira de geração de vapor	40
4.4 Síntese de óxido de grafeno (OG)	41
4.5 Caracterização do biochar	41
4.6 Estudos eletroquímicos.....	43
5. Resultados e discussão	45
5.1 Análise elementar	45
5.2 Análise imediata	47
5.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	49
5.4 Espectro Raman.....	52
5.5 Espectroscopia de fotoelétrons de raios-X (XPS)	55
5.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	58
5.5 Poder calorífico	62
5.6 Resultados eletroquímicos.....	64
5.6.1 Voltametria cíclica	64
5.6.2 Carga e Descarga.....	70
6 Conclusão	74
7 Referências	77

1 Introdução

Com a crescente necessidade de desvincular a dependência energética de fontes fósseis por razões econômicas e ambientais, a exploração de recursos renováveis tem ganhado destaque nas esferas política, acadêmica e de desenvolvimento sustentável (1,2,3). Assim, a energia renovável, torna-se fundamental para atender às crescentes demandas energéticas e mitigar as mudanças climáticas (4).

Este panorama global, marcado pelo aumento da população e pela urbanização acelerada, resulta em uma pressão sem precedentes sobre os sistemas energéticos e os recursos naturais, exigindo uma transformação nos paradigmas de consumo e produção (5).

Diante da necessidade de mitigar os impactos das mudanças climáticas, juntamente com a imprescindibilidade de cumprir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), meta adotada pelos membros da Organização das Nações Unidas (ONU), visando atender às novas agendas climáticas, passou-se a uma busca incessante por alternativas que possam reduzir a dependência de combustíveis fósseis (6). Essa busca se reflete em iniciativas que promovem a economia circular, onde os resíduos são vistos como recursos, e na valorização de materiais que não apenas evitam a emissão de GEE, mas que também possuem propriedades que favorecem a eficiência energética e a durabilidade.

Assim, além da procura por novas fontes de energia que não emitam GEE, a investigação de materiais não provenientes de fontes fósseis, que contribuam para propostas sustentáveis e sejam viáveis economicamente, tem se intensificado, destacando-se como uma estratégia essencial para um futuro mais sustentável e equilibrado (7).

Nesse sentido, a transição energética representa um processo crucial para essa transformação, onde se busca mover de uma matriz energética predominantemente fóssil para uma baseada em fontes renováveis e sustentáveis (8). Essa transição não apenas implica na substituição de combustíveis fósseis por energias limpas, como a solar, eólica, hidrelétrica e biomassa, mas também envolve a modernização das infraestruturas existentes e a implementação de tecnologias inovadoras que maximizem a eficiência energética, integrem sistemas descentralizados de geração. Logo, a diversificação da matriz energética é uma estratégia vital, pois aumenta a segurança energética ao reduzir a vulnerabilidade a flutuações de preços e interrupções no fornecimento de combustíveis fósseis (9).

Assim, a crescente demanda por fontes de energia sustentáveis tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de soluções que integrem a geração de energia com novos conceitos e tecnologias que apoiem as propostas ambientais contemporâneas, como, a exemplo, a utilização dos chamados materiais verdes que, além de possuírem um potencial significativo para a redução da pegada de carbono, estes também contribuem para a economia circular ao possibilitar a valorização de resíduos e a utilização de recursos renováveis em suas composições, promovendo um ciclo produtivo mais sustentável e eficiente.

Nesse contexto, os materiais verdes são definidos como aqueles que são projetados e desenvolvidos com o objetivo de minimizar o impacto ambiental durante todo o seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas virgens até a produção, uso e descarte. Esses materiais são frequentemente originados de fontes renováveis, como biomassa, resíduos agrícolas e florestais, ou são compostos por materiais reciclados, contribuindo assim para a economia circular (10).

Além de serem sustentáveis, os materiais verdes são projetados para serem não tóxicos, energeticamente eficientes e biodegradáveis, o que os torna uma alternativa viável e responsável em relação aos materiais convencionais, que geralmente dependem de recursos não renováveis e podem resultar em emissões significativas de gases de efeito estufa durante sua produção. Exemplos de materiais verdes incluem biocompósitos, biopolímeros e biochar, que não apenas ajudam a reduzir a pegada de carbono, mas também promovem a valorização de resíduos e a utilização sustentável de recursos naturais, alinhando-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável e à preservação do meio ambiente (11,12).

Como muitos desses materiais têm sua origem em resíduos de processos agroindustriais, sua utilização na fabricação de novos produtos permite fechar o ciclo da economia circular, que desempenha um papel crucial na otimização da utilização e valorização dos resíduos provenientes do setor agroindustrial. Ao transformar resíduos em novos materiais, essa abordagem não apenas minimiza o desperdício, mas também reduz a necessidade de extração de recursos virgens, contribuindo para a preservação ambiental e a eficiência dos processos produtivos. Além disso, essa prática promove uma gestão mais responsável dos recursos, incentivando a inovação e a sustentabilidade nas cadeias de suprimento, o que resulta em benefícios econômicos e ecológicos significativos (13,14).

A adoção desta abordagem busca atenuar os efeitos de poluição e impactos adversos, por meio da implementação de uma variedade de processos que permitem a reutilização dos mencionados resíduos. A economia circular catalisa a formação de cadeias de valor

sustentáveis, reduzindo a geração de resíduos e fomentando a colaboração e inovação entre setores distintos (15,16).

Dessa maneira, os resíduos oriundos do setor agroindustrial podem ser transformados em matérias-primas utilizáveis em diversas aplicações, tais como fertilizantes orgânicos, biogás ou compostos destinados à indústria farmacêutica e cosmética. Assim, essa abordagem robustece os pilares da sustentabilidade ambiental, do progresso econômico e da conservação dos recursos naturais.

Dentre os materiais verdes, destaca-se o biochar, esse material exibe propriedades distintas que o tornam especialmente atrativo para aplicações no contexto do desenvolvimento energético sustentável (17). Esse material pode ser obtido por diversos processos termoquímicos, mas tem a pirólise como principal rota de obtenção e apresenta uma vasta gama de aplicações devido às suas propriedades físico-químicas, sendo possível utilizá-lo como combustível renovável em processos de geração de energia, substituindo os combustíveis fósseis e minimizando as emissões de carbono; também como emenda orgânica no solo, melhorando suas propriedades de fertilidade e promovendo a retenção de nutrientes, o que contribui para a prática da agricultura sustentável; adsorção de metais; complemento para construção civil dentre outras. Assim, a utilização do biochar no contexto do desenvolvimento energético não apenas propicia a redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também viabiliza a utilização sustentável dos recursos (18).

Por meio dessa abordagem, é possível avançar em direção a uma matriz energética mais limpa e sustentável, com implicações positivas para a preservação do meio ambiente e a mitigação das mudanças climáticas (19). Logo, a integração do desenvolvimento energético com a utilização de materiais verdes emerge como uma estratégia promissora para a consecução da sustentabilidade energética e ambiental em âmbito global.

Outra abordagem especialmente interessante que pode contribuir com o processo de transição energética e para a flexibilidade do sistema elétrico, sendo uma ferramenta fundamental para possibilitar o ajuste entre oferta e demanda do SIN (Sistema Interligado Nacional) que tende a sofrer desajustes com a de inserção da carga oriunda das fontes renováveis, é a utilização de integração de sistemas de armazenamento de energia (20,21).

Dessa maneira, os sistemas de armazenamento de energia permitem o aproveitamento do excedente não utilizado, contribuindo para a redução do desperdício e para o aumento da participação de energias renováveis. Além disso, a implementação desses sistemas pode estimular a geração distribuída, garantindo o fornecimento para sistemas elétricos isolados e melhorando o autoconsumo de geradores distribuídos que estão conectados à rede (22). Os

sistemas de armazenamento também desempenham um papel fundamental ao aliviar a congestão na rede, suavizando as flutuações de frequência e voltagem, o que é crucial para assegurar a confiabilidade e segurança do sistema elétrico.

6 Conclusão

A partir dos resultados supracitados, torna-se possível concluir algumas considerações frente aos resultados obtidos. Em primeiro momento, conclui-se que para um tempo de residência de duas horas para diferentes temperaturas, o bagaço de cana resulta em um material rico em carbono indicando uma estrutura aromática superior a biomassa *in natura* conforme a razão HC. Conforme a temperatura de tratamento aumentava houve uma variação dos poderes caloríficos superiores e inferiores, sendo o bagaço de cana tratado a 300 °C a amostra que apresentou o melhor resultado energético dentre as amostras tratadas termicamente, contudo, o maior PCI obtido foi para o resíduo da caldeira coletado *in loco*, este apresentou um PCI de 24,72 MJ/kg enquanto o B300 apresentou um PCI de 21,58 MJ/kg. Do aspecto físico, a maior densidade aparente também foi apresentada pelo bagaço tratado a 300 °C sendo as amostras subsequentes apresentaram uma redução na densidade aparente, fato que já era esperado devido à degradação térmica mais acentuada conforme o aumento da temperatura.

A análise elementar, permitiu determinar a composição percentual de cada uma das amostras estudadas. A partir dela foi possível verificar que com o aumento da temperatura de tratamento, houve o aumento da quantidade de carbono presente na amostra sendo que o maior percentual obtido foi para a mostra B450 que apresentou um percentual em massa de 70,88% de carbono em sua composição, mostrando que as temperaturas utilizadas não comprometeram a matriz polimérica. Esse fato serve como forte indicativo da possibilidade de utilização desse material como substituto sustentável frente a outros materiais à base de carbono.

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) do bagaço de cana *in natura* e tratado termicamente bem como do resíduo obtido permitiu identificar as principais fases da composição do bagaço de cana, sendo estes a lignina, celulose e hemicelulose e alteração estrutural provinda do tratamento térmico. Conforme o bagaço de cana foi tratado com temperaturas maiores, notou-se a redução dos picos referentes a sua estrutura interna, indicando a degradação térmica de cada uma das fases, sendo que os picos menos afetados eram referentes a lignina que apresenta maior resistência térmica quando comparada com as demais fases (celulose e hemicelulose). Quando bagaço de cana é comparado com o resíduo obtido, nota-se que, para o resíduo, não há a presença de praticamente nenhuma das fases e dos grupos funcionais indicados no bagaço tratado. Isso se deve às condições de operação que resultam nesse resíduo. Como este é obtido após a queima do bagaço na caldeira,

a temperatura utilizada é bem mais elevada e o tempo de residência é diferente do utilizado em bancada. Por fim, o FTIR permitiu verificar que o tratamento térmico não resultou na formação de novos grupos funcionais e na alteração estrutural do material.

A espectroscopia Raman permitiu verificar as bandas D e G características de materiais a base de carbono. Para as amostras da série B, foi observado uma desordem moderada enquanto para a série OG observou-se um leve aumento no grau de desordem, conforme evidenciado pela razão I_d/I_g . Por fim o resíduo da caldeira apresentou o maior grau de desordem dentre as amostras, podendo indicar uma área superficial maior do que das outras amostras estudadas.

Complementarmente, a análise por XPS revelou uma progressiva desoxigenação das amostras tratadas, acompanhada pela intensificação das ligações C=C e aumento da contribuição aromática nas superfícies dos biochars. As amostras tratadas a 300 e 350 °C apresentaram maior intensidade do satélite $\pi-\pi^*$, sugerindo aumento da aromaticidade, enquanto o RSCB demonstrou picos característicos de carbono grafítico.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) ilustrou a condição da superfície do biochar obtido em diferentes temperaturas. Na micrografia de superfície foi possível verificar a degradação da estrutura do material conforme o aumento da temperatura, e durante esse processo, foi possível verificar a alteração da sua superfície. Com o aumento da temperatura, houve o surgimento de poros e da estrutura interna do bagaço de cana, apresentando um aspecto ramificado e tubular, característico da estrutura de plantas, além disso, para o B400/450 e RSCB a estrutura interna passou a ser bem evidente, com aspecto laminar e poros significativamente grandes. Notou-se também um aspecto mais quebradiço e irregular, característico de estruturas semelhantes ao carvão. Por fim, a energia dispersiva de raios-x (EDS) permitiu uma análise quantitativa da composição do biochar e do resíduo. Assim como evidenciado pela análise elementar, o EDS ilustrou a maior quantidade de carbono e outros elementos característicos como Manganês, Ferro, Cálcio e Fósforo. Além das informações de composição e morfologia, a evidência da presença de poros também serve como um novo reforço da possibilidade de utilização desse material para fins tecnológicos como sensores e sistemas de armazenamento de energia.

Do ponto de vista eletroquímico, os ensaios de voltametria cíclica e carga/descarga galvanostática revelaram comportamento típico de capacitância de dupla camada (EDLC) para a maioria das amostras, com exceção das amostras tratadas a baixa temperatura, que apresentaram contribuições pseudocapacitivas associadas a grupos oxigenados residuais. A amostra RSCB apresentou a maior capacitância específica ($\sim 104 \text{ F g}^{-1}$), atribuída à sua elevada

porosidade e grau de grafitação, confirmados por Raman e XPS. A série OG demonstrou a otimização dos resultados apenas a partir de 400 °C, com melhora discreta na capacitância, enquanto OG250 e OG300 mantiveram desempenho similar às amostras da série B, devido à estabilidade térmica do ferroceno abaixo dessa faixa, contudo, a adição de ferroceno proporcionou a redução do tempo de tratamento térmico, evidenciando a otimização do processo e da atuação do ferroceno como catalisador.

Diante das considerações expostas, os resultados obtidos permitiram validar o resíduo da caldeira de geração de vapor como um material promissor para aplicações em diferentes áreas como armazenamento de energia e sequestro de carbono. Características estas que conferem maior valor agregado a um subproduto antes não aproveitado, contribuindo assim para a otimização da economia circular frente a cadeia produtiva do bagaço de cana de açúcar em uma usina sucroenergética.

7 Referências

- [1] GALLO, A. B. et al. Energy storage in the energy transition context: A technology review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 800–822, nov. 2016.
- [2] GRODZICKI, T.; JANKIEWICZ, M. The impact of renewable energy and urbanization on CO₂ emissions in Europe – Spatio-temporal approach. **Environmental Development**, v. 44, p. 100755, dez. 2022.
- [3] HART, P. Exploring Complexities of Political Ecology in the Research and Practice of Environmental Education. **Australian Journal of Environmental Education**, v. 40, n. 3, p. 390–416, 23 jun. 2024.
- [4] OLABI, A. G.; ABDELKAREEM, M. A. Renewable energy and climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 158, p. 112111, abr. 2022.
- [5] LAWRENCE, A. Energy decentralization in South Africa: Why past failure points to future success. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, p. 109659, mar. 2020.
- [6] KUMAR, A. et al. Impact of COVID-19 on greenhouse gases emissions: A critical review. **Science of The Total Environment**, v. 806, p. 150349, fev. 2022.
- [7] BALALI, A. et al. Multi-Criteria Ranking of Green Materials According to the Goals of Sustainable Development. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9482, 14 nov. 2020.
- [8] KOVAČ, A.; PARANOS, M.; MARCIUŠ, D. Hydrogen in energy transition: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 16, p. 10016–10035, mar. 2021.
- [9] VANEGAS CANTARERO, M. M. Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: A roadmap to accelerate the energy transition in developing countries. **Energy Research & Social Science**, v. 70, p. 101716, dez. 2020.
- [10] BI, M. et al. Natural fibers as sustainable and renewable materials for green sample preparation. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 180, p. 117894, nov. 2024.

- [11] NANDY, S.; FORTUNATO, E.; MARTINS, R. Green economy and waste management: An inevitable plan for materials science. **Progress in Natural Science: Materials International**, v. 32, n. 1, p. 1–9, fev. 2022.
- [12] LI, W. et al. Biodegradable Materials and Green Processing for Green Electronics. **Advanced Materials**, v. 32, n. 33, 25 ago. 2020.
- [13] SENTHILKUMAR, K. et al. Agro-Industrial Waste Valorization to Energy and Value Added Products for Environmental Sustainability. Em: [s.l: s.n.]. p. 1–9.
- [14] HAQUE, F.; FAN, C.; LEE, Y.-Y. From waste to value: Addressing the relevance of waste recovery to agricultural sector in line with circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 415, p. 137873, 2023.
- [15] JAIN, A. et al. Bioenergy and bio-products from bio-waste and its associated modern circular economy: Current research trends, challenges, and future outlooks. **Fuel**, v. 307, p. 121859, jan. 2022.
- [16] SONU et al. Agro-waste to sustainable energy: A green strategy of converting agricultural waste to nano-enabled energy applications. **Science of The Total Environment**, v. 875, p. 162667, jun. 2023.
- [17] LIU, W.-J.; JIANG, H.; YU, H.-Q. Emerging applications of biochar-based materials for energy storage and conversion. **Energy Environ. Sci**, v. 12, p. 1751, 2019.
- [18] LEHMANN, J. et al. Biochar in climate change mitigation. **Nature Geoscience**, v. 14, n. 12, p. 883–892, 2 dez. 2021.
- [19] YU, K. et al. Insight to defects regulation on sugarcane waste-derived hard carbon anode for sodium-ion batteries. **Journal of Energy Chemistry**, v. 55, p. 499–508, abr. 2021.
- [20] LUND, P. D. et al. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 785–807, maio 2015.
- [21] KALAIR, A. et al. Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables. **Energy Storage**, v. 3, n. 1, 4 fev. 2021.
- [22] JAFARI, M.; BOTTERUD, A.; SAKTI, A. Decarbonizing power systems: A critical review of the role of energy storage. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 158, p. 112077, abr. 2022.

- [23] WOLNIAK, R. et al. Business Models Used in Smart Cities—Theoretical Approach with Examples of Smart Cities. **Smart Cities**, v. 7, n. 4, p. 1626–1669, 1 jul. 2024.
- [24] TIOSSI, F. M.; SIMON, A. T. ECONOMIA CIRCULAR: SUAS CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DA SUSTENTABILIDADE / CIRCULAR ECONOMY: YOUR CONTRIBUTIONS TO THE DEVELOPMENT OF SUSTAINABILITY. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 11912–11927, 2021.
- [25] YU, X.; MANTHIRAM, A. Sustainable Battery Materials for Next-Generation Electrical Energy Storage. **Advanced Energy and Sustainability Research**, v. 2, n. 5, 8 maio 2021.
- [26] DE SOUZA, D. F. et al. Efficiency, quality, and environmental impacts: A comparative study of residential artificial lighting. **Energy Reports**, v. 5, p. 409–424, nov. 2019.
- [27] P, A. et al. A review on graphene / graphene oxide supported electrodes for microbial fuel cell applications: Challenges and prospects. **Chemosphere**, v. 296, p. 133983, jun. 2022.
- [28] GE, L. et al. Review on the preparation of high value-added carbon materials from biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 168, p. 165–2370, 2022.
- [29] WU, Y. et al. Recent progress in Biomass-derived nanoelectrocatalysts for the sustainable energy development. **Fuel**, v. 323, p. 124349, set. 2022.
- [30] OMRAN, B. A.; BAEK, K.-H. Valorization of agro-industrial biowaste to green nanomaterials for wastewater treatment: Approaching green chemistry and circular economy principles. **Journal of Environmental Management**, v. 311, p. 114806, 2022.
- [31] JOSÉ MARTINEZ-BURGOS, W. et al. Agro-industrial wastewater in a circular economy: Characteristics, impacts and applications for bioenergy and biochemicals. **Bioresource Technology**, v. 341, p. 125795, 2021.
- [32] PRADIPRAO KHEDULKAR, A. et al. Agricultural waste to real worth biochar as a sustainable material for supercapacitor. **Science of the Total Environment**, v. 869, p. 161441, 2023.

- [33] ROBLEDO-ORTÍZ, J. R. et al. Valorization of Sugarcane Straw for the Development of Sustainable Biopolymer-Based Composites. **Polymers**, v. 13, n. 19, p. 3335, 29 set. 2021.
- [34] ALVES, L. Q. et al. DESEMPENHO DA PRODUÇÃO DA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR NOS PRINCIPAIS ESTADOS PRODUTORES. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15, n. 2, p. 303–317, 13 out. 2021.
- [35] AYODELE, B. V.; ALSAFFAR, M. A.; MUSTAPA, S. I. An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first- and second-generation sugar-based feedstocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 245, p. 118857, fev. 2020.
- [36] HAGHIGHATJOU, M.; SHIRVANI, M. Sugarcane Bagasse Biochar: Preparation, Characterization, and Its Effects on Soil Properties and Zinc Sorption-desorption. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 10, p. 1391–1405, 30 maio 2020.
- [37] SAMUEL OLUGBENGA, O. et al. Biomass-derived biochar in wastewater treatment- a circular economy approach. **Waste Management Bulletin**, v. 1, n. 4, p. 1–14, mar. 2024.
- [38] CARVALHO, J. et al. Life Cycle Assessment (LCA) of Biochar Production from a Circular Economy Perspective. **Processes**, v. 10, n. 12, p. 2684, 13 dez. 2022.
- [39] MELO, V. M. E; FERREIRA, G. F.; FREGOLENTE, L. V. Sustainable catalysts for biodiesel production: The potential of CaO supported on sugarcane bagasse biochar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 189, p. 114042, jan. 2024.
- [40] CHI, N. T. L. et al. A review on biochar production techniques and biochar based catalyst for biofuel production from algae. **Fuel**, v. 287, p. 119411, mar. 2021.
- [41] ADENIYI, A. G. et al. Metal oxide rich char from muffle furnace and retort heated reactor treated cow bone. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 8, p. 100485, 2022.
- [42] CHA, J. S. et al. Production and utilization of biochar: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 40, p. 1–15, ago. 2016.
- [43] IWUOZOR, K. O. et al. A Review on the thermochemical conversion of sugarcane bagasse into biochar. **Cleaner Materials**, v. 6, p. 100162, dez. 2022.

- [44] YAASHIKAA, P. R. et al. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. **Biotechnology Reports**, v. 28, p. e00570, dez. 2020.
- [45] ENAIME, G. et al. Biochar for Wastewater Treatment—Conversion Technologies and Applications. **Applied Sciences**, v. 10, n. 10, p. 3492, 18 maio 2020.
- [46] MANATURA, K. Inert torrefaction of sugarcane bagasse to improve its fuel properties. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 19, p. 100623, jun. 2020.
- [47] QU, Y. et al. Efficient toluene adsorption/desorption on biochar derived from in situ acid-treated sugarcane bagasse. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 44, p. 62616–62627, 1 nov. 2021.
- [48] SAIKIA, B. K. et al. A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials. **Fuel**, v. 282, p. 118796, dez. 2020.
- [49] IWUOZOR, K. O. et al. A Review on the thermochemical conversion of sugarcane bagasse into biochar. **Cleaner Materials**, v. 6, p. 100162, dez. 2022.
- [50] ZHU, Z.; XU, Z. The rational design of biomass-derived carbon materials towards next-generation energy storage: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, p. 110308, dez. 2020.
- [51] GAO, M. et al. Hierarchically porous biochar for supercapacitor and electrochemical H₂O₂ production. **Chemical Engineering Journal**, v. 402, p. 126171, dez. 2020.
- [52] WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1002–1022, ago. 2019.
- [53] CHA, J. S. et al. Mecanismo de ativação física. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 40, p. 1–15, ago. 2016.
- [54] SAAVEDRA RIOS, C. DEL M. et al. Biochars from various biomass types as precursors for hard carbon anodes in sodium-ion batteries. **Biomass and Bioenergy**, v. 117, p. 32–37, out. 2018.
- [55] LI, X. et al. A critical review on the application and recent developments of post-modified biochar in supercapacitors. **Journal of Cleaner Production**, v. 310, p. 127428, 2021.

- [56] HIDALGO, P. et al. Synthesis of carbon nanotubes using biochar as precursor material under microwave irradiation. **Journal of Environmental Management**, v. 244, p. 83–91, ago. 2019.
- [57] CHAVALI, K. S. et al. Graphene-based intumescent flame retardant on cotton fabric. **Journal of Materials Science**, v. 55, n. 29, p. 14197–14210, 8 out. 2020.
- [58] PANDEY, S. et al. Graphene nanosheets derived from plastic waste for the application of DSSCs and supercapacitors. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 3916, 16 fev. 2021.
- [59] SINGH, S. B.; HASKIN, N.; DASTGHEIB, S. A. Coal-based graphene oxide-like materials: A comprehensive review. **Carbon**, v. 215, p. 118447, nov. 2023.
- [60] TORRES, F. G. et al. Sustainable synthesis, reduction and applications of graphene obtained from renewable resources. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 29, p. e00310, set. 2021.
- [61] ASIF, F. C.; SAHA, G. C. Graphene-like Carbon Structure Synthesis from Biomass Pyrolysis: A Critical Review on Feedstock–Process–Properties Relationship. **C**, v. 9, n. 1, p. 31, 11 mar. 2023.
- [62] TAJ, A. et al. Effect of Nano-Filler Aluminum Oxide and Graphene on Flammability Properties of Kenaf Epoxy Composites. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series D**, v. 104, n. 1, p. 143–154, 29 jun. 2023.
- [63] RAZAQ, A. et al. Review on Graphene-, Graphene Oxide-, Reduced Graphene Oxide-Based Flexible Composites: From Fabrication to Applications. **Materials**, v. 15, n. 3, p. 1012, 28 jan. 2022.
- [64] YU, W. et al. Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide: a review. **RSC Advances**, v. 10, n. 26, p. 15328–15345, 2020.
- [65] THANGARAJ, B. et al. Synthesis of Graphene Oxide from Sugarcane Dry Leaves by Two-Stage Pyrolysis. **Molecules**, v. 28, n. 8, p. 3329, 10 abr. 2023.
- [66] MAHMOUDI, E. et al. Distinguishing characteristics and usability of graphene oxide based on different sources of graphite feedstock. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 542, p. 429–440, abr. 2019.
- [67] KEBEDE, A. A. et al. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 159, p. 112213, maio 2022.

- [68] ABDALLA, A. N. et al. Integration of energy storage system and renewable energy sources based on artificial intelligence: An overview. **Journal of Energy Storage**, v. 40, p. 102811, ago. 2021.
- [69] NOORI, A. et al. Towards establishing standard performance metrics for batteries, supercapacitors and beyond. **Chemical Society Reviews**, v. 48, n. 5, p. 1272–1341, 2019.
- [70] ATTIA, S. Y. et al. Supercapacitor electrode materials: addressing challenges in mechanism and charge storage. **Reviews in Inorganic Chemistry**, v. 42, n. 1, p. 53–88, 28 mar. 2022.
- [71] KUMAR, R. et al. An overview of recent progress in nanostructured carbon-based supercapacitor electrodes: From zero to bi-dimensional materials. **Carbon**, v. 193, p. 298–338, jun. 2022.
- [72] YADLAPALLI, R. T. et al. Super capacitors for energy storage: Progress, applications and challenges. **Journal of Energy Storage**, v. 49, p. 104194, maio 2022.
- [73] YADLAPALLI, R. T. et al. Super capacitors for energy storage: Progress, applications and challenges. **Journal of Energy Storage**, v. 49, p. 104194, maio 2022.
- [74] KUMAR, S.; USMAN, A.; RAJPUROHIT, B. S. Battery charging topology, infrastructure, and standards for electric vehicle applications: A comprehensive review. **IET Energy Systems Integration**, v. 3, n. 4, p. 381–396, 11 dez. 2021.
- [75] EROĞLU, F.; KURTOĞLU, M.; VURAL, A. M. Bidirectional DC–DC converter based multilevel battery storage systems for electric vehicle and large-scale grid applications: A critical review considering different topologies, state-of-charge balancing and future trends. **IET Renewable Power Generation**, v. 15, n. 5, p. 915–938, 23 abr. 2021.
- [76] LEMIAN, D.; BODE, F. Battery-Supercapacitor Energy Storage Systems for Electrical Vehicles: A Review. **Energies**, v. 15, n. 15, p. 5683, 5 ago. 2022.
- [77] GONZÁLEZ, A. et al. Review on supercapacitors: Technologies and materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1189–1206, maio 2016.
- [78] Chemistry and Mechanism of One-Step Formation of Graphene from Agrowaste. **Letters in Applied NanoBioScience**, v. 9, n. 3, p. 1389–1394, 7 jul. 2020.

- [79] FAN, M. et al. In situ characterization of functional groups of biochar in pyrolysis of cellulose. **Science of The Total Environment**, v. 799, p. 149354, dez. 2021.
- [80] WEI, B. et al. Fabrication of manganese oxide/three-dimensional reduced graphene oxide composites as the supercapacitors by a reverse microemulsion method. **Carbon**, v. 85, p. 249–260, abr. 2015.
- [81] LENG, L. et al. ref van krev. **Science of The Total Environment**, v. 647, p. 210–222, jan. 2019.
- [82] SINGH, S.; CHAKRABORTY, J. P.; MONDAL, M. K. Torrefaction of woody biomass (*Acacia nilotica*): Investigation of fuel and flow properties to study its suitability as a good quality solid fuel. **Renewable Energy**, v. 153, p. 711–724, jun. 2020.
- [83] SONG, F. et al. Spectroscopic analyses combined with Gaussian and Coats-Redfern models to investigate the characteristics and pyrolysis kinetics of sugarcane residue-derived biochars. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117855, nov. 2019.
- [84] SCHIMMELPFENNIG, S.; GLASER, B. One Step Forward toward Characterization: Some Important Material Properties to Distinguish Biochars. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 4, p. 1001–1013, jul. 2012.
- [85] WIEDEMEIER, D. B. et al. aromaticidade do biocarvão. **Organic Geochemistry**, v. 78, p. 135–143, jan. 2015.
- [86] WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1002–1022, ago. 2019.
- [87] FERNANDES, J. D. et al. Thermal treatment of poultry litter: Part I. Characterization by immediate analysis and gravimetric yield. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 9, p. 633–639, set. 2022.
- [88] JEONG, C. Y.; DODLA, S. K.; WANG, J. J. Fundamental and molecular composition characteristics of biochars produced from sugarcane and rice crop residues and by-products. **Chemosphere**, v. 142, p. 4–13, jan. 2016.
- [89] SUWANREE, S. et al. Engineered biochar from sugarcane leaves with slow phosphorus release kinetics. **Biomass and Bioenergy**, v. 156, p. 106304, jan. 2022.

- [90] SHEN, Z. et al. Effect of production temperature on lead removal mechanisms by rice straw biochars. **Science of The Total Environment**, v. 655, p. 751–758, mar. 2019.
- [91] VEIGA, P. A. DA S. et al. Upgrading from batch to continuous flow process for the pyrolysis of sugarcane bagasse: Structural characterization of the biochars produced. **Journal of Environmental Management**, v. 285, p. 112145, maio 2021.
- [92] EJAZ, U. et al. Cellulose extraction from methyltriethylammonium chloride pretreated sugarcane bagasse and its application. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 165, p. 11–17, dez. 2020.
- [93] SUWANREE, S. et al. Engineered biochar from sugarcane leaves with slow phosphorus release kinetics. **Biomass and Bioenergy**, v. 156, p. 106304, jan. 2022.
- [94] MELESSE, G. T.; HONE, F. G.; MEKONNEN, M. A. Extraction of Cellulose from Sugarcane Bagasse Optimization and Characterization. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2022, p. 1–10, 10 out. 2022.
- [95] YADAV, A. L. et al. An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplementary cementitious material. **Journal of Cleaner Production**, v. 245, p. 118854, fev. 2020.
- [96] IWUOZOR, K. O. et al. Effect of Salt Modification on Biochar Obtained from the Thermochemical Conversion of Sugarcane Bagasse. **Sugar Tech**, v. 25, n. 1, p. 223–233, 26 fev. 2023.
- [97] VEIGA, P. A. DA S. et al. Production of high-performance biochar using a simple and low-cost method: Optimization of pyrolysis parameters and evaluation for water treatment. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 148, p. 104823, jun. 2020.
- [98] LI, S. et al. Predicting biochar properties and functions based on feedstock and pyrolysis temperature: A review and data syntheses. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 890–902, abr. 2019.
- [99] ADENIYI, A. G. et al. Thermochemical Co-conversion of Sugarcane Bagasse-LDPE Hybrid Waste into Biochar. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 46, n. 7, p. 6391–6397, 20 jul. 2021.

- [100] ATHIRA, G.; BAHURUDEEN, A.; APPARI, S. Thermochemical Conversion of Sugarcane Bagasse: Composition, Reaction Kinetics, and Characterisation of By-Products. **Sugar Tech**, v. 23, n. 2, p. 433–452, 3 abr. 2021.
- [101] MA, Z. et al. In-depth comparison of the physicochemical characteristics of bio-char derived from biomass pseudo components: Hemicellulose, cellulose, and lignin. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 140, p. 195–204, jun. 2019.
- [102] SA, K. et al. Large scale synthesis of reduced graphene oxide using ferrocene and HNO₃. **Materials Letters**, v. 211, p. 335–338, jan. 2018.
- [103] TAMILSELVI, R. et al. Graphene oxide – Based supercapacitors from agricultural wastes: A step to mass production of highly efficient electrodes for electrical transportation systems. **Renewable Energy**, v. 151, p. 731–739, maio 2020.
- [104] ADEL, A. M. et al. Effect of Ferrocene on Physicochemical Properties of Biochar Extracted from Windmill Palm Tree (*Trachycarpus Fortunei*). **Waste and Biomass Valorization**, v. 15, n. 2, p. 1031–1051, 7 fev. 2024.
- [105] JHA, A. K.; CHAKRABORTY, S.; BISWAS, J. K. Green synthesis of low-cost graphene oxide-nano zerovalent iron composite from solid waste for photocatalytic removal of antibiotics. **iScience**, v. 27, n. 12, p. 111486, dez. 2024.
- [106] HE, L. et al. Sugarcane biochar as novel catalyst for highly efficient oxidative removal of organic compounds in water. **Chemical Engineering Journal**, v. 405, p. 126895, fev. 2021.
- [107] HASAN, M. S. et al. Graphene oxide transport and retention in biochar media. **Chemosphere**, v. 264, p. 128397, fev. 2021.
- [108] VALENGA, M. G. P. et al. Biochar from sugarcane bagasse: Synthesis, characterization, and application in an electrochemical sensor for copper (II) determination. **Biomass and Bioenergy**, v. 184, p. 107206, maio 2024.
- [109] EL-MAGHRABI, N.; FAWZY, M.; MAHMOUD, A. E. D. Efficient Removal of Phosphate from Wastewater by a Novel Phyto-Graphene Composite Derived from Palm Byproducts. **ACS Omega**, v. 7, n. 49, p. 45386–45402, 13 dez. 2022.
- [110] ASIF, F. C.; SAHA, G. C. Graphene-like Carbon Structure Synthesis from Biomass Pyrolysis: A Critical Review on Feedstock–Process–Properties Relationship. **C**, v. 9, n. 1, p. 31, 11 mar. 2023.

- [111] SUWANREE, S. et al. Influence of magnesium content and phosphoric acid treatment on cadmium adsorption onto sugarcane leaf biochar. **Research on Chemical Intermediates**, v. 50, n. 8, p. 3981–4001, 21 ago. 2024.
- [112] ELHAMDY, W. A. Sustainable phosphorous porous biochar generated from sugarcane bagasse for effective adsorption coupled reduction of hexavalent chromium: Evaluating the method's greenness. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 169, p. 112931, nov. 2024.
- [113] HE, L. et al. Sugarcane biochar as novel catalyst for highly efficient oxidative removal of organic compounds in water. **Chemical Engineering Journal**, v. 405, p. 126895, fev. 2021.
- [114] CHE, H. et al. Super facile one-step synthesis of sugarcane bagasse derived N-doped porous biochar for adsorption of ciprofloxacin. **Journal of Environmental Management**, v. 335, p. 117566, jun. 2023.
- [115] LADO, J. J. et al. Enhanced capacitive deionization desalination provided by chemical activation of sugar cane bagasse fly ash electrodes. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 126, p. 143–153, jul. 2017.
- [116] LADO, J. J. et al. Study of sugar cane bagasse fly ash as electrode material for capacitive deionization. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 120, p. 389–398, jul. 2016.
- [117] RODIER, L. et al. Utilization of bio-chars from sugarcane bagasse pyrolysis in cement-based composites. **Industrial Crops and Products**, v. 141, p. 111731, dez. 2019.
- [118] QUAN, L. et al. Rice husk biochar is more effective in blocking the cadmium and lead accumulation in two Brassica vegetables grown on a contaminated field than sugarcane bagasse biochar. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 46, n. 11, p. 471, 10 nov. 2024.
- [119] LOC, N. X.; THANH, T. D.; PHUONG, D. T. M. Physicochemical properties of biochar produced from biodegradable domestic solid waste and sugarcane bagasse. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 12, n. 3, p. 395–407, 1 jul. 2023.
- [120] CHATURVEDI, S. et al. Characterization, bioenergy value, and thermal stability of biochars derived from diverse agriculture and forestry lignocellulosic wastes. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 2, p. 879–892, 2 jan. 2023.

- [121] DE ALMEIDA, S. G. C. et al. Biochar production from sugarcane biomass using slow pyrolysis: Characterization of the solid fraction - comparação de pci. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 179, p. 109054, set. 2022.
- [122] COSTA, M. A. M. et al. Emission analysis of sugarcane bagasse combustion in a burner pilot. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 32, p. 101028, maio 2023.
- [123] YANG, X. et al. Thermal Properties of Biochars Derived from Waste Biomass Generated by Agricultural and Forestry Sectors. **Energies**, v. 10, n. 4, p. 469, 2 abr. 2017.
- [124] FIORANELLI, A.; BIZZO, W. A. Generation of surplus electricity in sugarcane mills from sugarcane bagasse and straw: Challenges, failures and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 186, p. 113647, out. 2023.
- [125] BENCK, J. D. et al. explica quando o SS nao é aplicavel. **PLoS ONE**, v. 9, n. 10, p. e107942, 30 out. 2014.
- [126] LADO, J. J. et al. Sugarcane Biowaste-Derived Biochars as Capacitive Deionization Electrodes for Brackish Water Desalination and Water-Softening Applications. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 7, n. 23, p. 18992–19004, 2 dez. 2019.
- [127] SRISUMA, P. et al. A fundamental exploration on carbon nanotube formation via pyrolysis of ferrocene and glycerol: Experimental and theoretical viewpoints. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 24, n. 6, p. 1373–1382, dez. 2021.
- [128] BARREIRO, A. et al. Thermal Decomposition of Ferrocene as a Method for Production of Single-Walled Carbon Nanotubes without Additional Carbon Sources. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 110, n. 42, p. 20973–20977, 1 out. 2006.
- [129] KUNDU, S. et al. Reaction Atmosphere-Controlled Thermal Conversion of Ferrocene to Hematite and Cementite Nanomaterials—Structural and Spectroscopic Investigations. **ACS Omega**, v. 9, n. 21, p. 22607–22618, 28 maio 2024.
- [130] SAMAGE, A. et al. Sustainable conversion of agricultural biomass waste into electrode materials with enhanced energy density for aqueous zinc-ion hybrid capacitors. **Carbon**, v. 219, p. 118774, fev. 2024.

- [131] MOHIT; YADAV, N.; HASHMI, S. A. High energy density solid-state supercapacitors based on porous carbon electrodes derived from pre-treated bio-waste precursor sugarcane bagasse. **Journal of Energy Storage**, v. 55, p. 105421, nov. 2022.
- [132] BAHAR, N.; EKINCI, D. Hollow porous gold nanoparticle/reduced graphene oxide composite films for electrochemical supercapacitor applications. **Electrochimica Acta**, v. 337, p. 135844, mar. 2020.
- [133] CHAI, W. et al. Hydrophilic porous activated biochar with high specific surface area for efficient capacitive deionization. **Desalination and Water Treatment**, v. 320, p. 100617, out. 2024.