

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL
INSTITUTO BRASILEIRO BIOENERGIA BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL**



**REVISTA BRASILEIRA BIOENERGIA
BIOCHAR BIOCARBONO BIO-ÓLEO GÁS SINTÉTICO
ABIB BRASIL 2026/ABRIL/MAIO/01**

REVISTA BRASILEIRA BIOENERGIA

BIOCHAR BIOCARBONO BIO-ÓLEO GÁS SÍNTESE

Publicação técnica e industrial desenvolvido pela Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e do Instituto Brasileiro Bioenergia com o apoio técnico da Brasil Biomassa e Energia Renovável envolvendo uma matéria especial e artigos nacionais e internacionais sobre Biochar Extrato Pirolenhoso Vinagre de Madeira e Biocarbono Bio-óleo e Gás de Síntese. Editada pelo Comitê de Estudos da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e do Instituto Brasileiro de Bioenergia e Desenvolvida pela equipe técnica e de consultoria da Brasil Biomassa e Energia Renovável

Editor Responsável Celso Oliveira

Copyright by Celso Marcelo de Oliveira

Conteúdo das Publicações da Revista: 1. Crise Climática e Energética e a Transição Energética Combustíveis Fósseis para Energia Renovável 2. Biomassa Biochar e Biocarbono para Reduções Emissões GEE 3. Transição Economia Competitiva, Circular, Resiliente e Neutra em Carbono 4. Análise dos tipos de biomassa como matéria-prima para a produção de Biochar e Biocarbono no Brasil 5. Biochar como adubo ecológico para a Agricultura Regenerativa 6. Tecnologia Industrial de Pirólise para produção Biochar, extrato pirolenhoso e vinagre de madeira

7. Análise detalhada do mercado de produção e consumo de Biochar e Biocarbono 8. Custo de produção e os preços de Biochar e Biocarbono e produtos adicionais 9. Requisitos ambientais, certificações e permissões 10. Impacto e projeções de uso de fertilizantes e adubos e a oportunidade de mercado de Biochar 11. Certificações Internacionais do Biochar e Biocarbono 12. Biochar e Biocarbono da Biomassa e Crédito de Carbono 13. Avanços e Desafios recentes na Produção de Biocarbono 14. Conversão Termoquímica do Biocarbono partir da Biomassa 15. Tecnologia de Produção de Biocarbono, Bio-óleo e Gás de Síntese 16. Comparação das Características de Diferentes Tecnologias de Produção de Biocarbono, Bio-óleo e Gás de Síntese 17. Desafios no Desenvolvimento da Tecnologia de Produção de Biocarbono como substituto do Carvão e do Coque Metalúrgico 18. Mercado Internacional Biochar e Biocarbono 19. Artigos internacionais

Catálogo na Fonte Brasil e Portugal.

Edição 2026 Total 343 páginas.

II. Título. CDU 621.3(81)"2030" : 338.28 CDU 620.95(81) CDD333.95 (1ed.)

Todos os direitos reservados a ABIB Brasil Biomassa e Energia Renovável

Tradução e reprodução proibidas sem a autorização expressa do autor.

Nenhuma parte deste estudo pode ser reproduzida ou transmitida de qualquer forma ou meio, incluindo fotocópia, gravação ou informação, ou por meio eletrônico, sem a permissão ou autorização por escrito do autor. Lei 9.610, de 19 fevereiro 1998.

Edição eletrônica no Brasil e Portugal em versão eletrônica

© 2026 ABIB Brasil Biomassa e Energia Renovável

Tradução dos artigos internacionais pelo Comitê de Estudos da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e do Instituto Brasileiro de Bioenergia e Desenvolvida pela equipe técnica e de consultoria da Brasil Biomassa e Energia Renovável

Proibida a reprodução com ou sem fins lucrativos, parcial ou total, por qualquer meio impresso e eletrônico.

Nota do Editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações internacionais são de exclusiva responsabilidade dos autores e colaboradores individuais.

Os editores se eximem de qualquer responsabilidade por danos a pessoas ou bens decorrentes de ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.

Associação Brasileira das Indústrias Biomassa e Energia Renovável

Brasil Biomassa e Energia Renovável

Av. Candido Hartmann, 570 24 andar Conj. 243 Curitiba Paraná

Fone (41) 30406777 Whats Brasil Biomassa (41) 998173023

Plataforma digital Brasil Biomassa <https://www.brasilbiomassa.com/>

Editora Brasil Biomassa <https://www.editorabrasilbiomassa.com/>

E-mails diretoriabrasilbiomassa@gmail.com ou

diretoria@editorabrasilbiomassa.com

REVISTA BRASILEIRA BIOENERGIA

BIOCHAR BIOCARBONO BIO-ÓLEO GÁS SÍNTESE

SUMÁRIO EXECUTIVO

APRESENTAÇÃO.....	16
BIOCARBONO PARA PRODUÇÃO AÇO VERDE.....	38
Aspectos preliminares	
Industria Siderúrgica Mundial	
Produção Sustentável de Ferro e Aço	
Fabricação de aço e o forno elétrico a arco	
Biocarbono	
Desafios de produção do Biocarbono	
Biocarbono na produção de aço	
Desafios na utilização de biocarbono para a produção de ferro e aço	
Facilitadores e impulsionadores do uso de biocarbono	
Implicações práticas	
Matérias-primas e viabilidade econômica	
Cadeia de valor e propostas	

Projeto Biocarbono Estados Unidos
Biocarbono para as indústrias siderúrgicas
Carga de carbono
Descarbonização do aço
SDI Biocarbon Solutions
Projeto Vale Biocarbono
Livros Tecnologia Industrial Biocarbono

ARTIGO INTERNACIONAL

Potencial para o desenvolvimento de briquetes de biocarbono para a indústria de fundição.....63

Resumo

1. Introdução

2. Materiais e Métodos

2.1. Preparação de Carvões e Partículas

2.2. Ligantes selecionados para compactação

2.3. Elaboração de Receitas

2.4. Determinação das propriedades físicas e da reatividade

2.5. Avaliação do comportamento de briquetes em altas temperaturas

3. Resultados e Discussão

3.1. Densificação do Biocarbono

3.2. Resistência Mecânica a Frio de Briquetes de Biocarvão

3.3. Reatividade de Briquetes de Biocarvão

3.4. Poder calorífico e densidade energética de briquetes de biocarvão

3.5. Comportamento de briquetes de biocarvão em escala altas temperaturas

4. Considerações Finais

Contribuições dos autores

Financiamento

Agradecimentos

Conflitos de interesse

Referências

ARTIGO INTERNACIONAL

Descarbonização produção de ferro-ligas utilizando biocarbono.....96

Resumo

1. Introdução

2. Comportamento térmico do carvão vegetal

3. Reatividade do CO₂

4. Reatividade da Escória

5. Resistividade elétrica de materiais de carbono

6. Conclusões

BIOCHAR ENERGÉTICO E SEQUESTRO DE CARBONO.....111

Introdução

Biochar Energético

Características do Biochar

Neutralidade de Carbono

Produção de biochar como tecnologia de emissão negativa

Pirólise

Gaseificação

Carbonização Hidrotérmica

Integração com Sistemas de Energia de Biomassa

Fatores que afetam a qualidade do biochar

Aplicação agrícola do biochar: benefícios e mecanismos

Melhoria das propriedades do solo

Sequestro de carbono e mitigação das mudanças climáticas

Sinergias entre energia, resíduos agrícolas e fertilidade do solo

Oportunidades para Sistemas de Agricultura de Biomassa

Valorização de Resíduos e Economia Circular

Integração com Programas de Carbono e Financiamento Climático

Melhoria da produtividade agrícola e redução de insumos

Flexibilidade e escalabilidade tecnológica

Desafios e Barreiras

Divergências Técnicas e Econômicas

Regulamentos, Normas e Qualidade do Produto

Livros Tecnologia Industrial Biochar

NEWS BIOCHAR

Biochar e sistemas alimentares resilientes e agricultura sustentável.174

Mudanças Climáticas

Mitigando riscos relacionados ao clima

Apoiando a agricultura sustentável

Lixo Urbano

Processamento e tecnologia de pirólise

Principais benefícios

Estabilização de pH Equilíbrio específico do produto

Aumentar a absorção de carbono

Neutralização de toxinas Capacidade de ligação significativa

Crescimento microbiano

Redução de fertilizantes

Créditos de carbono

Economia Circular Pirólise e Soluções de Energia Futura.....181

Economia Circular em Energia

Pirólise: uma inovação em energia circular

Exemplos de outras soluções circulares

BMW investe remoção de carbono biochar e créditos de carbono...185

Biochar: 107.000 ton. entregues remoção de carbono.....187

Plataforma impulsiona financiamento para startups biochar.....189

Potencial Biochar Austrália: Desbloqueando 150.000 ton.....192

Papel do biochar nas iniciativas de economia circular

Desafios e considerações políticas

Futuro Biochar na Austrália

ARTIGO INTERNACIONAL BIOCHAR

Da biomassa residual ao combustível verde: catalisadores à base de biochar para a produção de hidrogênio.....197

Resumo

1. Introdução

1.1. A necessidade do hidrogênio verde na transição para energia limpa

1.2. Resíduos de biomassa: uma fonte abundante e renovável

1.3. Emergência do biochar como catalisador sustentável

1.4. Objetivos e Estrutura da Revisão

2. Rotas de Produção de Hidrogênio: Uma Visão Geral

2.1. Rotas Termoquímicas: Pirólise, Gaseificação e Reforma

2.1.1. Pirólise

2.1.2. Reforma

2.1.3. Gaseificação

2.2. Rotas Eletroquímicas e Biológicas

2.2.1. Eletroquímica

2.2.2. Fermentação Escura

2.3. Papel do catalisador na melhoria do rendimento e da seletividade do hidrogênio

2.4. Desafios ambientais e econômicos dos métodos convencionais

3. Catalisadores para a Produção de Hidrogênio

3.1. Catalisadores à base de metal

3.2. Catalisadores de Óxido Metálico

3.3. Catalisadores à base de carbono

4. Biochar: Características, Preparação e Funcionalização

4.1. Influência da matéria-prima e das condições de pirólise nas propriedades físico-químicas e características estruturais

4.1.1. Análise Elementar e Teor de Cinzas

4.1.2. Grupos Funcionais de Superfície

4.1.3. Distribuição da área superficial e do tamanho dos poros

4.2. Modificação de superfície e deposição de metais em biochar

5. Catalisadores à base de biochar na produção de hidrogênio

5.1. Funções do Biochar em Sistemas de Produção de Hidrogênio

5.1.1. Biochar como um verdadeiro catalisador

5.1.2. Biochar como suporte catalítico

- 5.1.3. Biochar como adsorvente e meio de adsorção aprimorada
- 5.1.4. Biochar como transportador de elétrons e mediador redox
- 5.1.5. Biochar como mediador microbiano e redox em sistemas biológicos
- 5.2. Efeitos sinérgicos com nanopartículas metálicas
- 5.3. Aplicações em reforma a vapor, pirólise, gaseificação e fotocatalise
- 6. Principais fatores que afetam a produção catalítica de hidrogênio
 - 6.1. Área Superficial, Porosidade e Grupos Funcionais
 - 6.2. Condições de reação: temperatura, pressão e tempo
 - 6.3. Composição da matéria-prima e pré-tratamento
 - 6.4. Estabilidade do Catalisador e Potencial de Regeneração
 - 6.5. Estrutura Conceitual para Biochar
- 7. Desafios e limitações do biochar
 - 7.1. Variabilidade na Qualidade e Composição do Biochar
 - 7.2. Escalabilidade, Padronização e Reprodutibilidade
 - 7.3. Considerações Ambientais e de Ciclo de Vida
- 8. Perspectivas e Oportunidades Futuras
 - 8.1. Biochar modificado para aplicações específicas de hidrogênio
 - 8.2. Sistemas Híbridos e Integração com Tecnologias Renováveis

8.3. Políticas, Investimentos e Escala Industrial

8.4. Prioridades de Pesquisa e Roteiro de Inovação

ARTIGO INTERNACIONAL BIOCHAR

Revisão dos métodos de aprimoramento do biochar para sua aplicação em processos de conversão termoquímica e recuperação de materiais críticos.....277

Resumo

1. Introdução

2. Métodos de Produção de Biochar

2.1. Carbonização Hidrotérmica (HTC)

2.2. Torrefação

2.3. Pirólise Lenta

3. Biochar como suporte catalítico

3.1. Definição das principais propriedades do biochar como catalisador

3.1.1. Funcionalidade da Superfície

3.1.2. Elementos Inorgânicos

3.1.3. Tamanho das Partículas

4. Revisão das técnicas de aprimoramento do biochar

4.1. Métodos para o aprimoramento do biochar

4.1.1. Métodos Físicos

4.1.1.1. Tratamento de oxidação térmica

4.1.1.2. Ativação do Steam

4.1.1.3. Ativação com CO₂

4.1.1.4. Moagem de bolas

4.1.2. Métodos Químicos

4.1.2.1. Ativação alcalina

4.1.2.2. Ativação ácida

4.1.3. Métodos Inorgânicos

4.1.4 . Atualização de H₂O₂

5. Discussão comparativa sobre métodos de atualização

6. Usos potenciais do biochar aprimorado como catalisador à base de carbono em diferentes aplicações

6.1. Craqueamento Catalítico do Metano

6.2. Apoio à Produção de Biodiesel

6.3. Aprimoramento do Gás de Síntese (Reforma do Alcatrão)

6.4. Limpeza Ambiental

7. Lixiviação química de biochar derivado de resíduos e seu potencial para recuperação de materiais críticos

8. Da produção à modernização: preocupações e perspectivas técnico-econômicas

8.1. Compatibilidade com biomassa

8.2. Limitações de ampliação de escala

8.3. Equilibrando a eficiência da modernização com os riscos ambientais

8.4. Obstáculos Econômicos

9. Conclusões



REVISTA BRASILEIRA BIOENERGIA BIOCHAR BIOCARBONO BIO-ÓLEO GÁS SÍNTESE APRESENTAÇÃO

Em nome da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e dos numerosos colaboradores que ajudaram no desenvolvimento do primeira Revista Brasileira Bioenergia Biocarbono e Biochar que tem por objetivo uma avaliação pormenorizada para a produção de um produto sustentável (Biochar e Biocarbono) para o setor no Brasil.

O Brasil está sob pressão para melhorar sua produtividade agrícola para acompanhar as demandas de uma população crescente com dietas cada vez mais intensivas em recursos. Essa melhoria de produtividade deve ocorrer em um cenário de metas de redução de intensidade de carbono.

Novas abordagens agrícolas, incluindo todas as chamadas agriculturas orgânicas, foram criadas para diminuir e eliminar os impactos negativos dos fertilizantes sintéticos nos solos e nas plantas e, por meio deles, na saúde humana e no meio ambiente.

O desafio do setor da agricultura vai exigir uma enorme quantidade de adubos e fertilizantes e o biochar ecológico zero carbono pode ser uma solução ao setor.

Desde o início do século XXI, a produção e utilização de biochar para fins agrícolas e ambientais se tornaram um foco de pesquisa internacional em função do sequestro de carbono.

O biochar é aplicado para diminuir a adversidade e os riscos ambientais dos fertilizantes químicos. Foi comprovado que o biochar melhora a fertilidade do solo, reduz a necessidade de fertilizantes minerais, aumenta os rendimentos e a qualidade das colheitas e protege as águas subterrâneas e a atmosfera da poluição, incluindo a contaminação por óleo. Esta substância sólida rica em carbono tem sido investigada principalmente desde sua descoberta na bacia amazônica em Terra Preta, e é referida como um modelo para agricultura.

Atualmente, os métodos comuns para preparação de biochar incluem pirólise, carbonização hidrotérmica e carbonização por micro-ondas. Entre estes, a pirólise se destaca por sua simplicidade, eficiência e respeito ao meio ambiente, desfrutando assim de ampla aplicação na produção de biochar.

A carbonização hidrotérmica, caracterizada pela sua facilidade de operação e capacidade de produzir de biochar com uma estrutura de poros abundante e alta área de superfície específica, está ganhando destaque por seus benefícios ambientais. Além disso, o método de carbonização por micro-ondas oferece vantagens como aquecimento uniforme, rapidez e baixo consumo de energia.

O biochar, caracterizado por alta estabilidade e uma estrutura de poros bem definida, possui grupos funcionais de superfície que o tornam um adsorvente excepcional, particularmente no tratamento de águas residuais contaminadas com metais pesados .

Biochar é um material sólido rico em carbono e sintetizado por carbonização hidrotérmica ou por pirólise lenta de biomassa. Esses processos produzem biochar com uma natureza alcalina notável que é favorável ao tratamento de solos ácidos. A aplicação de biochar como meio de remediação e fortalecimento do solo tem sido estudada na última década devido à sua eficiência e custo-benefício.

Esse processo rompe moléculas da biomassa e reorganiza as ligações químicas para formar o biochar, como também outros compostos concentrados em carbono, por exemplo os bio-óleos, extrato pirolenhoso e vinagre da madeira e gases de síntese que podem ser reaproveitados para fins energéticos.

O biochar se diferencia do carvão vegetal principalmente devido à sua aplicação como corretivo de solos agrícolas capaz de aumentar a produtividade e reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da biomassa que, de outra forma, se decomporia rapidamente (IPCC 2022).

O biocarvão (biochar, em inglês) é um produto sólido com elevada concentração de carbono, altamente estável e resistente à decomposição biológica. É obtido a partir da pirólise da biomassa um processo termoquímico caracterizado pelo aquecimento da matéria-prima a altas temperaturas na ausência de oxigênio.

A comunidade científica internacional, representada pelo IPCC já constatou que medidas de mitigação das mudanças climáticas focadas apenas na redução de emissões de GEE não serão suficientes para conter o aquecimento global a níveis seguros para a sociedade implicando assim na necessidade da adoção de práticas de remoção de carbono, capazes de retirar carbono da atmosfera.

Desde 2022, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) defende que as tecnologias de remoção de dióxido de carbono (CDR) são um complemento necessário às reduções de emissões para atingir um futuro líquido zero. O biochar é uma das tecnologias de sequestro de carbono reconhecidas pelo IPCC e também é uma das soluções mais acessíveis e prontas para o mercado. A tecnologia de remoção de carbono do biochar foi responsável por 94% dos créditos de remoção de carbono entregues em 2023.

Nossa Revista avalia que os sistemas de produção de biochar (extrato pirolenhoso e vinagre da madeira) para uso na agricultura e também como uma inovadora fonte de geração de energia (biocarvão/biocarbono).

Além disso, os componentes voláteis podem condensar parcialmente em uma forma líquida conhecida como bio-óleo, o extrato pirolenhoso e o vinagre de madeira. Junto com essas saídas, gases de combustão contendo CH₄, H₂, CO e CO₂ também são gerados.

Os sistemas de biochar proporcionam um uso na agricultura e pecuária, reduzindo a prática de queima de plantações e de aproveitamento de todos os tipos de resíduos como substrato para a produção de biochar.

Uma questão a ser abordada é a quantidade de matéria-prima que encontra disponível para a produção de biochar com acesso imediato no Brasil. Assim sendo, o estudo pretende em abordar uma questão fundamental de disponibilidade de biomassa para a produção de biochar em todo o território nacional.

A Brasil Biomassa desenvolveu uma série de projetos e plantas industriais para o aproveitamento da biomassa dos tipos de resíduos (florestal e madeira, agricultura e agroindustrial e da cana-de-açúcar) para a produção sustentável de biochar agrícola (extrato pirolenhoso e vinagre da madeira) e energético (biocarvão/biocarbono, bio-óleo e gás de síntese).

Contudo, a caracterização para a utilização do processo termoquímico é fundamental quando se lida com resíduos a fim de compreender o comportamento da conversão e eficiência ao utilizar os resíduos como combustível.

Dessa forma, levando em consideração o reaproveitamento do resíduo o que contribui tanto à indústria quanto ao meio ambiente, o desenvolvimento desta Revista alavancará a análise do potencial de biomassa para a produção de biochar.



Os biochars da biomassa do têm algumas propriedades físico-químicas importantes, como maior área de superfície e porosidade, baixa densidade aparente, maior capacidade de troca catiônica (CTC), pH neutro a alto e maior teor de carbono.

Essas características podem ser efetivamente utilizadas em vários campos, como adsorção e na captura de carbono, biofertilizante, agricultura regenerativa e como material de construção, transporte, fabricação de móveis, aplicações domésticas, cimento e indústria de plástico.

A utilização mundial de biochar tem crescido significativamente nos últimos anos, surgindo diferentes mercados.



Assim, a partir do entendimento de que é necessário reduzir ou eliminar os impactos ambientais negativos dos processos e produtos de diversos setores, aliando isso à melhoria social e econômica, a biomassa passou a ser considerada uma fonte potencial de matéria-prima para a produção de Biochar.



Por outro lado, o setor de eletricidade e energia é a fonte mais significativa de emissões de CO₂, seguido pelo transporte, manufatura industrial e edifícios (81 Mt CO₂). Cerca de 37% da demanda global total de energia é contribuída pelos combustíveis fósseis nas indústrias alumínio, cimentos e siderúrgicas como gás natural ou carvão e o coque de petróleo.

A produção de aço, alumínio, cimento e ferro em todo o mundo aumentou acentuadamente nos últimos anos devido ao aumento da demanda industrial e do consumidor. Para atender à demanda da população em crescimento, prevê-se que o consumo de aço e cimento aumente 1,3 vezes até 2050.

A produção de ferro e aço, considerada a precursora de todos os fabricantes, é uma das indústrias mais importantes para cada nação e contribui para o crescimento nacional e econômico. A

s indústrias metalúrgicas, especialmente a siderurgia e a produção de ferro, são processos altamente intensivos em carbono porque requerem carbono para liberar oxigênio do óxido metálico.

Uma quantidade significativa de energia é necessária para remover o oxigênio ligado, que geralmente é fornecido pelo carvão, onde o carvão atua não apenas como uma fonte de energia, mas também como um redutor.

O consumo global de carvão estabeleceu um aumento recorde para 8,3 bilhões de toneladas, com a China sendo o maior consumidor de carvão (4,4 bilhões de toneladas), seguida pela Índia (976 milhões de toneladas). As indústrias de ferro e aço usaram quase 9305 terawatts-hora de energia do carvão. Cerca de 770 kg de carvão são usados para fabricar uma tonelada de aço .

O uso extensivo do carvão emite quantidades significativas de CO₂ durante a fabricação do aço e ferro, o que contribui para o aquecimento global e outros problemas climáticos. Para cada tonelada de aço produzida, são liberadas quase 1,9 toneladas de CO₂, o equivalente a 8% das emissões totais de CO₂ . A maior parte dessas emissões advém dos processos industriais em que o carvão é usado como fonte de energia e carbono para remover o oxigênio do minério de ferro, o que ocorre em um alto-forno.

Diferentes técnicas disponíveis para a produção de alumínio, cimentos e ferro e aço são o processo básico de alto-forno sem oxigênio, o forno elétrico de redução direta a arco, a fusão da escarpa em forno elétrico a arco e a redução de fundição em forno básico de oxigênio.

O processo de alto-forno sem oxigênio básico (BF-BOF), um processo preferido para produzir componentes de ferro metálico para a produção de aço, requer coque metalúrgico de alta qualidade.

Nos altos-fornos, o minério de ferro é normalmente abreviado por coques ou carvões e transformado em ferro-gusa rico em carbono, após o qual é descarbonetado em um forno básico de oxigênio e, finalmente, passa por um processo de refino adicional para fabricar aço.

Cerca de 72% da produção global de aço bruto é produzida pela técnica BF-BOF. Usando a técnica BF-BOF, 1 tonelada de aço bruto pode ser produzida usando cerca de 1400 kg de minério de ferro, 800 kg de carvão, 120 kg de aço reciclado e 300 kg de calcário.

Além do BF-BOF, existem algumas outras técnicas para produção de aço ou ferro, como fornos elétricos a arco de ferro de redução direta (DRI-EAF), fusão de sucata em fornos elétricos a arco e fornos básicos de oxigênio de redução de fundição (SR-BOF).

Outro método principal para produção de ferro é a fusão de sucata de aço em fornos elétricos a arco, que representa aproximadamente um quarto da produção global de aço. O DRI-EAF representa 5% da produção total de aço em todo o mundo, que geralmente usa gás natural como fonte de energia e redutor.

Recentemente, os fornos elétricos a arco ganharam interesse devido às suas várias vantagens, como sua pequena escala, grande eficiência, baixos custos de capital e operação e produtividade.

Nessa técnica, uma tonelada de aço bruto precisa de várias matérias-primas, incluindo sucata, oxigênio, calcário, carbono, gás natural e eletrodos nas seguintes quantidades 1036, 56, 28, 21, 4 e 3 kg, respectivamente.

Devido às emissões significativas de gases de efeito estufa, os processos de fabricação de alumínio, ferro e aço precisam priorizar a redução do uso de combustíveis fósseis para mitigar os problemas ambientais. É extremamente necessário encontrar um substituto eficiente, sustentável e ambientalmente correto para o coque e o carvão.

Biocombustíveis produzidos a partir de biomassa residual, como biocarbono (biocarvão), bio-óleo ou gás de síntese, podem ser uma substituição propícia para combustíveis fósseis nos processos de co-processamento de ferro e aço.

A utilização direta de biomassa nas indústrias de ferro e aço é limitada devido às suas características, como baixa moabilidade, alta umidade, natureza heterogênea e baixo conteúdo energético.

O biocarbono pode ser produzido a partir de torrefação, carbonização, pirólise e gaseificação de biomassa. Várias reações estão envolvidas nesses processos termoquímicos, como desidratação, desidroxilação, descarboxilação, despolimerização, desaminação, reforma e aromatização, levando ao craqueamento térmico da biomassa para produzir biocarbono e outros produtos de biocombustíveis, como bio-óleo e gás.

O biocarbono tem recebido muito interesse como um substituto potencial devido à sua alta combustibilidade, alto conteúdo energético, melhor moabilidade e capacidade reduzida. Além disso, a principal vantagem do uso de biomassa ou biocarbono como combustível é a sua neutralidade de carbono,. Portanto, as emissões líquidas de carbono para a atmosfera são zero se a biomassa for usada em processos industriais de produção de biocarbono

Avaliando as propriedades físico-químicas do biocarbono em comparação com o carvão e o coque para uso nas indústrias de alumínio, cimentos e siderurgia. As propriedades únicas da biomassa bruta, como alto valor de umidade, alto teor de cinzas e baixo valor calorífico, dificultam sua utilização direta nas indústrias como um substituto para combustíveis fósseis.

No entanto, as características do biocarbono derivado de várias tecnologias de conversão são muito melhores do que a biomassa bruta, que tem o potencial de substituir o carvão devido a ter propriedades semelhantes ao carvão ou coque de baixa volatilidade .

O biocarbono pode ter menor teor de cinzas e valor calorífico e teor de carbono comparativamente maiores do que o carvão.

O teor de carbono fixo do biocarbono é comparável ao do carvão . O alto teor de carbono do biocarbono também leva à sua maior densidade energética. O valor calorífico do biocarbono depende muito de seus métodos de produção e condições operacionais. A expansão semelhante é válida para a temperatura.

O biocarbono ou carvão ativado pode demonstrar maior porosidade e alta área de superfície, levando a maior reatividade e adsorção de poluentes do que o carvão. Essa propriedade do biocarbono também tem um impacto considerável no processo de sinterização e na qualidade do produto.

A maior porosidade faz com que o minério de ferro e o coque se aglomerem em temperaturas mais baixas, resultando em menor consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa durante a sinterização.

O uso de biomassa carbonizada na forma de biocarbone na produçãõ de alumíniõ, cimento e ferro e aço ainda é relativamente novo e enfrenta forte concorrência de sistemas de energia a carvão. O uso de biocarbone em processos comerciais também enfrenta desafios técnicos e econômicos.

A pirólise é a principal rota e é amplamente utilizada para produzir biocarbone e bio-óleo a partir de inúmeras matérias-primas de baixo custo. É a degradação térmica da matéria orgânica pelo tratamento de calor a temperaturas entre 300 e 700 °C em um ambiente desprovido ou limitado de oxigênio.

O biocarbone é normalmente adicionado aos altos-fornos por meio de carregamento superior ou injeção em tuyeres ou injetado pela parte inferior como injeção de carvão pulverizado.

Se o biocarbone for empregado na produçãõ de ferro, cerca de 203 kg O₂ t⁻¹ de metal quente podem ser emitidos, enquanto 890 kg CO₂ t⁻¹ de metal quente podem ser capturados .

Substituir 100% do coque por biocarbone é tecnicamente viável, pois a altura operacional e a pressão de pico em altos-fornos de pequena escala são comparativamente menores.

No entanto, no caso de altos-fornos grandes, no máximo 20% de coque pode ser substituído por biocarbone porque requer características da mistura de coque para gerar resistência de carga suficiente e manter a permeabilidade do leito.

A maior taxa de injeção de biocarbono está tipicamente na faixa de 200–220 kg t⁻¹ de metal quente, indicando a possibilidade de uma redução de 40% nas emissões líquidas de CO₂. A adição de biocarbono em 50–100% à mistura de coque reduz as emissões de CO₂ em 3–7% na indústria siderúrgica, que é medida em 0,08–0,2 toneladas de CO₂ t⁻¹ de aço bruto.

Usar biocarbono em vez de injeção de carvão pulverizado resulta em menos formação de escória devido ao seu menor teor de impurezas e cinzas do que o carvão. Um dos principais desafios na produção de aço virgem é uma pegada de carbono significativamente grande.

Além disso, em contraste com altos-fornos, fornos elétricos a arco podem encontrar limitações técnicas na fabricação de aço virgem.

A Rio Tinto estabeleceu um processo de fabricação de ferro com baixo teor de carbono na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento da Biolron, na Austrália Ocidental.

A Biolron realizou testes bem-sucedidos do inovador processo de fabricação de ferro em uma planta piloto de pequena escala na Alemanha, utilizando biomassa bruta e energia de micro-ondas como substitutos do carvão para converter o minério de ferro de Pilbara em ferro metálico durante a produção de aço.

Ao integrar energia renovável e ciclagem de carbono por meio de biomassa de rápido crescimento, a Biolron reduziu potencialmente as emissões de carbono em até 95%, em comparação com o método tradicional de alto-forno.

Temos os combustíveis de biocarbono sólido em vez de injeção de carvão pulverizado para reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa do alto-forno durante a fabricação de ferro. Eles avaliaram sistematicamente o desempenho do biocarbono e desenvolveram um modelo técnico-econômico para avaliar o uso em valor do biocarbono produzido por várias técnicas de pirólise.

Sendo que 10–20% do carbono fóssil (carvão e coque) pode ser substituído com sucesso por materiais alternativos de base biológica para injeção em altos-fornos por meio de injeção de carvão pulverizado.

Misturar carvão ou coque com biomassa ou biocarbono pode ser uma alternativa promissora para produzir biocoque com propriedades ideais para utilização em altos-fornos. As características do biocoque para aplicação em um alto-forno enquanto produziam biocoque misturando carvão de coque com biocarbono derivado da pirólise de casca de coco e casca de arroz a 400–600 °C.

As proporções de mistura de carvão com biocarbono foram 95:5, 85:15 e 75:25% em peso. A mistura de coque e biocarbono de casca de coco (85:15% em peso) atende aos requisitos do alto-forno para maior eficiência. Um aumento na temperatura de pirólise aumenta a resistência à compressão do biocoque e um aumento nas porções de biocarbono reduz o índice de reatividade do carvão.

As características de combustão de biomassa, hidrochar derivado de biomassa, antracito e uma combinação de hidrochar e antracito por análise termogravimétrica.

Os resultados revelaram que a adição de hidrochar ao antracito melhorou o comportamento de combustão do antracito. As melhores características de combustão foram encontradas quando a proporção de hidrochar foi de 60% em peso na mistura, fornecendo uma energia de ativação de $38,5 \text{ kJ mol}^{-1}$.

No modelo de otimização com foco em reutilização para avaliar a viabilidade do uso de biocarbono para injeção via injeção de carvão pulverizado em altos-fornos. O modelo demonstrou que a substituição de 30% do injetável por biocarbono derivado de biomassa lenhosa levou ao aumento das concentrações de arsênio e chumbo na poeira de combustão do alto-forno, embora seus níveis permanecessem dentro dos limites aceitáveis.

As características físico-químicas do carvão antracito e do biocarbono obtidos de cascas de palmiste. A reatividade do biocarbono era superior à do carvão antracito por ter maior teor de óxido de metal alcalino e estruturas porosas mais desenvolvidas. A viabilidade da aplicação de biocarbono na injeção de alto-forno e observando que ele pode promover a redução indireta, diminuir a quantidade de injeção de carvão e confirmar a operação estável em altos-fornos, reduzindo assim o consumo de coque e a mineração de carvão.

Uma carvão vegetal com carvão de coque em 3, 5 e 8% em peso para explorar seu impacto na reatividade do CO_2 . Seus resultados mostraram que a adição de carvão vegetal ao carvão de coque aumentou a área de superfície do coque e melhorou a reatividade do coque em altos-fornos.

Temos o hidrochar a partir da carbonização hidrotérmica de palha de milho para uso no alto-forno como um biocombustível sólido.

Sua análise de caracterização confirmou que a reatividade de combustão do processo de carbonização hidrotérmica superou a do carvão betuminoso, tornando-o um método viável para converter biomassa de palha de milho em combustível de injeção de alto-forno.

O biocarbono também pode ter um impacto no desempenho dos altos-fornos. Foi relatado que uma redução de temperatura da zona de reserva para 850 °C resultou em uma mitigação de 9% de CO₂ com apenas 4% de perda de produtividade do alto-forno quando o biocarbono foi usado. No entanto, reduzir ainda mais a temperatura para 750 °C pode reduzir o CO₂ em apenas 12 %, enquanto aumenta a perda de produtividade em até 14%.

Adicionar biocarbono a um alto-forno altera sua massa e trocas de calor, distribuição de gás e perfil de temperatura, não afeta diretamente o processo de fabricação de ferro.

No entanto, ao utilizar biocarbono como aditivo, é importante considerar fatores como as características do biocarbono produzido, seu tamanho de partícula, porosidade e distribuição do tamanho dos poros, a proporção de biocarbono na mistura de coque, o grau de homogeneização da mistura com o aditivo e o método de carregamento da mistura na câmara de coqueificação.

Vários estudos consideraram a viabilidade da mistura parcial de biocarbono com carvão para criar biocoque para reduzir a quantidade de carvão usada no processo de fabricação de coque.

O biocoque é uma mistura de carvão e biocarbono produzida a partir de vários processos de conversão termoquímica em altas temperaturas.

No entanto, o limite superior da quantidade de biocarbono que pode ser combinada com carvão para fazer biocoque de qualidade adequada depende de vários fatores, especialmente índices de alta temperatura do coque, ou seja, resistência do coque após a reação e indicador de reatividade do coque, bem como fluidez.

Existe um projeto de produção de bio-coque para ser usado como um substituto para o coque metalúrgico misturando biocarbono produzido a partir de serragem com brisa de coque na proporção de 2:8, o que satisfaz o padrão para coque metalúrgico secundário de alta qualidade.

A estrutura interna e o desempenho do coque resultante foram melhorados preenchendo rachaduras e poros com uma quantidade apropriada de pó de biocarbono de serragem.

O biocoque produzido a partir da combinação de biocarbono obtido de bambu e brisa de coque residual enquanto piche de alcatrão de hulha usado como aglutinante pode substituir o coque metalúrgico em 4%.

Existe ainda o biocoque usando várias proporções de mistura de carvão de grau inferior e biocarbono derivado da pirólise de cascas de coco, cascas de amendoim, serragem e bagaço de cana-de-açúcar a 550 °C com amido e melão como ligantes por meio da carbonização.

A caracterização das misturas revelou o potencial para substituir carvão e coque de origem fóssil em 20–30%. O tamanho das partículas da biomassa e do biocarbono também influencia a resistência do coque após a reação. Quando o tamanho das partículas aumenta, a resistência do coque após a reação aumenta com uma ligeira queda na fluidez.

Assim, o tamanho ideal de partícula do biocarbono variou entre 2 e 4 mm. Ao comparar partículas finas de biocarbono com cinzas que contêm metais alcalinos e alcalino-terrosos (por exemplo, Na, Mg, P, K e Ca) com materiais grosseiros, vários efeitos se tornam evidentes no processo de coqueificação.

O biocarbono geralmente contém alto teor de carbono com uma área de superfície maior e porosidade com alto valor calorífico e capacidade de absorção. Além disso, o nível de saturação do biocarbono é geralmente alto e tem alto teor de água em torno de 48%, em comparação com o carvão ou a brisa de coque (25%).

Além disso, a velocidade de queima do combustível, especialmente do combustível sólido, aumentou com o aumento da substituição do biocarbono, pois o biocarbono geralmente tem reatividade muito maior em altas temperaturas (700–800 °C) do que a do coque.

As propriedades do biocarbono, especialmente o teor de carbono fixo, o teor de matéria volátil e o tamanho das partículas, desempenham um papel significativo na substituição da brisa de coque.

Já foi relatado que o biocarbono com um teor de carbono fixo superior a 90% e tamanhos de partículas variando de 1 a 5 mm pode ser adicionado em aproximadamente 60% ao processo de sinterização para atingir um rendimento de produto semelhante ao que pode ser alcançado usando a brisa de coque. Além disso, vários estudos relataram que a substituição ideal do biocarbono pela brisa de coque está dentro da faixa de 40–60% para atingir um produto de sinterização de qualidade aceitável, mantendo um rendimento de produto acima de 80%. Vale ressaltar que, embora o uso de biocarbono na tecnologia de sinterização possa não levar a uma redução nas emissões de gases de efeito estufa, as emissões líquidas de CO₂ na indústria siderúrgica devem diminuir em aproximadamente 5–15%.

Essa redução é atribuída às matérias-primas de biomassa serem consideradas energia neutra em carbono. A siderurgia é uma parte fundamental da fabricação industrial moderna e desempenha um papel vital em vários setores, incluindo construção, automotivo, máquinas e desenvolvimento de infraestrutura.

A exploração de biocarbono no lugar de carvão ou coque para gerar aço para forno a arco elétrico tornou-se um foco de pesquisa nos últimos anos devido ao seu enorme potencial para reduzir o uso de carbono e as emissões de CO₂.

Existem estudos sobre resíduos de casca de palma para substituir coque metalúrgico na produção de aço em forno a arco elétrico e examinaram as relações com escória de forno a arco elétrico em um reator em escala de laboratório a 1550 °C.

O biocarbono derivado de resíduos de casca de palma mostrou interações carbono-escória mais violentas, em comparação com o coque comum, pois a reatividade de combustão do biocarbono é forte devido à sua alta área de superfície.

Na Revista aduzimos que o biocarbono renovável pode ser uma substituição adequada e sustentável para o combustível à base de carvão, reduzindo as emissões globais de CO₂ nas indústrias siderúrgicas.

Avaliamos as diversas formas de produção de biocarbono, especialmente torrefação, pirólise e gaseificação, e estudou a aplicação do biocarbono em atividades de siderurgia ou siderurgia com alto consumo de energia, como altos-fornos, coqueria, sinterização de minério de ferro e siderurgia.

O biocarbono pode potencialmente substituir o carvão por injeção de carvão pulverizado e substituir parcialmente o coque em grandes altos-fornos. As características únicas da mistura de coque são necessárias para fornecer resistência suficiente à carga e manter a permeabilidade do leito, e apenas uma substituição máxima de 20% pode atender a essa necessidade.



No setor siderúrgico, a adição de biocarbono à mistura de carvão dentro dessa faixa reduz as emissões de CO₂ em 1–5% ou 0,02–0,11 toneladas de CO₂ toneladas –1 de aço bruto. Para o processo de sinterização, o biocarbono que tem teor de carbono fixo acima de 90% e uma faixa de tamanho de 1–4 mm pode ser adicionado até 60% à planta de sinterização para obter um rendimento de produto comparável ao obtido da brisa de coque e reduzir significativamente a emissão de CO, CO₂, NO_x e SO_x.

Por tanto, concluímos nesta apresentação da Revista que o biochar e o biocarbono tem o potencial de aprimorar o processo de fabricação de aço em fornos elétricos a arco, servindo como combustível, agente espumante de escória e recarburizador de aço, entre outras funções. O biocarbono pode encontrar usos mais amplos e eficazes na metalurgia de metais ferrosos com a ajuda do suporte regulatório governamental e de novos avanços tecnológicos.

Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável







BIOCARBONO PARA PRODUÇÃO AÇO VERDE

Aspectos preliminares. O carbono com origem na biomassa é uma alternativa excelente em termos econômico. Enquanto o carvão é extraído das minas, o biocarbono é produzido a partir de matérias-primas renováveis, como resíduos da colheita e extração florestal e do processo industrial da madeira ou resíduos da agricultura e do beneficiamento agroindustrial e sucroenergético com o sistema de pirólise de alta temperatura. Ao contrário do carvão comum, o biocarbono é neutro em dióxido de carbono (zero emissões líquidas de dióxido de carbono).

O biocarbono tem sido visto como uma solução promissora para mitigar as emissões em diversos setores industriais. Uma das áreas atualmente estudadas em relação ao uso de biocarbono é a indústria siderúrgica, com altas emissões de CO₂. Portanto, é essencial pesquisar métodos mais sustentáveis para a produção de aço. Mesmo no processo de forno elétrico a arco (FEA), considerado mais ecológico, o carbono é necessário para a cementação do aço e a formação de espuma na escória, processos essenciais para manter a eficiência energética e proteger o forno.

Industria Siderúrgica Mundial. A indústria siderúrgica está entre as indústrias com maior emissão de CO₂, produzindo cerca de 7% dessas emissões globalmente.

A produção tradicional de aço baseia-se na utilização de matérias-primas virgens, nomeadamente minério de ferro, e grandes quantidades de energia de origem fóssil, como carvão e petróleo. A indústria siderúrgica tem sinalizado uma mudança do uso de altos-fornos para opções mais ecológicas.

A utilização de carvão fóssil e coque, mesmo em um forno elétrico a arco (FEA), constitui uma parcela significativa, variando de 40% a 70% das emissões diretas totais do processo de fabricação de aço.

Em países onde as emissões de CO₂ são reduzidas com sucesso através da utilização de energias renováveis, a formação de espuma na escória em fornos elétricos a arco (FEA) continua a ser uma fonte significativa de emissões de CO₂, representando 15% de todas as emissões relacionadas com a produção de aço. Na formação de espuma na escória, o aprisionamento de bolhas de gás dentro da escória ocorre quando um material contendo carbono reage com o óxido de ferro presente na escória. A formação de espuma de escória é uma técnica comum em operações de forno elétrico a arco (EAF), proporcionando vantagens como redução do consumo de energia, proteção do revestimento do forno e redução do desgaste dos eletrodos.

Em países capazes de produzir muita eletricidade verde, as emissões totais da siderurgia poderiam ser reduzidas ainda mais drasticamente com o uso de biocarbono. Para atingir as metas europeias de sustentabilidade, a indústria siderúrgica tem sido vista como uma das soluções mais fáceis de implementar para reduzir as emissões. O aço é um material valioso devido às suas inúmeras aplicações que impactarão o futuro sustentável.

O aço também pode ser reciclado infinitamente sem alterações nas propriedades que o tornam um material viável na perspectiva da economia circular.

De acordo com algumas estimativas, a fabricação de aço a partir de sucata de aço usando forno elétrico a arco (EAF) consome até 10 vezes menos recursos em comparação com a produção de aço virgem.

Produção Sustentável de Ferro e Aço. As principais linhas de atividade atuais na produção sustentável de aço são a redução do minério de ferro em ferro metálico com base em hidrogênio e a utilização de materiais circulares e de biocarbono na produção de aço.

Na cadeia primária do processo de fabricação do aço, a redução por hidrogênio tem demonstrado desempenhar um papel significativo. Nessa tecnologia, os minérios de ferro são reduzidos utilizando hidrogênio. Como resultado, produz-se ferro de redução direta (DRI). O DRI também pode ser produzido por outras vias. O DRI pode ser reprocessado em aço em fornos elétricos a arco (FEA), onde o carbono é necessário. Na rota atual de FEA baseada em sucata, as emissões de carbono podem ser mantidas baixas, desde que a eletricidade necessária seja gerada a partir de fontes de energia renováveis.

O biocarbono tem sido visto como uma solução para diminuir as emissões de gases de efeito estufa e substituir os combustíveis fósseis na produção de aço.

No entanto, existem algumas incertezas e desafios tecnológicos relacionados ao uso de biocarbono na indústria siderúrgica, como capacidade de redução de emissões, viabilidade econômica e estabilidade mecânica limitada.

Atualmente, os biocarbonos não conseguem competir com o carvão de origem fóssil em termos de preço, principalmente devido à cadeia de valor relativamente complexa, desde a fonte da matéria-prima, passando pelo processamento, até a localização da produção. Além disso, nem todas as matérias-primas são adequadas para todas as aplicações, pois as propriedades do biocarbono variam de acordo com a matéria-prima.

Fabricação de aço e o forno elétrico a arco. O aço é uma liga de ferro e carbono, e o aço primário é produzido a partir de minérios de ferro e carbono. Atualmente, existem duas principais rotas de processo utilizadas na fabricação de aço: a produção de aço em forno de oxigênio básico (BOF) e a produção de aço em forno elétrico a arco. A forma tradicional de produzir aço é através do processo BF-BOF, que representa aproximadamente 75% da produção mundial de aço. A rota do alto-forno pode ser usada para produzir principalmente produtos planos, e a rota do forno elétrico a arco pode ser usada para produzir produtos longos.

No entanto, a tendência é usar fornos elétricos a arco na fabricação de produtos planos. O tipo de aço utilizado define o tipo de mistura de óxido de ferro e sucata de ferro a partir da qual ele pode ser produzido. A produção de arame de aço, produtos finos e tiras estreitas de aço requer aço de alta pureza e sucata de ferro de alta qualidade.

Portanto, praticamente nenhuma sucata de ferro pode ser utilizada na produção dos produtos mencionados. Atualmente, a maior parte do aço proveniente de fornos elétricos a arco (FEA) é produzida na forma de tarugos e blocos, enquanto apenas uma pequena parcela é transformada em placas.

No processo de alto-forno, o carvão é usado como redutor, e o sinter, os pellets e o minério granulado são usados como componentes contendo ferro. Em um forno elétrico a arco, a eletricidade é usada para fundir sucata e reduzir diretamente o ferro. Nos altos-fornos, os metais líquidos são reduzidos de forma rápida e eficiente a partir de materiais ferrosos.

No entanto, é a principal fonte de emissões de CO₂ na siderurgia, juntamente com as máquinas de sinterização e os fornos de coque. Existem outros métodos, em parte teóricos ou em fase piloto, para a produção de aço, como o alto-forno modificado com captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), o ferro de redução direta, o forno de fundição elétrica (DRI-ESF) e a redução eletroquímica por eletrólise.

A tecnologia ESF tem sido vista como uma potencial substituta da tecnologia de alto-forno. Em fornos de arco elétrico, são necessários de 5 a 10 kg de carbono injetado para realizar o processo de formação de espuma. Além disso, adiciona-se material de carbono aos materiais carregados para carburizar o metal fundido, fornecendo calor químico durante a oxidação do carbono. Atualmente, são utilizados aproximadamente 12 kg de carbono fóssil por tonelada de aço produzida, representando 40% a 70% das emissões produzidas diretamente no processo de fabricação de aço por arco elétrico.

Biocarbono. O biocarbono é um material rico em carbono produzido a partir de matérias-primas de base biológica, mais comumente por pirólise. Durante a pirólise, a matéria orgânica é aquecida a altas temperaturas em um ambiente com baixo teor de oxigênio.

Recentemente, tornou-se uma alternativa séria e ambientalmente sustentável para um grande número de aplicações diferentes.

O biocarbono pode atuar como um sumidouro de carbono e pode ser carbono negativo com o processo de produção correto.

O biocarbono pode ser produzido utilizando diferentes matérias-primas, incluindo lodos de esgoto, esterco e biomassa que, de outra forma, seriam difíceis de utilizar. O biocarbono deve ser produzido próximo às matérias-primas, com seu local de aplicação e infraestrutura adequada para garantir a viabilidade econômica e o impacto ecológico desejado. Além disso, algumas biomassas de crescimento rápido, como milho, cana-de-açúcar e sorgo, podem ser utilizadas. No entanto, suas propriedades, como porosidade e composição química, variam de acordo com a matéria-prima e os parâmetros do processo de produção.

A temperatura de pirólise e a taxa de aquecimento afetam o rendimento de biocarbono no processo de pirólise. Os parâmetros do processo também definem a quantidade de fluxos laterais usados para a produção de biocarbono, como óleo de pirólise.

Desafios de produção do Biocarbono. Os biocarbonos ainda apresentam desafios que podem limitar seu uso. Um deles é o preço que é altamente afetado pela logística da matéria-prima; se a distância de transporte (com alta umidade) for muito longa, o preço até mesmo de um material de baixo custo facilmente se torna inviável e os benefícios ambientais.

A matéria-prima deve estar disponível e possuir propriedades físicas e químicas adequadas para pirólise. A pirólise de materiais que não atendem a esses requisitos pode exigir tecnologias associadas a altos investimentos de capital.

Uma solução para mitigar custos e outros problemas relacionados à logística seria produzir biocarbono próximo à fonte da matéria-prima, mas isso pode afetar as economias de escala da produção. Uma solução consiste em usar o mesmo biocarbono várias vezes em diferentes aplicações.

Biocarbono na produção de aço. De modo geral, o biocarbono tem demonstrado desempenhar diversas funções potenciais na produção de aço. Uma delas é utilizá-lo como substituto do carvão no processo de alto-forno, mas apenas 30% do carvão pode ser substituído por biocarbono. Utilizando biocarbono como substituto de uma pequena parte do carvão mineral e substituindo o coque na produção de ferro-gusa e sinterização, a pegada de carbono tanto do ferro-gusa quanto do aço pode ser reduzida. Além disso, os biocarbonos podem substituir os combustíveis fósseis no alto-forno para a produção de ferro e aço.

Esse processo inclui a substituição do carvão ou sua mistura com carvão na produção de coque, a substituição do coque fino pela sinterização do minério de ferro e o processo de pelletização/briquetagem mencionado anteriormente para a produção de pelotas metalizadas.

A substituição da injeção de carvão tem sido vista como a opção mais economicamente viável e tecnologicamente simples para produtos de biomassa usados em uma usina siderúrgica integrada. O biocarbono também poderia substituir a injeção de carvão fóssil em fornos elétricos a arco, e os briquetes de biocarbono podem ser usados como carbono carregado em testes piloto de fusão em forno elétrico a arco (EAF) com resultados otimistas.

Uma descoberta significativa foi que a velocidade de reação do biocarbono é maior em comparação com o carvão antracito comumente usado. Além disso, se os parâmetros do EAF não estiverem adequadamente ajustados, isso leva a um aumento no teor de $Fe \times O$ y na escória, causando menor formação de espuma e, portanto, produção limitada.

Além disso, o uso de biocarbono como carbono de injeção ainda tende a apresentar problemas como alta reatividade, o que limita a duração da formação de espuma na escória, e penetração limitada na camada de escória devido à sua baixa densidade.

O biocarbono pode ser utilizado como agente espumante de forma semelhante ao pó de coque. O biocarbono à base de biomassa lenhosa já é utilizado na produção de aço no Brasil.

Os biocarbonos à base de madeira frequentemente contêm quantidades muito baixas de carbono fixo e muita matéria volátil, características que geralmente são inversamente desejáveis quando são utilizados como agentes redutores metalúrgicos.

Desafios na utilização de biocarbono para a produção de ferro e aço. O biocarbono pode ser extremamente inflamável, e as partes em decomposição são especialmente propensas à combustão lenta. Na presença de oxigênio, existe a possibilidade de que as pilhas de biocarbono entrem em combustão espontânea. Além disso, o biocarbono seco pode gerar poeira no ambiente. Essa poeira não representa um desafio apenas para o meio ambiente; ela pode, por exemplo, obstruir os rolamentos das esteiras transportadoras. Ademais, o atrito das esteiras pode causar riscos de incêndio. Para mitigar esses desafios, o biocarbono pode necessitar de umedecimento ou briquetagem. O biocarbono também apresenta densidade menor em comparação com o carvão fóssil, que é mais pesado. Portanto, partículas maiores de biocarbono podem passar por equipamentos de triagem calibrados para carvão fóssil.

O biocarbono em pó também apresenta uma taxa de fluxo maior em comparação com o carvão, mas isso não afeta o processo no forno.

O biocarbono pode representar um desafio para os detectores de metais dos sistemas de transporte.

As razões estimadas para isso são a presença de fragmentos metálicos no biocarbono ou no grafite, que é um material condutor. Esse desafio pode levar a perdas de material no processo.

As propriedades químicas do biocarbono podem representar desafios para a qualidade do ferro bruto. Por exemplo, a relação cálcio-silício foi mais positiva em comparação com o carvão fóssil, enquanto o lado negativo foi o maior teor de fósforo, potássio e zinco.

Fósforo e potássio são típicos de materiais à base de madeira, mas a origem do zinco foi estimada como sendo pregos de resíduos de demolição.

A composição química do biocarbono pode afetar as propriedades e o uso final do aço, e a presença de substâncias nocivas pode afetar o valor do aço. Portanto, a qualidade do biocarbono utilizado deve ser adequada. Custos adicionais no uso de biocarbono podem ocorrer se a eficiência do processo for comprometida. Por esses motivos, a origem da matéria-prima é importante.

A utilização de biocarbono como coque requer sua briquetagem prévia. Essa ausência pode acarretar problemas relacionados à baixa resistência mecânica e à baixa densidade aparente do material, o que exigiria um consumo significativo de biocarbono, reduzindo a quantidade disponível para minério de ferro. Além disso, o curto tempo de combustão do biocarbono não seria suficiente para a redução do ferro. A baixa massa do biocarbono também resulta em menor capacidade de carga no transporte. Ademais, as partículas leves de biocarbono podem ser levadas para sistemas de remoção de poeira.

Todos esses problemas mencionados podem ser contornados, em certa medida, pela briquetagem do biocarbono. Em comparação, o carbono comum ou matérias-primas similares (como derivados de petróleo) precisam passar por um processo de coqueificação antes de serem utilizados como fontes de calor em processos industriais. Portanto, o coque é produzido a partir de diversos materiais, como carvão e substâncias derivadas do petróleo.

Um desafio comumente reconhecido é a oferta significativamente menor em comparação com a demanda potencial. As cadeias de suprimentos também são complexas e os processos de licenciamento consomem tempo e recursos.

Os biocarbonos poderiam ser usados na siderurgia se as taxas de produção e entrega fossem estáveis. O maior desafio relacionado ao biocarbono é criar um equilíbrio entre produção, demanda e preço.

Os problemas reconhecidos que podem afetar a viabilidade do processo de pirólise são a disponibilidade da matéria-prima, seu manuseio, seus impactos ambientais e seus efeitos no balanço energético. A matéria-prima também pode afetar o uso do biocarbono. O calor residual gerado na produção de biocarbono é utilizado na secagem da biomassa, uma das opções exigidas pelas normas para biocarbono. Sem a utilização do calor residual, o biocarbono produzido não atende aos requisitos para certificação.

É importante ressaltar que já existem processos que visam atingir uma taxa de utilização de 100% do calor residual.

Facilitadores e impulsionadores do uso de biocarbono. Quando as emissões são compensadas por biocarbono, é possível vender certificados de compensação de emissões. A viabilidade econômica baseia-se em licitações que destacam a importância de uma baixa pegada de carbono em projetos públicos. A certificação afirma que benefícios econômicos devem ser alcançados se o biocarbono for usado em vez do carvão.

Em regiões onde se aplicam licenças de emissão na indústria siderúrgica (UE, Canadá, Austrália), os benefícios podem ser alcançados por meio da redução das emissões de CO₂. Quando o CO₂ é emitido, as empresas precisam pagar por licenças de emissão para cada tonelada de dióxido de carbono liberada. Se forem necessárias menos licenças de emissão para cobrir as emissões, a empresa precisará de menos licenças, e as licenças excedentes poderão ser vendidas.

Os biocarbonos têm demanda global, mas o transporte de longa distância parece ser um problema. O biocarbono deve ser usado localmente para ser economicamente viável.

Implicações práticas. Os biocarbonos têm um potencial significativo na produção de aço para reduzir as emissões de CO₂. No entanto, alguns desafios precisam ser superados antes de seu uso em larga escala. O biocarbono não é um produto único, mas suas propriedades variam de acordo com a matéria-prima utilizada na produção, seu preparo e o processo de pirólise.

Podem existir diferenças na porosidade, teor de carbono, teor de HSA (hidrocarbonetos de amônio e sódio), matéria volátil e outras substâncias.

Especialmente na indústria siderúrgica, menor densidade, estrutura mecânica e composição química foram reconhecidas como problemas que podem afetar os processos de produção de ferro e aço ou as propriedades do produto final. O biocarbono também é propenso à autocombustão, o que dificulta seu manuseio, armazenamento e transporte. No processo de forno elétrico a arco (EAF), existem algumas diferenças ao se utilizar biocarbono em vez de coque, como tempos de reação mais rápidos, que podem afetar a formação de espuma no aço e, conseqüentemente, as taxas de produção.

Matérias-primas e viabilidade econômica. Nem todas as matérias-primas são adequadas para o processo de pirólise, por exemplo, devido ao baixo teor energético ou ao teor de umidade excessivo. Esses materiais não conseguem sustentar o processo de pirólise, necessitando de energia externa, o que torna o processo endotérmico. Atualmente, muitos fluxos laterais são subutilizados, sendo empregados em aplicações de baixo valor agregado, incinerados, descartados em aterros sanitários ou deixados para apodrecer, o que representa um desperdício de potencial para a produção de biocarbono.

Muitos tipos de biomassa subutilizada existem não apenas no Brasil, mas também globalmente, e uma solução poderia ser a mistura de diferentes biomassas para obter propriedades adequadas à produção de aço.

Isso poderia reduzir a necessidade de madeira como matéria-prima, reduzindo potencialmente o preço. Tal medida exigiria uma avaliação sistemática de diferentes biomassas e seus usos. Na Europa, são produzidas anualmente cerca de 150 milhões de toneladas de aço, das quais aproximadamente 45% são fabricadas em fornos elétricos a arco.

Este valor corresponde a aproximadamente 67,5 milhões de toneladas de aço por ano. Nas operações de forno elétrico a arco (EAF), o biocarbono é necessário tanto para a cementação do ferro, a aproximadamente 20 kg por tonelada, quanto para a formação de espuma na escória, a aproximadamente 12 kg por tonelada, totalizando 32 kg por tonelada de aço.

Com base nisso, a demanda anual de biocarbono seria de aproximadamente 2,16 milhões de toneladas. Em contraste, a rota do conversor requer aproximadamente 770 kg de carbono por tonelada de aço.

A produção de uma das maiores operadoras é de aproximadamente 6 milhões de toneladas de aço anualmente, o que corresponderia a uma necessidade de apenas 192.000 toneladas de biocarbono, se toda a produção fosse realizada via EAF utilizando sucata e ferro de redução direta. Uma instalação típica de produção de biocarbono tem uma capacidade máxima de aproximadamente 4.500 toneladas por ano.

O biocarbono pode ser produzido a partir de biomassa de crescimento rápido que fixa o carbono de forma eficaz durante seu crescimento como o capim elefante, sorgo e cana-de-açúcar.

Na fabricação de aço, o carbono se liga ao aço, resultando em armazenamento de carbono a longo prazo.

Quando o biocarbono é usado na rota do forno elétrico a arco (EAF) combinada com a redução do ferro por hidrogênio, as emissões líquidas de CO₂ podem ser reduzidas. Mesmo a adição de apenas 2% a 10% de biocarbono a uma mistura de carvão pode reduzir as emissões de CO₂ em 1% a 5%. O Sistema Europeu de Comércio de Emissões (EU ETS) pode incentivar as empresas a reduzirem suas emissões de CO₂. A ideia do EU ETS é que as emissões de CO₂ sejam reduzidas onde for mais barato. Para as empresas, onde a redução de emissões é dispendiosa, pode ser mais barato comprar licenças de emissão do que investir em tecnologias que reduzam as emissões.

A produção de biocarbono por pirólise gera grandes quantidades de calor residual, e as certificações de biocarbono exigem sua utilização. O fornecedor de tecnologia pode utilizar calor residual no processo de secagem da biomassa. Outra alternativa seria utilizá-lo em redes de aquecimento urbano. Isso reduz a necessidade de outras fontes de energia, mas, por outro lado, pode ser uma solução desafiadora se a produção de biocarbono estiver localizada longe do centro urbano. Quando o calor residual é utilizado nos processos de secagem da biomassa, o calor se torna parte da biomassa. A biomassa seca possui muitas propriedades positivas. Por exemplo, é economicamente mais viável transportá-la do que a biomassa úmida. Além disso, quando a biomassa seca é utilizada como combustível em usinas de energia, a combustão é mais eficiente e ocorrem menos falhas.

Cadeia de valor e propostas. A cadeia de valor do biocarbono é muito sensível. O preço do biocarbono pode ser afetado pelo preço da matéria-prima, pelo seu transporte e processamento, e pelo custo do transporte do próprio biocarbono. O carvão fóssil é relativamente mais barato, e os únicos custos associados à cadeia de valor, ou seja, mineração e transporte, além de estar disponível em maiores quantidades.

No entanto, mesmo sem os custos de transporte e mineração, o preço do carvão fóssil ainda é mais economicamente viável em comparação com o biocarbono.

Para que o preço do biocarbono seja competitivo, o preço da matéria-prima precisa ser baixo, gratuito ou até mesmo negativo (a matéria-prima deve ser indesejada pelo produtor/proprietário, que arcará com os custos de descarte), o biocarbono deve ser produzido próximo à matéria-prima e o processo de produção do biocarbono deve ser o mais eficiente possível. Isso pode exigir, por exemplo, o aproveitamento de alto valor agregado do calor residual na produção de outros produtos.

Como resultado, propomos as seguintes questões, com base em implicações empíricas e descobertas teóricas, que podem viabilizar a produção e o uso de biocarbono de forma economicamente eficiente na fabricação de aço.

Projeto Biocarbono Estados Unidos. Após um ano de pesquisa, os pesquisadores superaram alguns dos obstáculos ao uso de carbono de base biológica no processo de fabricação de aço por arco elétrico.

A pesquisa está sendo conduzida no Instituto de Pesquisa de Recursos Naturais (NRRI) da Universidade de Minnesota, como um projeto de US\$ 4,5 milhões, financiado por uma verba de US\$ 2,9 milhões do Departamento de Energia dos EUA, com uma contrapartida de US\$ 1,6 milhão proveniente de fundos internos do NRRI e da indústria.

Biocarbono para as indústrias siderúrgicas. Uma recente viagem de líderes de pesquisa à Cúpula Europeia de Biocarbono revelou que as siderúrgicas estão prontas e aguardando um produto de biocarbono que possa substituir o carvão fóssil no processo de fabricação do aço.

A produção de aço responde por cerca de 8% das emissões globais de carbono. E embora o planeta Terra tenha sido muito eficaz na transformação de biomassa em carvão ao longo de milhões de anos sob alta pressão e calor, replicar isso na superfície em tempo real apresenta alguns desafios interessantes.

Aço 101: O aço é uma liga de carbono e ferro. É um material essencial para a segurança nacional e a prosperidade econômica. No processo de fabricação de aço em forno elétrico a arco, carvão fóssil pulverizado é injetado na escória fundida próximo ao final do processo de fusão.

Isso produz uma reação de formação de espuma que isola o aço fundido, retendo o calor, além de auxiliar na remoção de impurezas como enxofre e proteger o revestimento de escória no refratário.

A limitação da biomassa processada por pirólise (biocarvão) reside na sua baixa densidade. Além disso, o processo de injeção utiliza pressão pneumática para transportar o material através da escória.

A fonte de carbono precisa ser robusta o suficiente para suportar a transferência para o forno. Para além do transporte, o comportamento do biocarvão na escória não é o ideal. Por si só, a reação de formação de espuma do biocarvão é demasiado violenta.

A espuma sobe rapidamente e dissipa-se também muito depressa. A formação de espuma com carvão injetado eleva a escória alguns centímetros e mantém essa reação. O tempo e a altura, a cinética, é o que estamos a tentar controlar.

O desafio para os pesquisadores do NRRI é densificar o biocarbono poroso e de baixa densidade para que funcione tão bem quanto o carvão fóssil. Ao experimentar diferentes modificadores de desempenho e testar vários aglutinantes, eles desenvolveram um biocarbono que imita essa reação semelhante à do carvão em escala laboratorial e piloto.

O material de biocarbono granulado foi testado com sucesso em ensaios de ampliação de escala intermediária de 25 quilogramas em um forno elétrico a arco de uma usina de reciclagem de aço.

Carga de carbono. O próximo objetivo da pesquisa é desenvolver a “carga de carbono”, que é adicionada à sucata de aço e ao ferro metálico no início do processo de fusão para fornecer energia e atuar como agente redutor.

A meta é demonstrar com sucesso o uso de biocarbono nessas etapas de fabricação de aço em escala comercial, em uma usina siderúrgica com forno elétrico a arco em 2026. Portanto, esse é o foco desta verba do Departamento de Energia. Na última década, a densificação de biocarbono, embora este seja um produto muito mais complexo e refinado do que os que tentamos no passado. As equipes de pesquisa integradas do NRRI possuem qualificação única para desenvolver soluções industriais de base biológica.

Os 12 cientistas da equipe de Materiais e Bioeconomia do NRRI trabalham com 10 engenheiros e técnicos da equipe de Minerais e Metalurgia do NRRI, e a equipe de pesquisa de Florestas e Terras do NRRI pode fornecer análises críticas da produção madeireira dos EUA para orientar a disponibilidade de biomassa.

Uma análise do ciclo de vida também faz parte do projeto para compreender os impactos ambientais do biocarbono na siderurgia, bem como uma análise técnico econômica para informar os impactos nos custos da indústria.

Em busca de parceiros globais . Para acelerar essas inovações, os pesquisadores do NRRI estão buscando ativamente parcerias de pesquisa em todo o mundo — empresas siderúrgicas, fornecedores de biomassa, produtores de biocarvão ou outras partes interessadas.

O NRRI está realmente na vanguarda do desenvolvimento de carbono metalúrgico industrial devido à ampla experiência em diversas disciplinas que se cruzam nessa área.

O Instituto de Pesquisa de Recursos Naturais é uma unidade de pesquisa do Sistema da Universidade de Minnesota, com autorização estadual, e três locais no norte de Minnesota, cuja missão é fornecer soluções de pesquisa integradas que valorizem nossos recursos, meio ambiente e economia para um futuro sustentável e resiliente.

Descarbonização do aço. A SDI Biocarbon Solutions é uma joint venture entre a Steel Dynamics e a fornecedora de tecnologia Aymium. A Steel Dynamics é a terceira maior produtora de aço dos Estados Unidos, com produção totalmente baseada em fornos elétricos a arco.

A Steel Dynamics está no caminho certo para atingir emissões líquidas zero até 2050, de acordo com Hansen. Destacando o projeto eólico Canyon Wind de 308 MW da empresa, no oeste do Texas, que está atualmente em andamento, ele afirmou que o projeto tem um potencial significativo de redução de carbono para a empresa — toda essa energia será usada nas operações da Steel Dynamics.

Funde sucata com eletricidade, então ter uma baixa pegada de carbono em relação a essa eletricidade é importante. Como organização, consome cerca de 8 gigawatts-hora por ano — isso é muita eletricidade. Mas o biocarvão, a biomassa, o biochar — as coisas em que todos vocês estão trabalhando — essas coisas já estão aqui, estão disponíveis agora, e são soluções baseadas na natureza, então fazem muito sentido.

SDI Biocarbon Solutions. O biocarvão produzido na SDI Biocarbon Solutions substituirá o carvão antracito usado no processo de fabricação de aço.

Grande parte do carvão antracito vem da região leste dos Estados Unidos, mas também de outros países, importado de lugares como a Rússia e a Ucrânia.

Com um investimento de capital superior a US\$ 300 milhões, a planta da SDI está localizada em uma área de 36 hectares e tem capacidade para produzir mais de 200.000 toneladas de biocarvão anualmente. A fase inicial de operação está em andamento. É uma redução de até 35% em nossas emissões de Escopo 1. E o processo é relativamente simples. Coletamos pinheiros amarelos do sul da região... trituramos até o tamanho apropriado, secamos e utilizamos pirólise de biomassa para convertê-los em carbono de alta fixação... pelletizamos o material e o armazenamos para envio à siderúrgica, seja por caminhão ou trem.

O produto final também poderá ser enviado para outras usinas da Steel Dynamics que não estejam localizadas perto do Mississippi, acrescentou. Em relação às emissões e ao controle ambiental na planta, a unidade da SDI Biocarbon Solutions possui uma pequena estação de tratamento de água para resfriamento.

Combate a incêndio e outras necessidades de refrigeração, além de um precipitador eletrostático úmido e um oxidante térmico regenerativo para controle da poluição. É um sistema de controle de emissões de última geração — todas as emissões estão em conformidade com a licença do Título V.

Projeto Vale Biocarbono. A Vale conseguiu pela primeira vez produzir – em escala comercial – uma pelota com qualidade comercial sem o uso de carvão antracito. O teste foi realizado na pelletizadora de Vargem Grande (MG) e a experiência substituiu 100% do combustível fóssil por biocarbono no processo de queima da pelota, aglomerado de minério de ferro utilizado na produção de aço na siderurgia. O biocarbono é um produto renovável, obtido através da carbonização de biomassa e, portanto, de emissão zero.

O carvão antracito é responsável por cerca de 50% das emissões de CO₂ na pelletização, considerado o processo mais intensivo em carbono relativo às emissões diretas da mineradora. Atualmente, a pelletização corresponde a 30% do total do escopo 1. Inicialmente, o teste substituiu 50% do carvão pelo biocarbono, evoluindo gradativamente até chegar a 100%. No total, a Vale produziu aproximadamente 50 mil toneladas de pelotas, das quais 15 mil com 100% de biocarbono de origem certificada.

Realizado apenas em Vargem Grande, o uso do biocarbono significa uma redução de cerca de 350 mil toneladas de CO₂ por ano, o equivalente à emissão de cerca de 75,4 mil carros populares de 1 mil cilindradas por ano. O escopo 2 refere-se às emissões indiretas, provenientes da compra de energia elétrica. No caso da pelletização, o uso do biocarbono é a principal iniciativa pelo fato de haver um grande potencial de produção de biomassa no Brasil. No âmbito das mudanças climáticas, a Vale está investindo entre US\$ 4 bilhões e US\$ 6 bilhões para reduzir em 33% suas emissões diretas e indiretas até 2030, alinhada ao Acordo de Paris, com o objetivo de se tornar net zero em 2050.

Além disso, até 2035 a mineradora se comprometeu a cortar em 15% suas emissões de escopo 3, relacionados à cadeia de valor (fornecedores e clientes). "A agenda climática é prioridade para a Vale. Por exemplo, desde 2020 a companhia adota um preço interno de carbono de US\$ 50 por tonelada de CO2 equivalente ao avaliar a alocação de capital em novos projetos.

Para alcançar tais objetivos, a Vale tem investido em tecnologias de baixo carbono, como a utilização de caminhões elétricos de 72 toneladas, já em operação na Indonésia e em Minas Gerais e em cerca de 50 equipamentos de mina subterrânea no Canadá. Entre os avanços no escopo 2, o início da operação da usina do Sol do Cerrado, em Jaíba (MG), considerada uma das maiores plantas solares do país, com capacidade para gerar energia suficiente para o abastecimento de uma cidade com cerca de 30 mil habitantes.

No Escopo 3, a mineradora firmou parcerias com mais de 30 clientes siderúrgicos, que representam cerca de 50% das emissões da companhia.

Na pelletização, destacam-se tanto a substituição do antracito pelo biocarbono, derivado de biomassa certificada de origem vegetal, quanto a substituição do gás natural e do óleo combustível pelo biometano. Para diminuir o consumo de diesel nos equipamentos de mina, opções como biocombustíveis ou eletrificação podem ser adotadas.

O biocarbono é um produto renovável, obtido pela carbonização de biomassa, considerado de emissão zero. O carvão antracito corresponde a cerca de 50% das emissões de CO2 na pelletização, que, por sua vez, é o processo mais intensivo em carbono considerando as emissões diretas.

Atualmente, a pelletização corresponde a 30% do total do escopo 1. O teste foi iniciado com taxa de substituição de 50% do carvão pelo biocarbono, evoluindo gradativamente até chegar a 100%. No total, foram produzidas cerca de 50 mil toneladas de pelotas, das quais 15 mil contavam com 100% de biocarbono de origem certificada.



LIVROS TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCARBONO

<https://www.brasilbiomassa.com/livrosbiocarbono>

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCARBONO



EDITORA BRASIL BIOMASSA

2026



Potencial para o desenvolvimento de briquetes de biocarbono para a indústria de fundição

Elsayed Mousa 1,3,* , Mania Kazemi 1, Mikael Larsson 1, Gert Karlsson 2 e Erik Persson 2

1 Swerim AB, Box 812, SE-97125 Luleå, Suécia

2 Operações de Caminhões do Grupo Volvo, SE-40508 Gotemburgo, Suécia

3 Instituto Central de Pesquisa e Desenvolvimento Metalúrgico, Cairo 12422, Egito

Particle size distribution of applied coals: (a) Individual size distribution. (b) Cumulative size distribution. Schematic illustration of hot strength test equipment. Average dry density of developed briquettes R0–R27. Average cold compression strength of developed biocarbon briquettes R0–R27. Average splitting tensile strength (STS) of developed biocarbon briquettes R0–R27. Changes in sample weight and experimental temperature vs. time. Comparison of the normalized gasification rate for the coke samples. Carbon, volatile matter and ash content of briquettes in all recipes.

Higher heating values of briquettes in all recipes. Energy density of briquettes in all recipes. Changes in temperatures and gas flow rates during experiments. Foundry coke and biocarbon briquettes (a) foundry coke before test, (b) foundry coke after test, (c) biochar briquette before test, (d) biochar briquette after test.

Resumo

A indústria de fundição enfrenta atualmente desafios para reduzir os impactos ambientais decorrentes da utilização de combustíveis fósseis. A substituição do coque de fundição por fontes alternativas de carbono renováveis pode levar a uma diminuição significativa no consumo de combustíveis fósseis e na emissão de CO₂ fóssil. A baixa densidade aparente, a baixa densidade energética, a baixa resistência mecânica e a alta reatividade dos materiais de biocarbono são os principais fatores que limitam sua implementação eficiente em fornos cubilô. O presente estudo teve como objetivo projetar, otimizar e desenvolver briquetes contendo biocarbono, especificamente briquetes de biocarbono para uso eficiente em fornos cubilô.

Uma prensa hidráulica de laboratório com pressão de compactação de aproximadamente 160 MPa e moldes de aço inoxidável ($\varnothing = 40$ mm e 70 mm) foram utilizados para a compactação. A densidade, o poder calorífico, a densidade energética, a resistência mecânica e a reatividade dos briquetes de biocarbono foram medidos e avaliados.

A resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral dos briquetes de biocarbono foram medidas por um dispositivo de compressão. A reatividade dos briquetes de biocarbono foi medida sob condições controladas de temperatura e atmosfera gasosa utilizando a técnica de análise termogravimétrica (TGA). Diferentes tipos de aglomerantes foram testados para a compactação de finos de carvão vegetal comercial, com ou sem adição de coque fino.

O efeito da proporção de carvão, tamanho das partículas, tipo de aglomerante, proporção de aglomerante, teor de umidade e pressão de compactação na qualidade dos briquetes de biocarvão foi investigado.

Melaço com cal hidratada e cimento se mostraram superiores no aumento da resistência e da densidade energética dos briquetes de biocarvão, em comparação com os demais aglomerantes e aditivos testados.

A resistência dos briquetes diminuiu com o aumento do teor de biocarvão. A formulação ideal consistiu em 62% de finos de carvão vegetal, 20% de melaço, 10% de cal hidratada e 8% de cimento. O cimento é necessário para desenvolver a resistência à tração e a resistência mecânica a quente dos briquetes. O carvão vegetal com alto teor de cinzas apresentou maior resistência dos briquetes, porém menor poder calorífico, em comparação com o carvão com baixo teor de cinzas.

A dispersão de suspensão de sílica nas partículas de carvão durante o processo de mistura foi capaz de reduzir a reatividade do biocarvão nos briquetes de biocarvão produzidos. A densidade e a resistência dos briquetes de biocarvão aumentaram com o aumento da pressão de compactação. A cal hidratada em pó comercial mostrou-se mais eficaz no aumento da resistência dos briquetes em comparação com a cal viva apagada. A ampliação da escala dos briquetes de biocarvão ($\varnothing = 70$ mm) e os testes de resistência mecânica a quente sob carga indicaram o desenvolvimento de fissuras que reduziram significativamente a resistência dos briquetes. É necessário um maior desenvolvimento dos briquetes de biocarvão para atender aos requisitos de um forno cubilô.

Palavras-chave: biocarbono ; biomassa ; indústria de fundição ; forno cubilô ; emissão de CO₂ ; briquetagem

1. Introdução

O processo de fusão na fabricação de metais ferrosos é responsável por grande parte do consumo de energia e das emissões de dióxido de carbono das fundições.

Uma das tecnologias de fusão mais comuns utilizadas para a produção de ferro fundido em grandes volumes é o forno cubilô, onde o coque de fundição é a principal fonte de energia.

Os avanços tecnológicos e a otimização das condições de operação melhoraram a eficiência energética e a produtividade do processo de fusão em cubilô. No entanto, a demanda por redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes de combustíveis fósseis representa um novo desafio para as fundições que utilizam fornos cubilô e para a indústria siderúrgica.

A utilização de fontes renováveis de carbono para a substituição parcial ou total do carbono fóssil no forno cubilô leva à redução das emissões de CO₂ e dos impactos ambientais nas fundições.

Os materiais de biocarbono precisam atender aos requisitos de densidade, resistência e tamanho para garantir o bom funcionamento e a qualidade do produto. Portanto, a compactação de materiais de biocarbono tem sido estudada para aplicação em diferentes tipos de processos.

A substituição do coque de fundição em um forno cubilô por carbono renovável e produtos de biomassa é uma opção para garantir a sustentabilidade desse processo vital; no entanto, a resistência mecânica relativamente baixa, a baixa densidade energética e a alta reatividade da biomassa representam os principais desafios para sua implementação eficiente [1 , 2]. Isnugroho et al. [3] testaram resíduos de biomassa como fonte secundária de energia em um forno cubilô.

A injeção de partículas de carvão vegetal de biomassa, preparadas a partir de resíduos vegetais, aumentou a temperatura no forno e reduziu o consumo de coque. Echterhof et al. [4 , 5] investigaram o potencial de utilização de diferentes biomassas para substituir parcialmente as fontes de carbono fóssil em um forno cubilô.

Os testes de injeção foram realizados em um forno cubilô industrial utilizando biochar composto por 78–80% de carbono fixo e 18–19% de voláteis. A injeção de 100 kg de biochar/h resultou em uma redução da taxa de coque de 8,2–9,2%. A injeção contínua de biochar não foi possível devido ao aumento da temperatura na câmara do forno. Os biomateriais selecionados foram briquetados usando diferentes aglomerantes e a resistência dos briquetes foi comparada à resistência de coques de fundição de referência. Como a resistência mecânica dos briquetes foi baixa, eles não foram testados no forno cubilô [4 , 5].

Diversos estudos foram realizados para desenvolver briquetes de antracito para substituir o coque de fundição em cubilôs [6 , 7 , 8 , 9].

Briquetes feitos de grãos de antracito, lignina, colágeno e silício foram testados em dois cubilôs, com a substituição variando de 12% a 25% [6]. O processo e as condições de fusão permaneceram semelhantes quando o coque foi parcialmente substituído por antracito.

Os briquetes desenvolvidos apresentaram resistência mecânica e eficiência semelhantes às do coque de fundição. No entanto, os briquetes queimaram mais rapidamente do que o coque convencional ao atingirem as ventaneiras [6]. Em uma publicação recente de Noh et al. [7], foi demonstrado que briquetes feitos de antracito, subprodutos vegetais, colágeno e pó de silício metálico possuem resistência adequada em altas temperaturas para substituir o coque em fundições.

A formação de nanofios de carbeto de silício nos briquetes após pirólise a 1400 °C por 2 h resultou em alta resistência mecânica para carregamento superior em forno cubilô. Torielli et al. [8] discutiram a eficácia de diferentes tecnologias inovadoras para reduzir o consumo de coque de fundição, como a substituição do coque por briquetes de antracito, o que resultou em uma redução de 6% na carga total de carbono no cubilô. Gabra et al. [9] relataram uma redução de coque em ~38 kg/t de metal e um aumento na eficiência energética de 43% para 62% pela hibridização do forno cubilô com um gaseificador de biomassa de madeira.

De acordo com suas hipóteses, o gaseificador de biomassa pode ser usado para aquecer o ar de sopro que entra no cubilô a cerca de 475 °C, o que economizará o consumo de coque de fundição no forno cubilô.

Wang et al. [10] investigaram a densificação e gaseificação de pós de biocarvão. A compactação foi realizada utilizando lignina alcalina e amido de trigo como aglutinantes em um equipamento de prensa de rolos. A adição de aglutinantes melhorou a resistência dos briquetes. A gaseificação de pequenas amostras por CO₂ foi estudada a 850 °C utilizando análise termogravimétrica (TGA). Taxas de gaseificação mais elevadas foram observadas em amostras com aglutinante de lignina alcalina.

Isso se deveu à presença de elementos inorgânicos que catalisam a reação de gaseificação do CO₂. Seu trabalho mostrou que diferentes aglutinantes afetam a reatividade e a resistência dos briquetes de biocarvão de maneiras diferentes e, portanto, a aplicação final dos briquetes é afetada pelo tipo de aglutinante utilizado. Em um estudo de Rahman et al. [11], a variação da resistência em briquetes de biocarvão com diferentes tamanhos e formatos foi avaliada. Os briquetes foram feitos de finos de carvão (abaixo de 3 mm) e amido.

Eles misturaram os finos de carvão e a solução de amido utilizando uma técnica de revestimento superficial. Durante esse processo, as arestas afiadas e frágeis das partículas de carvão foram removidas como resultado das forças e do atrito entre as partículas. Isso levou a uma maior densidade aparente e reduziu os defeitos superficiais das partículas de carvão. As misturas foram compactadas usando uma prensa hidráulica de laboratório e uma prensa de rolos em escala piloto.

Os autores observaram que uma menor relação comprimento/diâmetro nos briquetes cilíndricos levou a uma maior resistência superficial.

A resistência à compressão superficial dos briquetes cilíndricos foi 5 vezes maior do que a resistência à compressão pontual dos briquetes em forma de almofada com as mesmas formulações. Iba et al. [12] investigaram a briquetagem de biocarvão derivado da pirólise de resíduos de castanha de caju. O biocarvão com diferentes adições de amido (8–12%) foi briquetado usando uma prensa hidráulica a uma pressão de compactação de 300 kg/cm² . Os briquetes de biocarvão produzidos a partir de biocarvão com tamanho de partícula inferior a 74 µm e 12% de adição de amido apresentaram a maior resistência à compactação (7,6 kg/cm²) .

Apesar do notável potencial de aplicação da biomassa em fundições, poucos estudos se concentraram em testar briquetes de carbono renovável em larga escala. O conhecimento sobre o comportamento dos briquetes em altas temperaturas de processo é escasso.

O principal desafio para o desenvolvimento de compactos de biocarbono é atender às características necessárias para utilização em fornos cubilô. Este trabalho concentrou-se na avaliação de diferentes aditivos e aglomerantes para a compactação do biocarbono e no estudo do comportamento de materiais renováveis em escala laboratorial.

Visando estabelecer as bases para o aumento de escala e futuros desenvolvimentos para a aplicação do biocarbono em fornos cubilô. Os estudos deste trabalho iniciaram-se com a seleção de matérias-primas e o desenvolvimento de formulações. Foram utilizados diferentes tipos e quantidades de coque de fundição, biochar, aglomerantes e aditivos.

As briquetes, em pequena escala, foram avaliadas quanto à densidade, densidade energética, reatividade e resistência mecânica.

Após comparação com amostras de referência, as formulações selecionadas foram utilizadas e modificadas para o desenvolvimento de briquetes maiores. Essas briquetes foram testadas em altas temperaturas e comparadas a amostras de referência de coque de fundição e coque de fundição.

Este estudo forneceu informações úteis sobre o efeito de diferentes parâmetros na compactação do biochar, na seleção de materiais e no desempenho das briquetes em altas temperaturas. As informações são valiosas para o desenvolvimento futuro de briquetes de carbono renovável para testes industriais.

2. Materiais e Métodos

2.1. Preparação de Carvões e Partículas

Dois tipos de carvão vegetal comercial com baixo e alto teor de cinzas, denominados Carvão 1 e Carvão 2, e coque industrial foram utilizados na preparação de briquetes de biocarvão.

As distribuições granulométricas do Carvão 1 e 2 foram medidas e comparadas à do coque, conforme mostrado na Figura 1. A maioria dos tamanhos de partículas para todos os carvões estava na faixa de 0,50–5,6 mm e as frações finas diminuíram na seguinte ordem: Carvão 2 > Carvão 1 > coque.

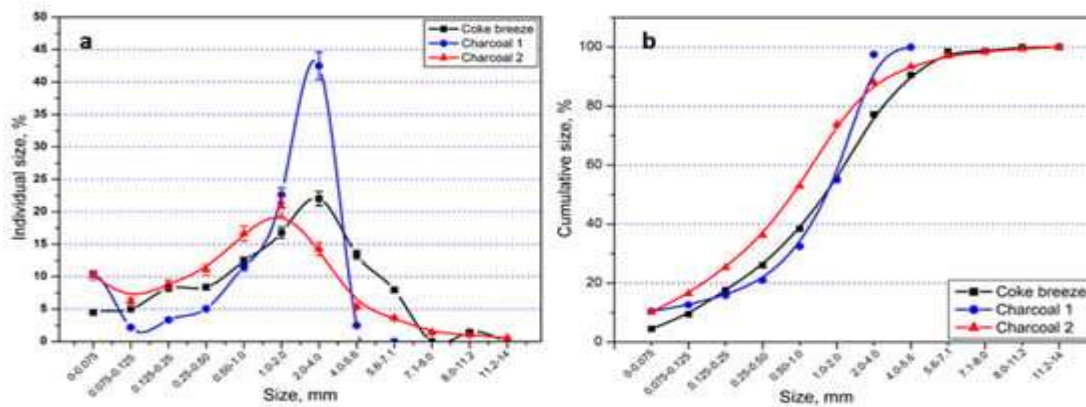


Figura 1. Distribuição do tamanho das partículas dos carvões aplicados: (a) Distribuição individual do tamanho das partículas. (b) Distribuição cumulativa do tamanho das partículas.

2.2. Ligantes selecionados para compactação. Seis diferentes ligantes orgânicos; melação/cal hidratada, alcatrão de madeira, betume, lignina, nanocelulose e keracoal foram selecionados para a compactação de finos de carvão vegetal com/sem adição de cimento Portland e coque fino.

As composições químicas dos ligantes usados no presente estudo, exceto o Keracoal, que é um tipo de ligante orgânico recentemente desenvolvido pela Keramicalia [13].

2.3. Elaboração de Receitas

O projeto ideal da receita para briquetes de biocarvão, dependendo do tipo de aglomerante, da proporção de aglomerante e da pressão de compactação, foi derivado de 27 testes.

A receita de referência (R0) foi produzida com coque de carvão e cimento como aglomerante, enquanto as receitas R1–R6, apresentadas na Tabela , foram produzidas com 45–50% de coque de carvão, 25% de carvão vegetal 1 e 10% de cimento, utilizando diferentes aglomerantes (melaço, alcatrão de madeira, betume e lignina). A pressão de compactação foi fixada em 160 MPa para todas as receitas.

Após a elaboração das receitas, os materiais foram misturados cuidadosamente para produzir misturas homogêneas e garantir a boa distribuição dos aglomerantes. Para a briquetagem, utilizou-se uma prensa hidráulica de laboratório com pressões de compactação de até aproximadamente 160 MPa e um molde de aço inoxidável ($\varnothing = 40$ mm).

Foram desenvolvidas novas receitas para a produção em larga escala de briquetes, utilizando um molde de tamanho maior ($\varnothing = 70$ mm) e pressão de compactação de até ~160 MPa, conforme apresentado na Tabela. Vários briquetes foram produzidos para cada receita sob as mesmas condições de compactação. A reprodutibilidade dos resultados foi verificada para todas as medições. O teor de umidade das misturas e dos briquetes foi medido utilizando o analisador de umidade HB43-S Halogen da Mettler Toledo.

As amostras em grande escala foram testadas em experimentos de alta temperatura. A receita M1, contendo coque de carvão e cimento, foi usada como referência para comparação. Nas receitas M2 a M5, dois tipos de cal hidratada foram comparados. O primeiro tipo de cal hidratada foi preparado em laboratório pela mistura de cal virgem em pó com água.

Após garantir a hidratação completa, a cal hidratada com alto teor de água (cerca de 60%) foi utilizada nas briquetes M2 e M3. A cal hidratada foi adicionada primeiro ao melaço e a mistura resultante foi adicionada à mistura seca de carvão vegetal e cimento. Este método também foi utilizado no desenvolvimento de briquetes menores. O segundo tipo de cal hidratada (CL), utilizado em M4 e M5, era uma cal hidratada comercial na forma de pó fino com baixo teor de umidade (aproximadamente 10%). A cal hidratada comercial era composta por 91% de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e 99% das partículas tinham tamanho inferior a 0,074 mm.

Este material foi selecionado considerando sua disponibilidade como produto comercial, adequação para produção em larga escala e procedimentos aprimorados de preparação e mistura. Em cada receita, a cal hidratada comercial foi misturada com o carvão e o cimento antes da adição do melaço. Nas receitas M6 a M14, utilizou-se cal hidratada comercial (CL) devido às melhores propriedades dos briquetes.

2.4. Determinação das propriedades físicas e da reatividade. A resistência à compressão a frio (CCS) e a resistência à tração por compressão diametral (STS) de briquetes de biocarvão foram medidas por um equipamento de compressão. O dispositivo de compressão registra automaticamente o ponto de resistência máxima, após o qual ocorre a ruptura do briquete. A reatividade de briquetes de biocarvão selecionados foi medida utilizando a técnica de análise termogravimétrica (TGA) Netzsch STA 409, com sensibilidade de $\pm 1 \mu\text{g}$, acoplada à espectrometria de massa quadrupolar (QMS).

Para todos os testes de reatividade, briquetes foram preparados com formatos cúbicos regulares (com aresta de aproximadamente 15 mm). A amostra foi colocada em um cadinho raso e posicionada no centro da câmara de reação do forno.

A taxa de aquecimento foi de 15 K/min, da temperatura ambiente até 1100 °C, sob um fluxo contínuo de CO₂ (200 mL/min) durante toda a reação, sendo então mantida nessa temperatura por 60 min, seguida de resfriamento rápido (20 K/min).

A perda de peso devido à gaseificação da amostra e a composição dos gases gerados foram registradas durante os ensaios.

2.5. Avaliação do comportamento de briquetes em altas temperaturas

Um aparato de teste foi projetado para avaliar o comportamento de briquetes desenvolvidos sob temperaturas, carga mecânica e atmosferas gasosas bem controladas. A ilustração esquemática da configuração experimental é mostrada na Figura 2.

O sistema inclui uma estação de mistura de gases, um aquecedor elétrico a gás, um forno de cadinho com sistema de aplicação de carga e um queimador de gases de exaustão. A temperatura da amostra foi medida usando termopares colocados próximos aos briquetes. A composição gasosa para os experimentos foi selecionada considerando a temperatura atingida na amostra e as composições gasosas correlacionadas na cúpula de um estudo anterior [14].

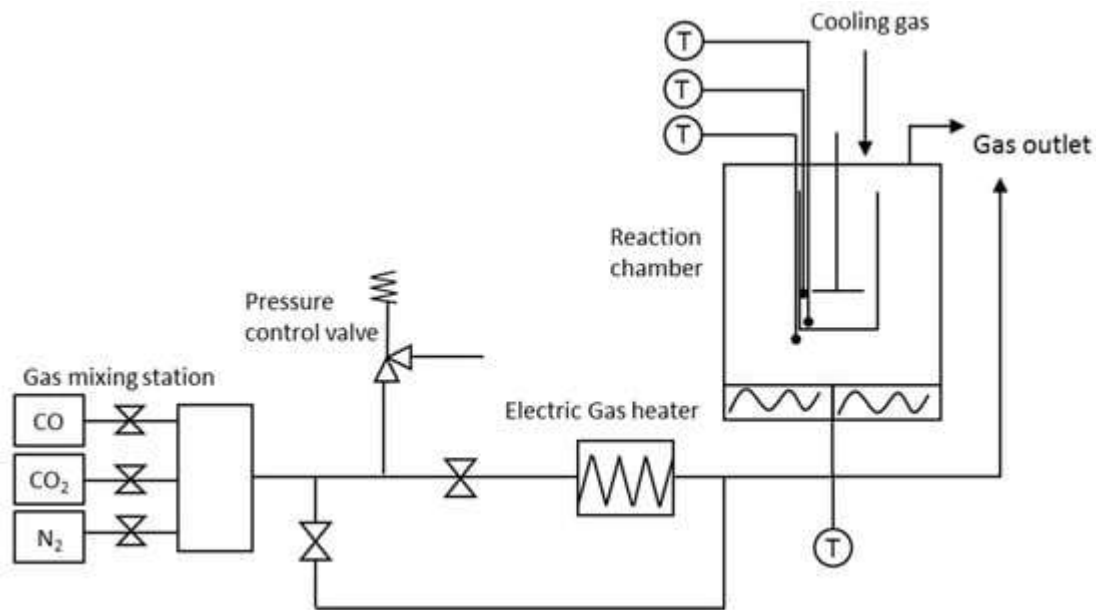


Figura 2. Ilustração esquemática do equipamento de teste de resistência a quente.

Em cada experimento, um dos briquetes ampliados ($\varnothing = 70$ mm) foi testado. O seguinte procedimento foi aplicado nos testes. O briquete foi colocado no suporte de amostra dentro do forno de cadinho e o sistema foi selado.

Para remover o oxigênio residual e proteger a amostra da oxidação, o sistema foi purgado com nitrogênio de alta pureza (99,5%) à temperatura ambiente.

Simultaneamente, o N₂ foi aquecido em um aquecedor elétrico e desviado do fluxo. Quando o N₂ atingiu a temperatura desejada e se estabilizou, a atmosfera do forno foi alterada para o fluxo de N₂ quente e a amostra foi aquecida sob carga.

A carga foi mantida constante em todos os testes e foi de aproximadamente 0,8 kg/cm².

Em alguns experimentos, utilizou-se N_2 quente, e nos demais testes foi utilizada uma mistura de gases redutores composta por 34% em volume de CO, 7% em volume de CO_2 e 59% em volume de N_2 . A amostra foi mantida nessa atmosfera gasosa sob carga por 60 minutos. Em seguida, a carga foi removida e o forno foi purgado com N_2 . A amostra foi resfriada com gás nitrogênio e retirada ao atingir a temperatura ambiente. Os resultados foram avaliados em relação à variação de peso e às alterações estruturais das amostras após os testes.

3. Resultados e Discussão

As características físicas, químicas e mecânicas de briquetes de biocarvão produzidos com diferentes tipos e teores de carvão vegetal, aglomerantes e sob diferentes pressões de compactação foram avaliadas em termos de densidade, resistência mecânica a frio, resistência a quente, reatividade e densidade energética, conforme descrito nas subseções a seguir.

3.1. Densificação do Biocarbono

A Figura 3 mostra a densidade média dos briquetes de biocarvão em comparação com briquetes comerciais de coque de brisa (CBB) e a amostra de referência preparada com coque de brisa e 10% de cimento (R0). Entre todos os tipos de briquetes contendo biocarvão, apenas o R10 atingiu densidade igual à do CBB; no entanto, ainda é inferior à dos briquetes de referência (R0). Os demais briquetes de biocarvão apresentaram densidades inferiores à do CBB.

De modo geral, a densidade dos briquetes diminuiu com o aumento do teor de carvão vegetal. As formulações R7 a R10 apresentaram densidade maior em comparação com as formulações R15 a R27 devido ao maior teor de cinzas no Carvão 2. A comparação entre as formulações R4 e R10, com a mesma composição, mas com carvão vegetal diferente, indicou que a densidade aumentou com o teor de cinzas. Em geral, a densidade dos briquetes diminuiu com o aumento do teor de carvão vegetal.

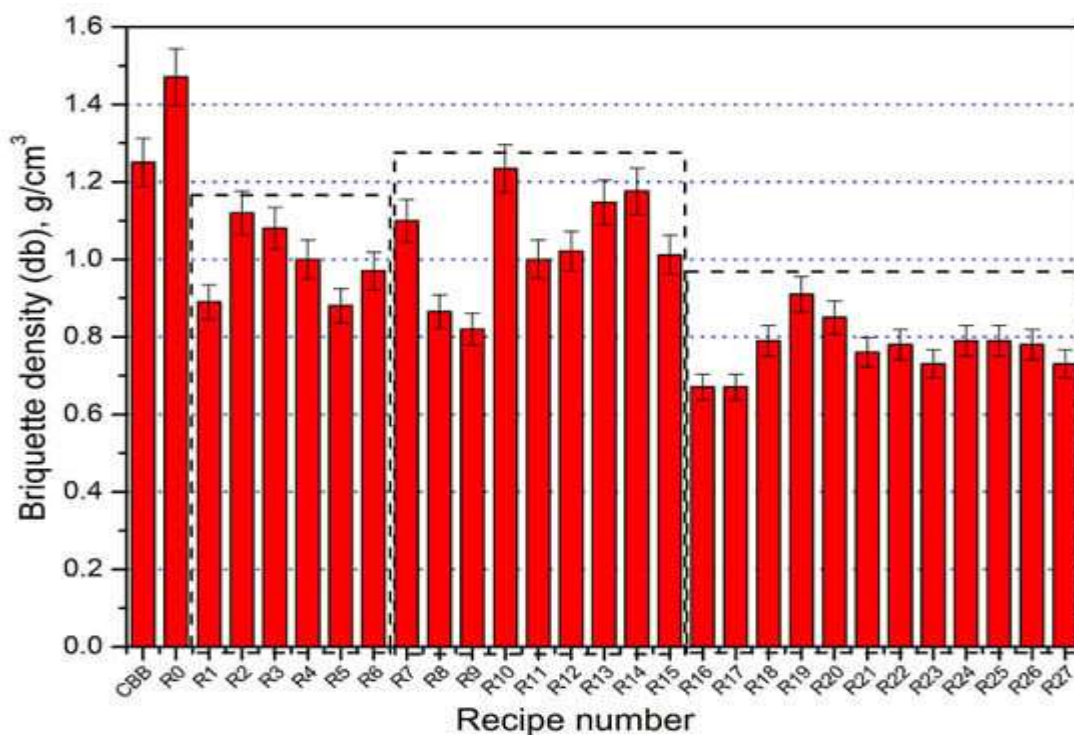


Figura 3.

Densidade seca média dos briquetes desenvolvidos R0–R27.

3.2. Resistência Mecânica a Frio de Briquetes de Biocarvão

A resistência à compressão a frio (CCS) foi medida para todas as formulações, conforme mostrado na Figura 4. A maioria das formulações de biocarvão apresentou maior resistência mecânica em comparação com o CBB.

A formulação R1 se desintegrou espontaneamente, enquanto os maiores valores de CCS foram demonstrados por R8 e R10, superiores ao de R0. Isso indica que o melaço com cal pode fornecer resistência mecânica adequada para briquetes de biocarvão. As formulações R11 e R13–R15 apresentaram valores de CCS semelhantes ao de R0, o que indica que 25% de carvão vegetal pode ser adicionado ao coque sem deteriorar a resistência mecânica dos briquetes.

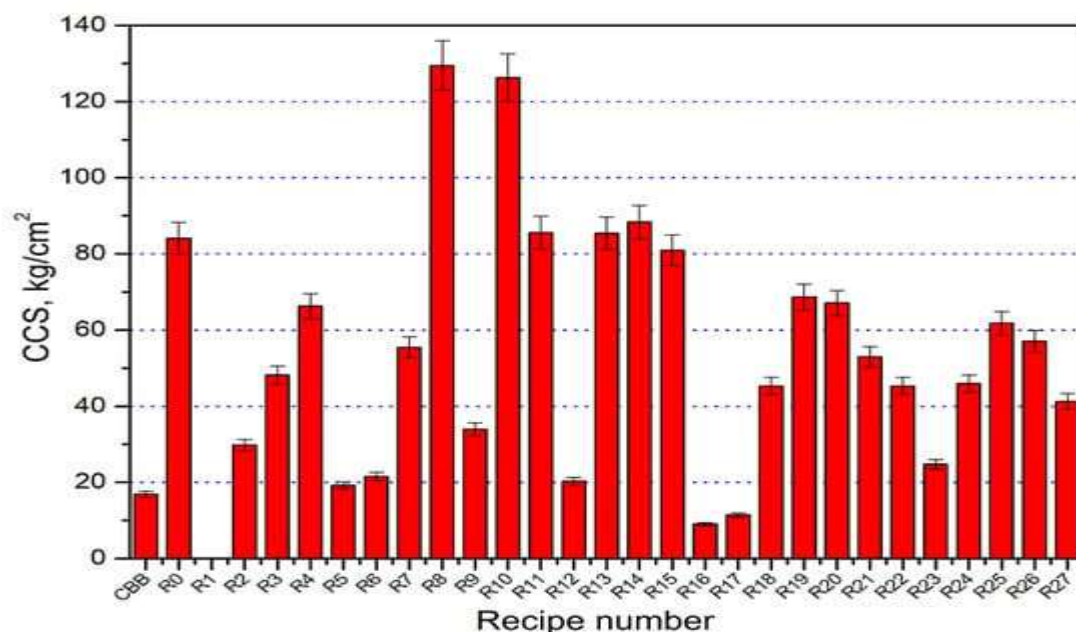


Figura 4.

Resistência média à compressão a frio dos briquetes de biocarvão desenvolvidos R0–R27.

A resistência à tração por compressão diametral (RTD) foi medida para todas as formulações, conforme mostrado na Figura 5.

A RTD para o CBB não foi medida devido à sua geometria diferente (prisma hexagonal), enquanto os briquetes de referência e de biocarvão têm formato cilíndrico, o que permitiu a aplicação da carga na superfície periférica dos briquetes.

Os maiores valores de RTD foram observados para as formulações R15, R13 e R10. Isso indica que tanto o melaço quanto o Keracoal foram superiores em termos de aumento da RTD dos briquetes de biocarvão.

A comparação entre a resistência mecânica de R4 (CCS = 66,25 kg/cm² e STS = 5,18 kg/cm²) e R14 (CCS = 88,37 kg/cm² e STS = 6,38 kg/cm²) indicou que os briquetes produzidos com o Carvão 2 apresentaram maior resistência mecânica em comparação com os produzidos com o Carvão 1. Isso pode ser atribuído ao maior teor de cinzas no Carvão 2 em comparação com o Carvão 1.

A comparação entre R8 e R15 indicou que a adição de cimento deteriorou o CCS, mas melhorou o STS. Não foi encontrada diferença significativa ao alterar o tipo de cimento de cimento Portland comum em R16 para cimento de aluminato de cálcio (CA) em R17.

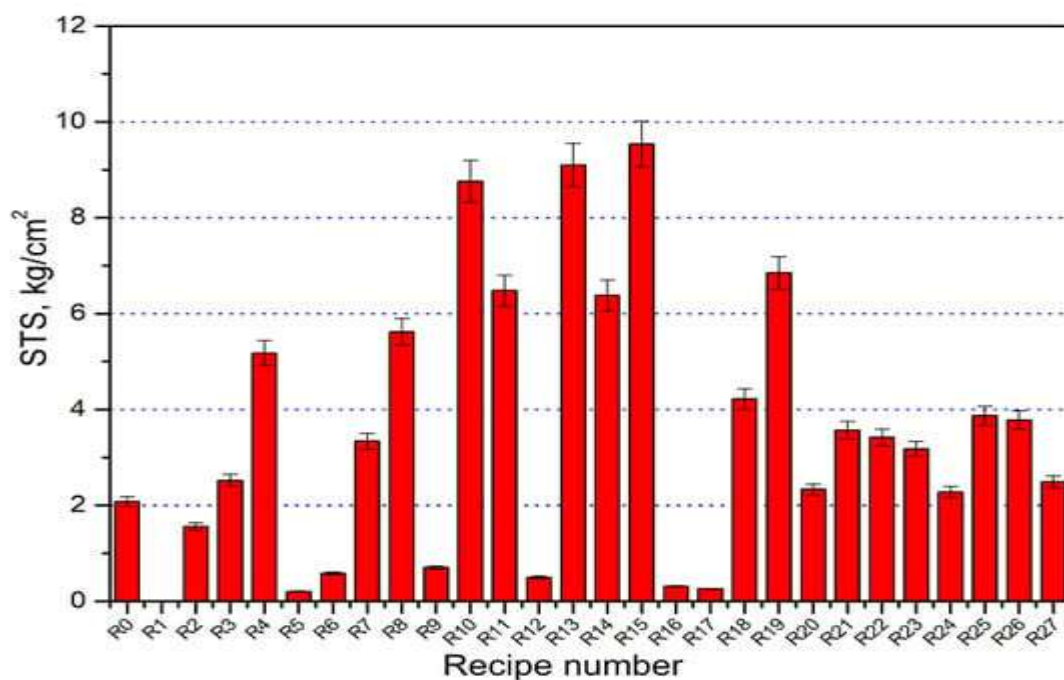


Figura 5.

Resistência média à tração por compressão diametral (STS) dos briquetes de biocarvão desenvolvidos R0–R27.

Em geral, a maioria dos briquetes que apresentaram alta resistência à compressão diametral (CCS) também apresentou resistência à tração por compressão diametral (STS) relativamente maior. A diferença significativa entre a CCS e a STS para todas as formulações pode ser atribuída ao efeito da pressão aplicada na área sob carga. No caso da CCS, a carga é distribuída por toda a superfície dos briquetes, enquanto no caso da resistência à tração por compressão diametral, a pressão é aplicada em um plano estreito nos briquetes.

Esse efeito deve ser considerado se a geometria do briquete (forma, tamanho e dimensão) for alterada, e a resistência medida pode ser usada qualitativamente, em vez de quantitativamente, para avaliar briquetes de biocarvão em larga escala. Diferenças semelhantes na resistência de briquetes cilíndricos foram observadas no trabalho de Rahman et al. [11].

3.3. Reatividade de Briquetes de Biocarvão

A reatividade foi medida para briquetes de biocarvão de receitas selecionadas (R10, R18 e R24) e os resultados foram comparados aos de briquetes de carbono fóssil (R0, CBB e FC), conforme mostrado na Figura 6.

O briquete FC apresentou a menor perda de massa (~10%) e, conseqüentemente, a menor reatividade após gaseificação com CO₂ a 1100 °C por 1 h, enquanto o briquete R18 demonstrou a maior perda de massa (~54%) entre os briquetes testados, o que pode ser atribuído ao maior teor de biocarvão (74% de carvão vegetal). A tendência de gaseificação dos briquetes CBB, FC e R0 foi semelhante, e a perda de massa seguiu a ordem CBB > R0 > FC.

A menor perda de massa (~31%) dos briquetes de biocarvão foi observada no briquete R10, o que pode ser atribuído ao menor teor de biocarvão (25% de Carvão Vegetal 2). Pode-se concluir que o teor de biocarvão nos briquetes é o fator predominante que afeta a reatividade dos mesmos.

Todas as amostras de biocarvão apresentaram uma perda de peso de aproximadamente 8–12% a 250 °C e de aproximadamente 15–30% a aproximadamente 800 °C, o que pode ser atribuído à decomposição do melão, à desidratação da cal e do cimento e à desvolatilização do carvão vegetal.

Em temperaturas entre 800 e 1100 °C, a gaseificação ocorreu em todos os tipos de briquetes com diferentes taxas, de acordo com a reatividade do carbono incorporado. O efeito dos voláteis e da desidratação pode ser negligenciado a 1100 °C, e a variação de peso pode ser atribuída apenas à gaseificação do carbono fixo com o CO₂ circundante .

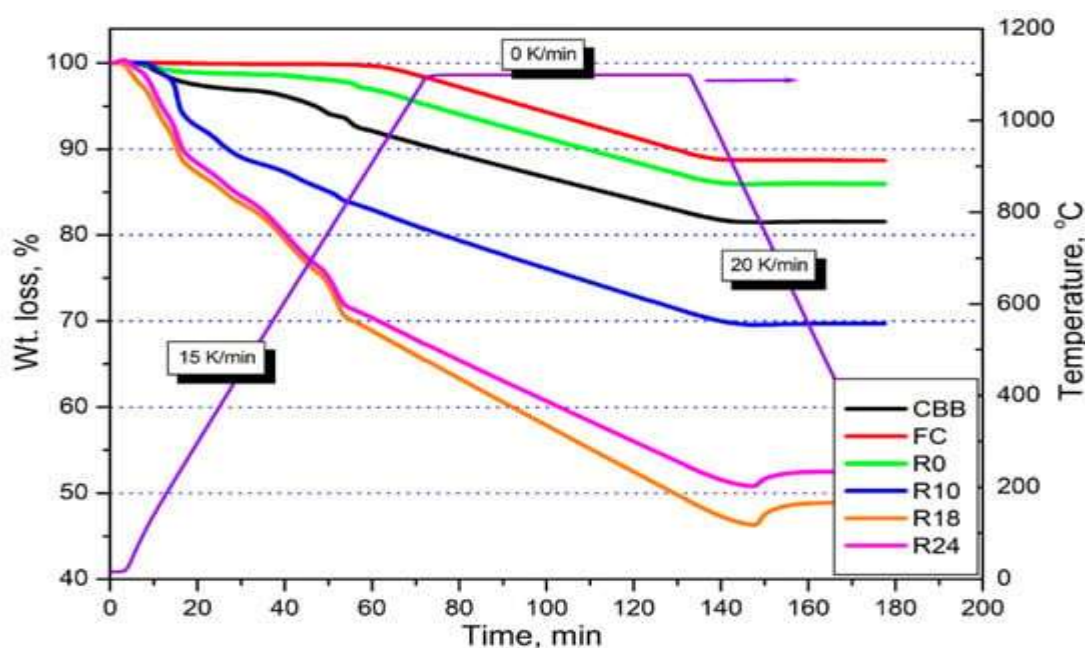


Figura 6.

Variações no peso da amostra e na temperatura experimental em função do tempo.

Para garantir que a taxa de gaseificação não esteja relacionada às diferenças no teor inicial de carbono na amostra, foi realizada uma normalização para neutralizar o efeito do teor de carbono. As equações (1) e (2) são usadas para calcular a taxa de gaseificação aparente (R_{Aparente}) e a taxa de gaseificação normalizada ($R_{\text{Normalizada}}$), respectivamente. A Figura 7 mostra a taxa de gaseificação normalizada em briquetes de carbono fóssil e biocarbono. Em geral, a tendência de reatividade pode ser classificada em três conjuntos: briquetes de baixa reatividade (FC, R0, CBB), briquetes de reatividade média (R10) e briquetes de alta reatividade (R18 e R24). A taxa de gaseificação aparente relativamente menor de R24 em comparação com R18 pode ser atribuída ao efeito da suspensão de sílica, que reduz a reatividade do carbono, como relatado em outro estudo [15].

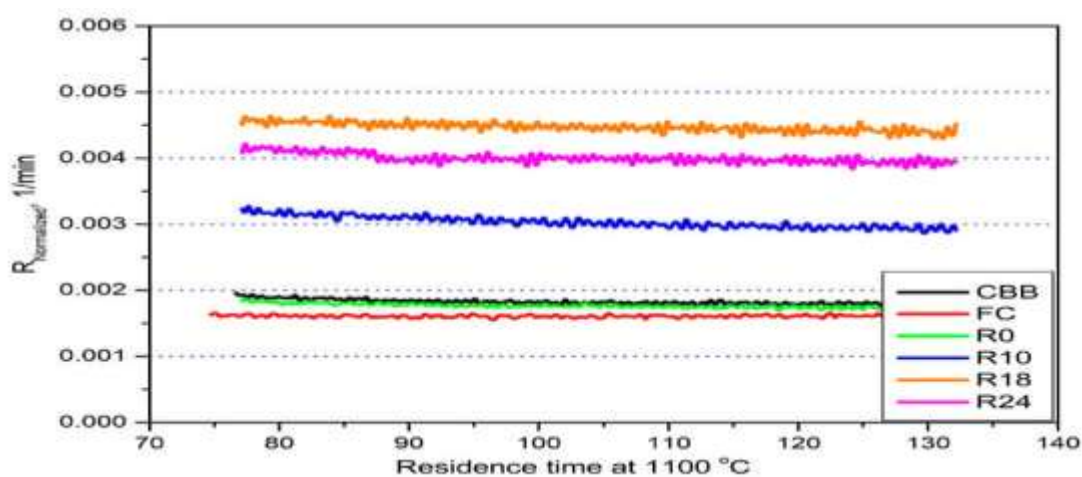


Figura 7.

Comparação da taxa de gaseificação normalizada para as amostras de coque.

3.4. Poder calorífico e densidade energética de briquetes de biocarvão

A Figura 8 mostra a composição dos briquetes desenvolvidos para todas as receitas, classificadas em carbono fixo fóssil, biocarbono fixo, matéria volátil (MV) e teor de cinzas. O carbono do betume em R3 é contabilizado como carbono fóssil, enquanto o aglomerante Keracoal é considerado como tendo uma composição semelhante à do melaço. Cimento e cal estão incluídos no teor de cinzas. O biocarbono fixo total pode atingir até ~67% nos briquetes preparados com 94% de biomateriais (R21). As receitas (R7–R15) preparadas com Carvão 2 apresentam menor teor de carbono e maior teor de cinzas em comparação com as preparadas com Carvão 1 (R1–R6 e R16–R27), devido ao efeito da qualidade do carvão.

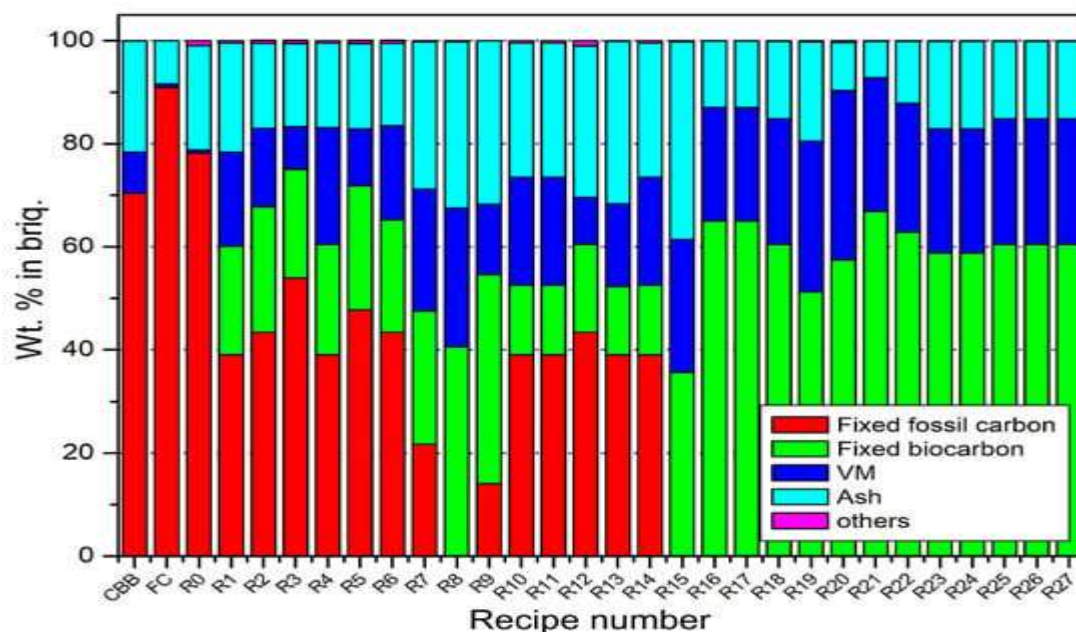


Figura 8.

Teor de carbono, matéria volátil e cinzas dos briquetes em todas as formulações.

O poder calorífico superior (PCS) foi calculado para todos os tipos de briquetes aplicando a Equação (3).

Os briquetes de biocarvão preparados com Carvão 1 apresentaram PCS mais elevado em comparação com os briquetes de biocarvão feitos com Carvão 2 ou CBB, conforme mostrado na Figura 9.

O poder calorífico relativamente alto desses briquetes pode ser atribuído ao maior teor de carbono e menor teor de cinzas do Carvão 1 e dos aglomerantes utilizados. A Figura 10 mostra os valores calculados da densidade energética para diferentes formulações. A densidade energética dos briquetes contendo coque de carvão ou Carvão 2 foi relativamente maior do que a dos briquetes preparados com Carvão 1. Isso indica que a maior densidade de compactação dos briquetes de biocarvão preparados com Carvão 2 foi capaz de compensar seu menor poder calorífico.

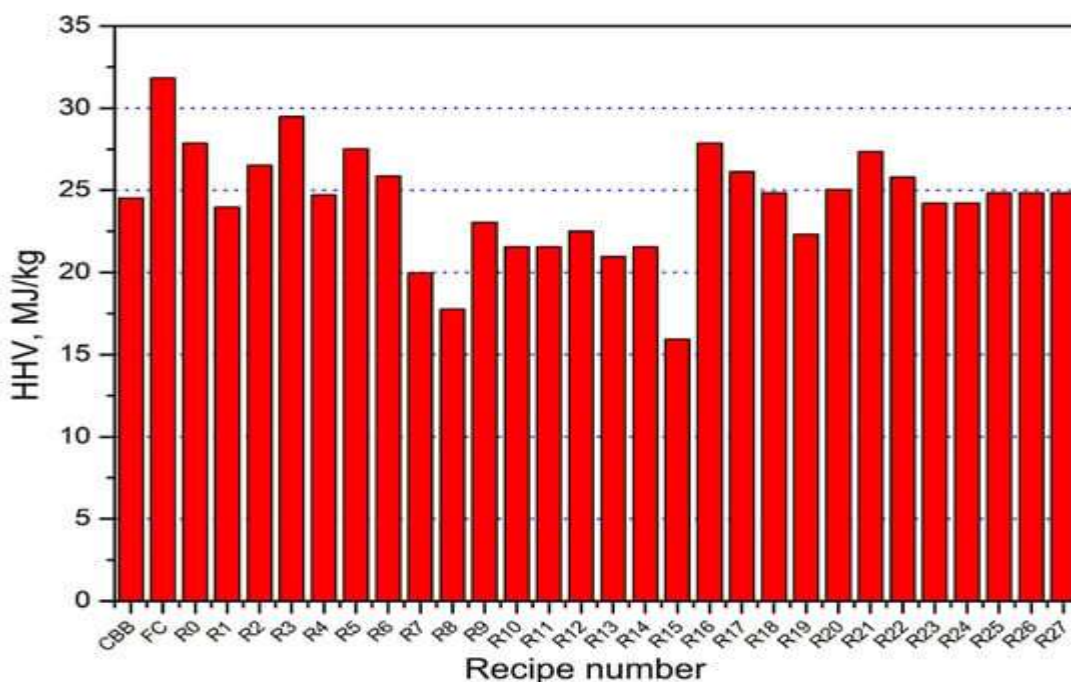


Figura 9.

Poder calorífico superior dos briquetes em todas as receitas.

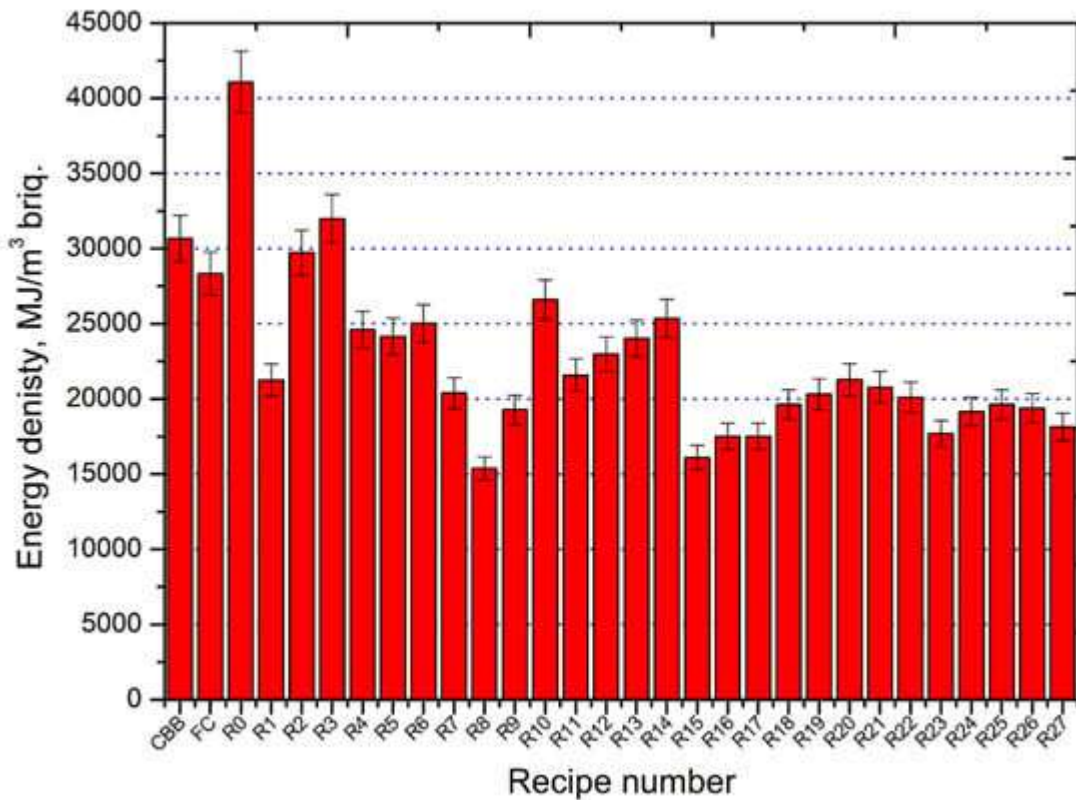


Figura 10. Densidade energética dos briquetes em todas as receitas.

3.5. Comportamento de briquetes de biocarvão em escala ampliada a altas temperaturas.

As condições experimentais estão resumidas na Tabela 6. Cinco ensaios foram conduzidos com briquetes de biocarvão e comparados ao coque de fundição industrial (CBB) e ao coque de fundição industrial (FC). A Figura 11 mostra o procedimento para alterar as vazões de gás e a temperatura nos experimentos.

Nos três primeiros experimentos, os briquetes de biocarvão foram testados em atmosfera de N₂ puro e as amostras se desintegraram; portanto, a variação de peso não é apresentada.

Exemplos de uma amostra de referência de coque de fundição e de um briquete de biocarvão antes e depois do experimento são mostrados na Figura 12.

O desenvolvimento de fissuras no briquete de biocarvão e a oxidação na superfície da amostra são claramente visíveis na figura, enquanto as alterações no coque de fundição foram mínimas.

Pequenas variações de peso foram observadas nas amostras de referência, enquanto em todos os briquetes de biocarvão, a perda de peso média foi de cerca de 35% devido ao maior teor de umidade, voláteis e aglomerantes.

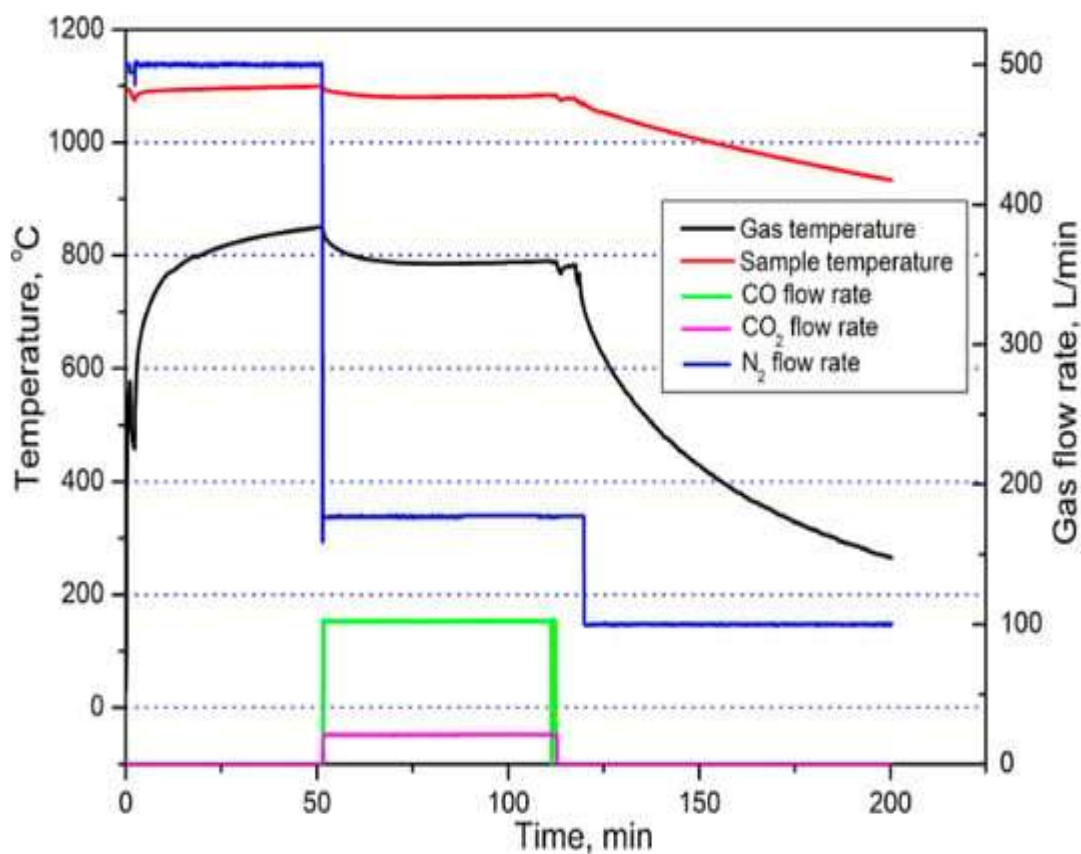


Figura 11. Alterações nas temperaturas e nas taxas de fluxo de gás durante os experimentos.

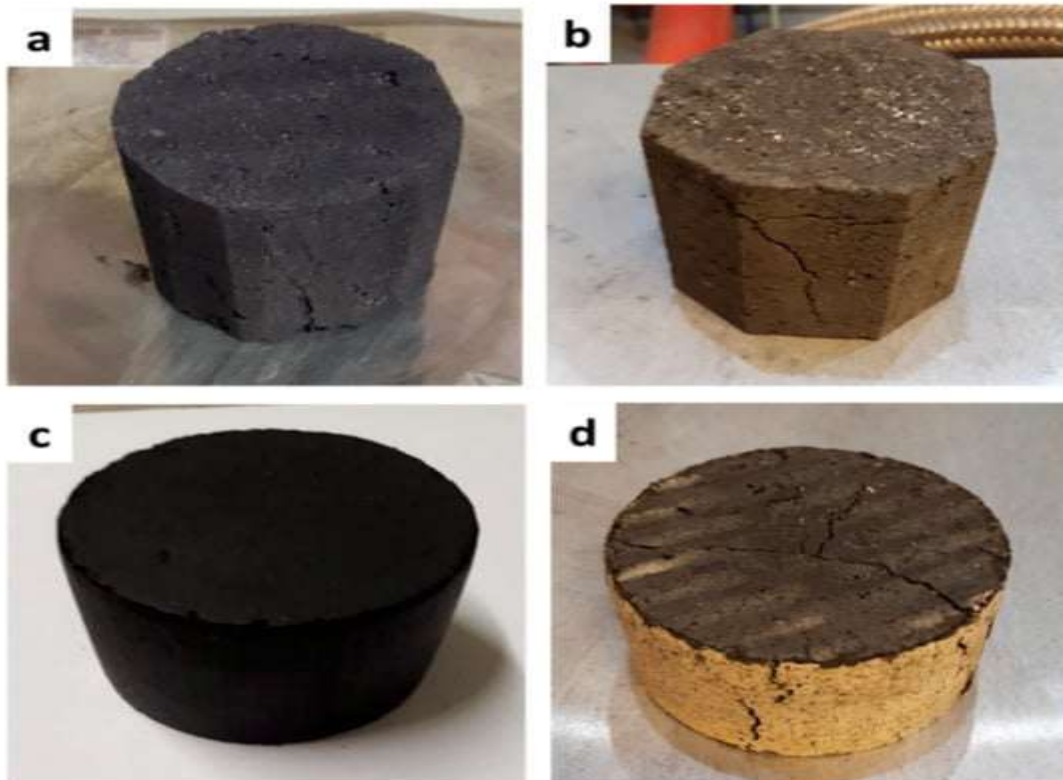


Figura 12. Briquetes de coque de fundição e biocarvão (a) coque de fundição antes do teste, (b) coque de fundição após o teste, (c) briquete de biocarvão antes do teste, (d) briquete de biocarvão após o teste.

Durante os testes de alta temperatura, a abertura de fissuras e a desintegração dos briquetes de biocarvão ocorreram mesmo em atmosfera de nitrogênio e sem aplicação de carga. As fissuras seguiram um padrão semelhante às microfissuras iniciais observadas nos briquetes após a secagem. Em geral, três tipos de fissuras foram identificados: (i) fissuras superficiais causadas pelo atrito entre o material e a parede da matriz durante a compactação e durante a ejeção dos briquetes da matriz, (ii) fissuras verticais desenvolvidas durante a secagem dos briquetes e a evaporação da umidade e (iii) fissuras desenvolvidas pelo gradiente de pressão durante a compactação, resultando na formação e separação de uma calota cônica.

Espera-se que as mudanças nas tensões mecânicas durante o ciclo de compactação, como compressão, descompressão e ejeção dos briquetes do molde, desempenhem um papel importante na formação da calota cônica nos briquetes. Comportamento semelhante foi observado no trabalho relatado por Wu et al., sobre a compactação de pós farmacêuticos [16]. Utilizando modelagem e cálculo das tensões mecânicas nos compactos, eles mostraram uma correlação clara entre a separação do cone e os gradientes de tensão durante a remoção da amostra da matriz nos compactos cilíndricos [16].

Foram feitos esforços para diminuir a formação de fissuras, melhorando a qualidade da superfície da matriz, testando partículas de carvão mais finas e curando os briquetes em recipientes fechados com alto teor de umidade para retardar o processo de secagem. Uma melhoria significativa foi obtida com a desaceleração do processo de secagem.

Embora a qualidade dos briquetes tenha melhorado, ficou claro que as fissuras são causadas por uma combinação de diferentes parâmetros. Portanto, é necessário investigar mais a fundo os mecanismos de ligação, o método de compactação e a microestrutura do material compactado. A ocorrência de um gradiente de densidade nos briquetes é inevitável no método de prensagem em matriz única; portanto, o uso dessa técnica de compactação para produzir materiais com dimensões adequadas às demandas do cubilô ainda requer melhorias na seleção de materiais e nas condições de compactação.

Para garantir a operação eficiente e a permeabilidade no forno cubilô, o tamanho mínimo do coque de fundição deve ser de 90×90 mm.

Em 2017, a capacidade anual de produção mundial de peças fundidas foi atingida. Cerca de 110 milhões de toneladas (Mt) de ferro fundido [17] com consumo médio de coque de fundição de cerca de 110 kg/t de ferro fundido [18].

A substituição parcial do coque de fundição por briquetes de biocarvão desenvolvidos pode ser um bom começo para mitigar a emissão de CO₂ fóssil em um forno cubilô. A substituição de 25% do coque de fundição fóssil por biochar pode contribuir para a redução de mais de 1,1 Mt de emissões de CO₂ fóssil anualmente em fornos cubilô em todo o mundo.

Além do desenvolvimento de briquetes de biocarvão para atender aos requisitos de um forno cubilô, nosso trabalho futuro se concentrará na realização de uma análise de sistema de um forno cubilô de base biológica para avaliar o potencial da biomassa pré-tratada na substituição do coque de fundição e na redução da emissão de CO₂ fóssil .

4. Considerações Finais

A substituição do coque de fundição por produtos de biomassa renováveis e neutros em carbono é fundamental para garantir a sustentabilidade desse processo; no entanto, a resistência mecânica relativamente baixa, a baixa densidade energética e a alta reatividade da biomassa representam os principais desafios para sua implementação eficiente.

O presente estudo teve como foco o desenvolvimento de briquetes de biocarvão com densidade energética, resistência mecânica e reatividade adequadas para um forno cubilô. Os ensaios foram realizados em uma prensa de briquetagem em escala laboratorial para investigar e otimizar a composição da mistura, o tamanho das partículas de biocarvão, o tipo e a proporção do aglomerante, a pressão de compactação e as condições de secagem. Os principais resultados podem ser resumidos nos seguintes pontos:

A compactação pode aumentar significativamente a densidade e a densidade energética de briquetes contendo biocarvão. A pressão de compactação e a quantidade de biocarvão na composição afetam significativamente a resistência dos briquetes. A resistência mecânica dos briquetes aumentou com o aumento da pressão de compactação, enquanto diminuiu com o aumento do teor de biocarvão nos briquetes.

Neste estudo, a combinação de 20% de melaço com 10% de cal e 8% de cimento mostrou-se o aglomerante mais adequado, em comparação com outros tipos de aglomerantes testados, para aumentar a resistência mecânica de briquetes de biocarvão. O cimento é necessário para melhorar a resistência à tração e a resistência a quente dos briquetes de biocarvão. Os resultados demonstraram que a quantidade ideal de aglomerantes varia de acordo com o método de compactação e o tamanho dos briquetes produzidos. A taxa de gaseificação normalizada das amostras de carbono fóssil e biocarvão aumentou com o aumento do teor total de biocarvão nas misturas, devido à maior reatividade e à natureza mais porosa do biocarvão em comparação com o carbono fóssil.

A adição de uma suspensão de sílica às misturas pode ser um método potencial para reduzir a área superficial de reação e, portanto, diminuir a reatividade dos briquetes contendo biocarvão.

A ampliação da produção de briquetes de biocarvão e os testes de resistência a quente sob carga mecânica resultaram na geração de fissuras e na desintegração dos briquetes, o que pode ser atribuído principalmente à presença de tensões mecânicas durante o ciclo de compactação, desde a compressão, descompressão e ejeção dos briquetes até a cura e secagem dos mesmos.

Para desenvolver briquetes de biocarvão que atendam aos requisitos de um forno cubilô e substituam o coque de fundição, são necessárias mais investigações sobre diferentes tecnologias de compactação, um entendimento aprofundado dos mecanismos de ligação, o desenvolvimento de resistência a altas temperaturas e o controle da reatividade do biocarvão nos briquetes.

Contribuições dos autores

EM e MK conceberam e realizaram os experimentos, conduziram a análise dos dados e a avaliação dos resultados e redigiram o manuscrito. ML supervisionou o trabalho, contribuiu para a avaliação dos resultados e realizou a revisão final do manuscrito. Todos os autores discutiram o planejamento dos testes, os resultados e contribuíram para a versão final do manuscrito.

Financiamento

Esta pesquisa foi financiada pela Agência Sueca de Energia e pela Volvo Powertrain AB, e o trabalho foi realizado na Swerim AB.

Agradecimentos

O apoio concedido pela Agência Sueca de Energia para o financiamento do projeto número 45365-1 “Investigação do comportamento de briquetes de biocarvão a temperaturas elevadas” e pela Volvo Powertrain AB é muito apreciado.

Conflitos de interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

Mousa, EA; Wang, C.; Riesbeck, J.; Larsson, M. Aplicações da biomassa na indústria do ferro e do aço: uma visão geral dos desafios e oportunidades. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016 , 65 , 1247–1266. [Google Scholar] [CrossRef]

Suopajärvia, H.; Umekib, K.; Mousa, EA; Hedayati, A.; Romar, H.; Kemppainen, A.; Wang, C.; Phounglamcheik, A.; Tuomikoski, S.; Norberg, N.; et al. Uso de biomassa na siderurgia integrada - Situação atual, necessidades futuras e comparação com outras tecnologias de produção de aço com baixo teor de CO₂ . *Appl . Energy* 2018 , 213 , 384–407. [Google Scholar] [CrossRef]

Isnugroho, K.; Birawidha, DC; Hendronursito, Y. Utilização de resíduos de biomassa como fonte secundária de energia para o processo de fundição de metais. In *Anais da Conferência de 2016 sobre Ciência Fundamental e Aplicada para Tecnologia Avançada (ConFAST 2016)*, Yogyakarta, Indonésia, 25–26 de janeiro de 2016; Volume 1746, pp. 020001-1–020001-5. [Google Scholar]

Schulten, M.; Pena Chipatecua, G.; Quicker, P.; Seabra, S. Investigações sobre a aplicação de biochar como alternativa ao coque de fundição. In *Anais da 21ª Conferência Europeia de Biomassa*, Copenhagen, Dinamarca, 3–7 de junho de 2013. [Google Scholar]

Echterhof, T.; Demus, T.; Schulten, M.; Noel, Y.; Pfeifer, H. Substituição de fontes de carbono fóssil em fornos de arco elétrico e cubilô por biochar. In Congresso Europeu de Aço, Meio Ambiente e Energia (ESEC) ; Universidade de Teesside: Middlesbrough, Reino Unido, 2014. [Google Scholar]

Nieto-Delgado, C.; Cannon, FS; Paulsen, PD; Furness, JC; Voigt, RC; Pagnotti, JR. Briquetes de antracito aglomerados como combustível alternativo ao coque metalúrgico: desempenho em escala real em fornos cubilô. *Fuel* 2014 , 121 , 39–47. [Google Scholar] [CrossRef]

Noh, YD; Komarneni, S.; Cannon, FS; Brown, NR; Katsuki, H. Briquetes de antracito com subprodutos vegetais como combustível ecologicamente correto para fundições. *Fuel* 2016 , 175 , 210–216. [Google Scholar] [CrossRef]

Torielli, RM; Cannon, FS; Voigt, RC; Considine, TJ; Furness, JC; Fox, JT; Goudzwaard, JE; Huang, H. O desempenho ambiental e o custo de tecnologias inovadoras para a produção de ferro fundido nodular. *Int. J. Met.* 2014 , 8 , 37–48. [Google Scholar] [CrossRef]

Gabra, MH; Jain, RK; Tiwari, A. Forno cubilô energeticamente eficiente via hibridização com um gaseificador de biomassa. *Int. J. Emerg. Technol. Eng. Res.* 2017 , 5 , 54–62. [Google Scholar]

Wang, L.; Buvarp, F.; Skreiberg, Ø.; Bartocci, P.; Fantozzi, F. Um estudo sobre densificação e gaseificação de CO₂ de biocarbono. *Química. Eng. Trad.* 2018 , 65 , 145–150. [Google Acadêmico]

Rahman, ANE; Masood, MA; Prasad, CSN; Venkatesham, M. Influência do tamanho e da forma na resistência de briquetes. *Fuel Process. Technol.* 1989 , 23 , 185–195. [Google Scholar] [CrossRef]

Ifa, L.; Kusuma, H.; Sabara, Z.; Mahfud, M. Produção de biobriquetes a partir de biochar derivado da pirólise de resíduos de castanha de caju. *Ecol. Environ. Conserv.* 2019 , 25 , 125–131. [Google Scholar]

Aglutinante Keracoal. Disponível online: <https://www.keramicalia.com/binders/6-keracoal-binder> (acessado em 10 de novembro de 2019).

Aristizabal, RE; Silva, CM; Perez, PA Estudos de uma cúpula temperada Parte I: Visão geral dos estudos experimentais. AFS Trans. 2009 , 117 , 681–691. [Google Scholar]

Iwai, Y.; Ishiwata, N.; Murai, R.; Matsuno, H. Técnica de controle da taxa de coque em forno de cuba através do controle da reatividade do coque. ISIJ Int. 2016 , 56 , 1723–1727. [Google Scholar] [CrossRef]

Wu, CY; Hancock, BC; Mills, A.; Bentham, AC; Best, SM; Elliott, JA. Investigação numérica e experimental dos mecanismos de fechamento durante a compactação de comprimidos farmacêuticos. Powder Technol. 2008 , 181 , 121–129. [Google Scholar] [CrossRef]

Panorama da Indústria Europeia de Fundição. Disponível online: <https://www.caef.eu/statistics/> (acessado em 10 de novembro de 2019).

Rao, NM Indústrias de fundição de ferro e ferro-gusa na Índia. Disponível online: <http://www.isrinfomedia.com/main/archive/1>).

Aviso/Nota do Editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são de exclusiva responsabilidade dos autores e colaboradores individuais. Os editores se eximem de qualquer responsabilidade por danos a pessoas ou bens decorrentes de ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo. Este artigo distribuído sob os termos e condições da licença Creative Commons Attribution (CC BY).

Tradução pelo Comitê de Estudos da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e do Instituto Brasileiro de Bioenergia e Desenvolvida pela equipe técnica e de consultoria da Brasil Biomassa e Energia Renovável



Descarbonização da produção de ferro-ligas utilizando biocarbono

Merete Tangstad 1,*e Eli Ringdalen 2

1 Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia, 7491 Trondheim, Noruega

2 SINTEF, 7034 Trondheim, Noruega

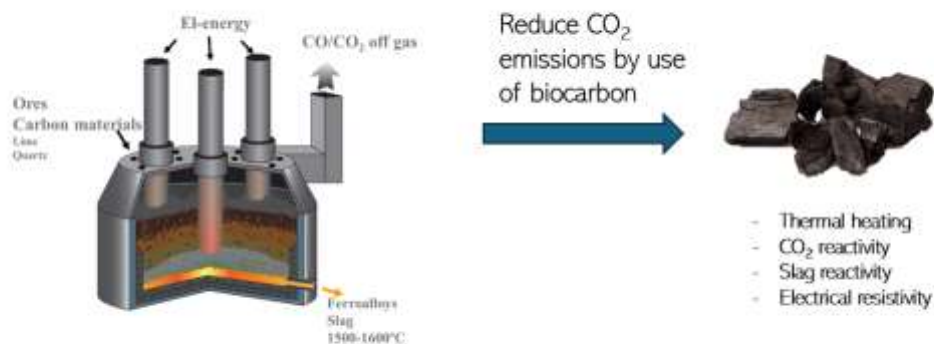
Related Articles Replacing Fossil Carbon in the Production of Ferroalloys with a Focus on Bio-Based Carbon: A Review Marcus Sommerfeld et al. Minerals
Densification of Biocarbon and Its Effect on CO₂ Reactivity

Resumo

Os principais contribuintes para as emissões de CO₂ na produção de ferro-ligas são o uso de redutores fósseis e a energia consumida. O uso de fontes de energia renováveis é imprescindível para a descarbonização desses processos. A única solução a curto prazo para reduzir o uso de redutores fósseis é substituí-los por biocarvão. Este artigo revisa pesquisas sobre o uso de biocarvão e seus efeitos na operação de fornos, conduzidas na Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (NTNU) e no SINTEF. Durante o aquecimento, observou-se a produção de H₂ e CH₄, que podem afetar o grau de pré-redução nos fornos. A reatividade do CO₂ é maior com carvão vegetal em comparação com coque; no entanto, quando o potássio se acumula no forno, a diferença entre os materiais carbonáceos diminui. Embora a reatividade da escória seja mais rápida com carvão vegetal do que com coque, outras propriedades, como o teor de enxofre na produção de SiMn, também desempenham um papel importante.

Por fim, observou-se que a resistividade elétrica do carvão vegetal é maior do que a do coque.

Palavras-chave: descarbonização ; emissões de CO₂ ; biocarvão ; aquecimento térmico ; reatividade do CO₂ ; reatividade da escória ; resistividade elétrica



1. Introdução

As ferro-ligas e o silício são componentes vitais da transição verde, pois contribuem com soluções técnicas para a descarbonização da sociedade. Isso inclui turbinas eólicas e células solares na produção de energia, bem como carros e trens elétricos no transporte. No entanto, essa indústria também consome energia e emite gases com alto Potencial de Aquecimento Global (PAG), como o CO₂. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) mostra o impacto ambiental geral dos processos de produção.

Bons exemplos incluem Nøstvold et al. para a produção de silício [1] e Westfall para a produção de ligas de manganês [2]. Do berço ao túmulo, Westfall relata um PAG geral entre 5 e 7 kg CO₂ (eq)/kg de liga, dependendo da liga.

Em países como o Brasil e a Noruega, onde as ligas podem ser produzidas usando energia renovável, esses números diminuem para 2 a 2,9 kg CO₂ (eq)/kg de liga, como mostrado na análise de ACV de Larssen et al. para a produção de ligas de Mn [3]. Isso se deve principalmente ao carvão e ao coque utilizados como redutores no processo, e uma parcela significativa desses números não se deve aos processos de mineração e transporte. A questão mais importante na descarbonização da indústria de ferro-ligas e silício é, portanto, o uso de energia renovável e a redução do consumo de carvão e coque.

A solução a curto prazo para reduzir os redutores fósseis é substituí-los por biorredutores. O carvão vegetal tem sido utilizado por alguns produtores, especialmente na América do Sul, mas para a maioria, essa é uma nova forma de operar fornos. Deve-se notar que a produção de biocarvão também apresenta algum Potencial de Aquecimento Global (GWP) devido às emissões de CH₄ e ao uso de combustíveis fósseis para transporte [4 , 5]. No entanto, soluções técnicas para esses problemas já existem, e espera-se que o uso de biocarvão em breve se aproxime da neutralidade de carbono.

Para facilitar a transição do carvão e coque para o biocarvão, a NTNU e a SINTEF têm pesquisado o uso de biocarvão na produção de silício, manganês e ligas de silício há várias décadas. Este artigo revisa trabalhos publicados sobre o comportamento térmico do carvão vegetal, a reatividade do CO₂, a reatividade da escória e a condutividade elétrica em altas temperaturas. Embora a resistência mecânica do carbono seja um aspecto importante [6 , 7 , 8 , 9 , 10 , 11 , 12], ela não será abordada neste artigo.

2. Comportamento térmico do carvão vegetal. O carvão vegetal e outros materiais carbonáceos sofrem diversas transformações durante o aquecimento. Essas transformações dependem do tipo de material, de suas propriedades, da temperatura, da taxa de aquecimento, da atmosfera gasosa e de outros parâmetros. Tais transformações ocorrem quando os materiais carbonáceos são introduzidos no forno, entram em contato com a superfície aquecida da carga e são expostos a temperaturas crescentes durante sua descida no forno.

Quando os materiais de carbono entram em contato com a superfície de carga, sofrem aquecimento rápido, ou aquecimento por choque, o que pode levar à decrepitação, resultando em tamanhos de partículas menores e geração de finos [13]. Com o aquecimento adicional, a resistência mecânica dos materiais diminui, levando a mais decrepitação e redução adicional dos tamanhos das partículas e geração de finos.

O aquecimento também altera a estrutura dos materiais de carbono, incluindo sua porosidade [14]. À medida que a temperatura aumenta, os gases são expelidos dos materiais de carbono, alterando tanto as propriedades dos materiais de carbono quanto a atmosfera gasosa no forno.

Em um forno industrial contendo gases CO e CO_2 , a decrepitação e a geração de finos ocorrem em torno de $800\text{ }^\circ\text{C}$, quando os materiais de carbono reagem com o gás CO_2 . As alterações no tamanho das partículas, na porosidade e na estrutura dos materiais de carbono, bem como a quantidade e o tipo de gases que se desprendem durante o aquecimento, são investigadas nos estudos aqui apresentados por meio de dois métodos principais.

A evolução dos gases foi investigada aquecendo-se 250 g de material de carbono com tamanho de 10–20 mm, mais 50 g de partículas com tamanho superior a 30 mm, em um fluxo de gás argônio (Ar) ou de uma mistura gasosa de CO/CO₂/Ar. O aparato é mostrado na Figura 1. A configuração e a metodologia são descritas em detalhes por Ringdalen [15].

As alterações no tamanho e a geração de partículas finas durante a reação com CO₂ são investigadas no aparato mostrado na Figura 2 [7], onde 200 g de partículas de 10–50 mm são aquecidas em um fluxo de gás CO/CO₂. Mais detalhes podem ser encontrados em Suarez et al. [16] e em Jayakumari [7 , 10], onde também são descritas metodologias para medições de resistência.

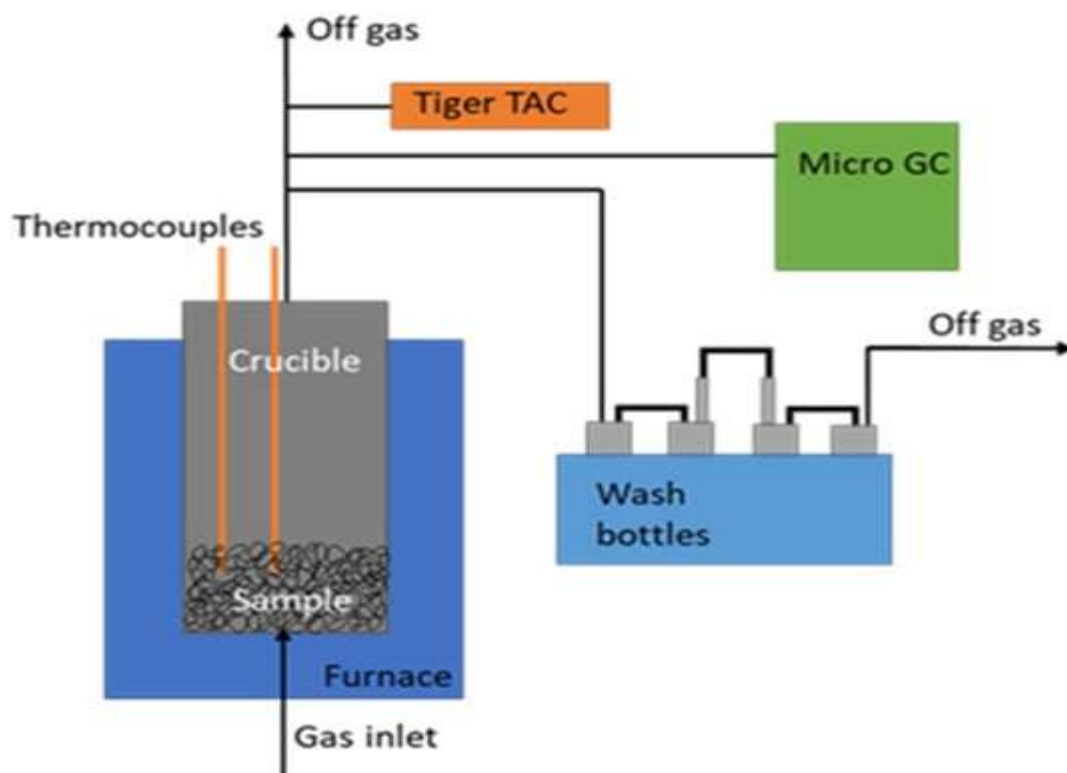


Figura 1. Esboço da configuração para investigações de medição de gases liberados durante o aquecimento de carbono [15].

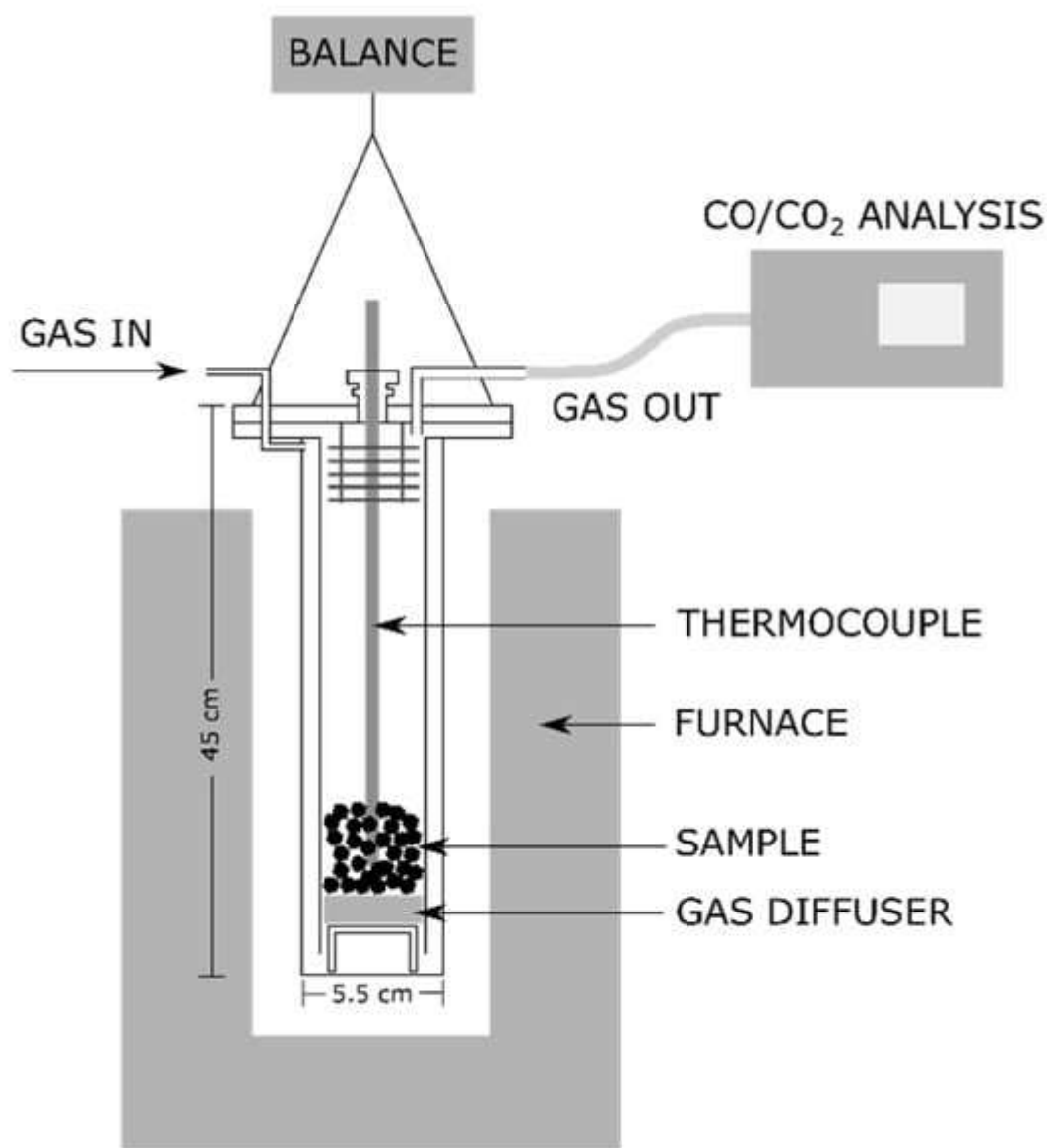


Figura 2. Configuração para investigações da reatividade do CO₂ e geração de finos durante o aquecimento de materiais de carbono [7].

Os voláteis em materiais de carbono podem afetar as reações gás-sólido na parte de baixa temperatura do forno, como a pré-redução de minérios de manganês. O teor de gás em materiais de carbono, expresso como porcentagem de voláteis, varia significativamente entre as fontes de carbono [17 , 18 , 19]. Essa variação é medida pela perda de massa após o aquecimento a 950 °C em atmosfera inerte.

Diversos gases são liberados dos materiais de carbono em quantidades que dependem da fonte de carbono, da temperatura e da atmosfera gasosa. Em atmosfera de Ar, o gás conterá maiores quantidades de H_2 e CH_4 do que em uma atmosfera de CO/CO_2 , como pode ser observado nas Figuras 3 e 4 [15]. Isso pode ser devido à oxidação de H_2 e CH_4 . O carvão mineral possui um teor de voláteis maior do que os carvões investigados e, naturalmente, liberará mais gás durante o aquecimento. A principal diferença reside no maior teor de CH_4 no carvão mineral, enquanto os teores de H_2 são praticamente semelhantes.

A liberação de gás do coque foi muito baixa para ser medida, o que é esperado, visto que a produção de coque envolve aquecimento a temperaturas mais altas do que as utilizadas neste estudo. Tanto o carvão mineral quanto o carvão vegetal liberam mais H_2 do que CH_4 . O metano e o hidrogênio começam a ser liberados do carvão mineral por volta de $400\text{ }^\circ\text{C}$, uma temperatura ligeiramente inferior à do carvão vegetal. A liberação de metano (CH_4) do carvão mineral atinge o pico por volta de $500\text{ }^\circ\text{C}$ e a do carvão vegetal por volta de $700\text{ }^\circ\text{C}$. Os materiais carbonáceos praticamente não liberam CH_4 acima de $800\text{ }^\circ\text{C}$. A liberação de hidrogênio é máxima por volta de $750\text{ }^\circ\text{C}$, e grande parte do hidrogênio será liberada acima de $800\text{ }^\circ\text{C}$.

Isso significa que grande parte do hidrogênio será liberada em temperaturas nas quais a reação de Boudouard está ativa e pode afetar as taxas de reatividade do CO_2 . A porcentagem de hidrogênio no gás dependerá do volume de gás CO/CO_2 produzido durante a redução e do fluxo de gás através da zona específica do forno.

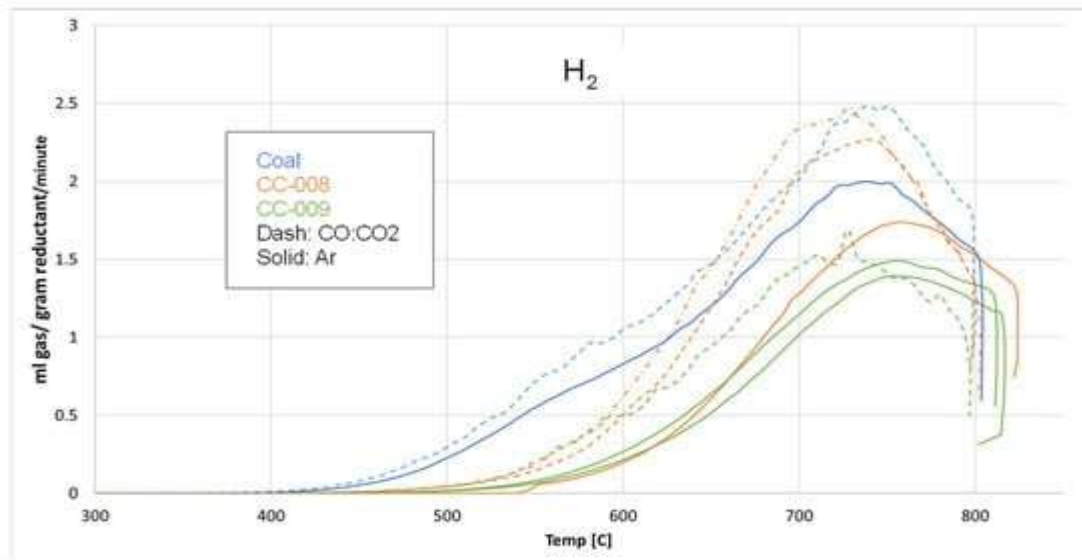


Figura 3. Quantidade de hidrogênio, H_2 , liberado durante o aquecimento de carvão vegetal (CC 008, CC 009) e carvão mineral em atmosfera de Ar e atmosfera de $CO/CO_2/Ar$ (60/30/10) [15]. As linhas tracejadas mostram a atmosfera de CO/CO_2 e as linhas contínuas de Ar.

A liberação de voláteis, assim como o próprio aquecimento, altera a estrutura dos materiais de carbono. O aquecimento a $800\text{ }^\circ\text{C}$ aumentou ligeiramente a porosidade dos carvões, enquanto o carvão mineral apresentou um aumento de oito vezes.

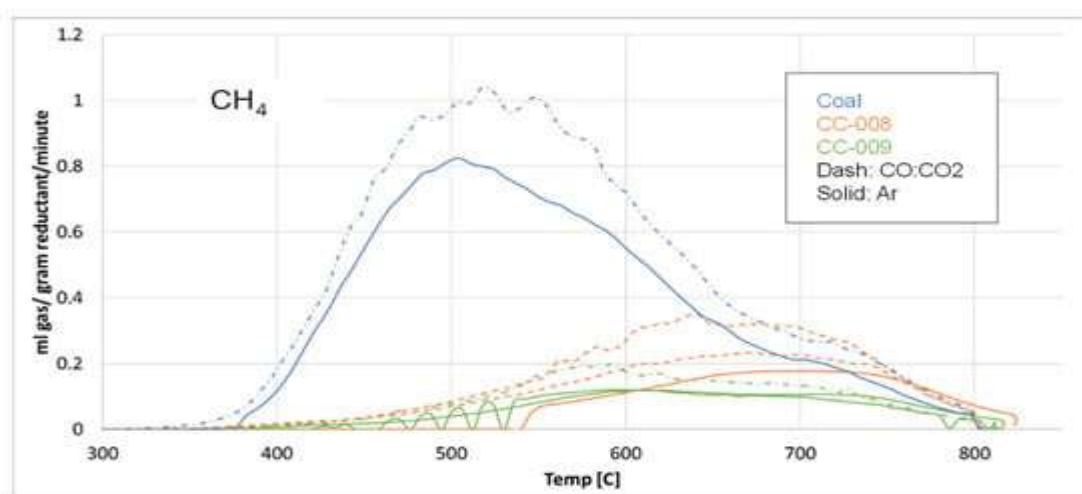


Figura 4. Quantidade de metano, CH₄, liberado durante o aquecimento de carvão vegetal (CC 008, CC 009) e carvão mineral em atmosfera de Ar e atmosfera de CO/CO₂/Ar (60/30/10) [15]. As linhas tracejadas mostram a atmosfera de CO/CO₂ e as linhas contínuas de Ar.

As alterações na estrutura das partículas durante o aquecimento podem ser observadas por μ CT, conforme descrito por Rørvik et al. [14] e ilustrado na Figura 5. Com base nas alterações medidas na perda de material da imagem, a variação na densidade foi calculada..

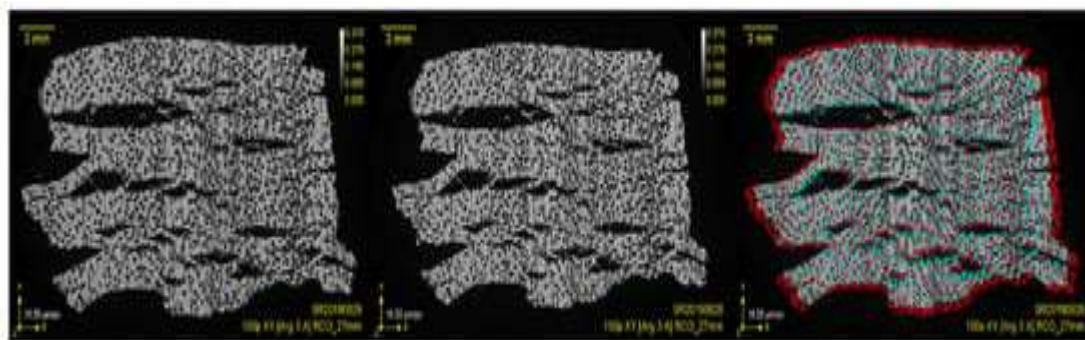


Figura 5. Imagens que descrevem as mudanças no carvão durante o aquecimento a 1100 °C em atmosfera de Ar. Antes do aquecimento; à esquerda, após o aquecimento; no meio e à direita, uma comparação onde os materiais removidos estão marcados em vermelho e os adicionados em azul, de Rørvik et al. [14].

Durante o aquecimento, partículas finas serão geradas inicialmente por choque térmico ao entrarem em contato com a carga. Nas investigações de Jayakumari [7] sobre bioaglomerados, pequenas quantidades de partículas finas com menos de 0,5 mm foram geradas, e cerca de 75% do material não se desintegrou.

Durante o aquecimento contínuo, Smith-Hansen [20] observou que o aquecimento do material carbonáceo a 800 °C gerou cerca de 2% de partículas finas com menos de 3,35 µm. Durante o aquecimento, a resistência mecânica do carvão diminuiu, enquanto o aquecimento aumentou a resistência mecânica do carvão vegetal, como também mostrado em [6]. A reação com o gás CO₂ irá , como mostrado em Tangstad et al. [16] e Jayakumari [7], diminuir a resistência mecânica dos materiais carbonáceos, resultando em uma resistência do carvão vegetal inferior à do carvão mineral e do coque.

3. Reatividade do CO₂

A reação entre materiais de carbono e CO₂.

De acordo com as pressões parciais de equilíbrio de CO e CO₂ mostradas na Figura 6 , o carbono começará a sofrer combustão para produzir gás CO acima de 600 °C.

No entanto, foi descrito que a reação é bastante lenta para alguns carbonos abaixo de 1000 °C, como o coque, e que uma pequena quantidade de CO diminuirá drasticamente a taxa [21].

O oxigênio aderido reage então com um átomo de carbono livre e ativo, causando a liberação de uma molécula de CO.

Dessa forma, de 0 a 2 novos sítios livres e ativos são formados na superfície, aos quais mais oxigênio.

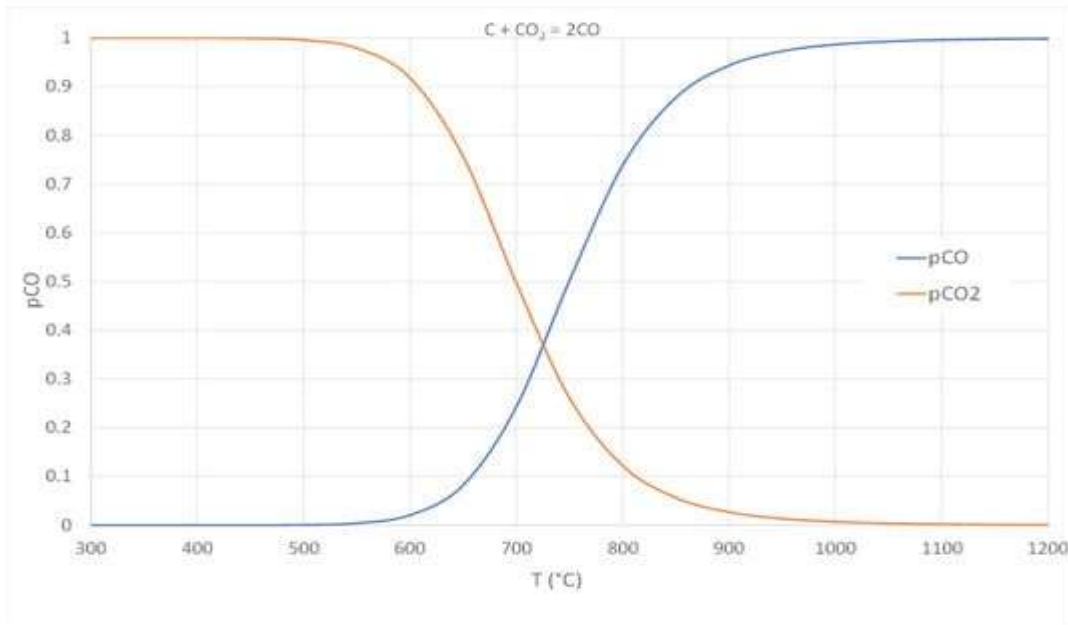


Figura 6. A pressão parcial de CO e CO₂ em função da temperatura em equilíbrio com carbono ($a_C = 1$) (calculada com HSC 9).

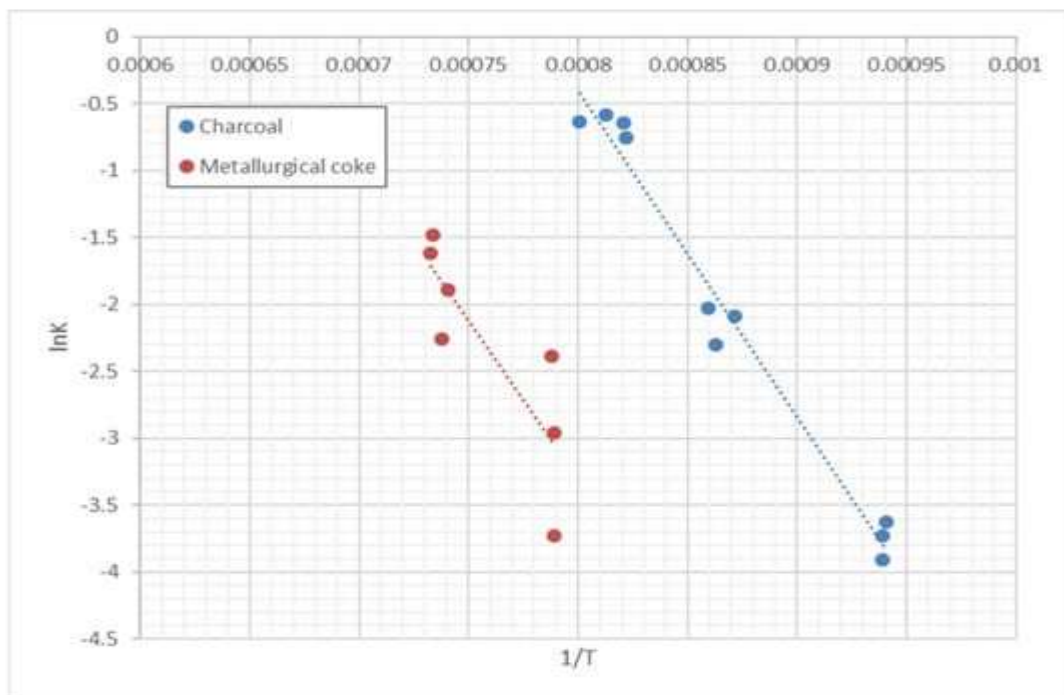


Figura 7. O gráfico de Arrhenius mostrando a constante de taxa logarítmica ($\ln k(T)$) versus $1/T$ para a reatividade do CO₂ do coque e do carvão. A inclinação representa a energia de ativação que é de cerca de 200 kJ/mol [29].

Com a crescente relevância do biocarvão, mais artigos sobre a reatividade do CO_2 em materiais de biocarvão, em comparação com carvão vegetal ou coque fóssil, têm sido publicados [6 , 14 , 27 , 31 , 32]. Jayakumari et al. compararam a reatividade do CO_2 em diversos materiais [7 , 33], conforme mostrado na Figura 8. Observa-se que o carvão vegetal apresenta a maior reatividade, seguido pelo carvão mineral/carvão vegetal e pelo coque.

Se o biocarvão for misturado à carga de coque durante a produção, a reatividade do CO_2 aumentará com a adição de biocarvão. Entre os diferentes tipos de biocarvão, a reatividade do CO_2 também varia na faixa de 0,002–0,0034 FixC/s , o que representa um aumento de 70%. Isso está de acordo com Huo [30], que observou um aumento de 35% na reatividade ao passar de carvão vegetal feito de palha para carvão vegetal feito de serragem. Isso demonstra que o biocarvão carbonizado de fontes muito diferentes terá reatividade ao CO_2 . A comparação entre o coque e o carvão vegetal aumenta a reatividade em cerca de 10 vezes e mostra que há uma grande diferença de reatividade entre os grupos de carbono.

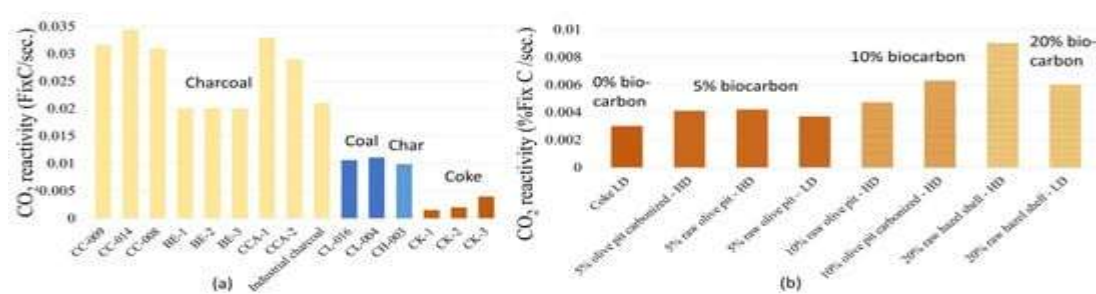


Figura 8. Comparação da taxa de reação do CO_2 (=reatividade do CO_2) a 1190 °C para diferentes materiais. (a) mostra a comparação de carvão vegetal, carvão mineral, carvão mineral e coque, e (b) mostra coque metalúrgico com mais ou menos biocarvão misturado na carga durante a produção de coque [7].

As barras amarelas mostram vários tipos de carvão vegetal, o azul escuro é carvão mineral calcinado, o azul claro é carvão mineral e o marrom é coque; misturas de marrom e amarelo são coque com biocarvão).

Um fator importante que afeta a reatividade do CO_2 é o teor de álcalis, conforme discutido em [27]. O material de carbono apresentará alguns álcalis, mas a maior parte dos álcalis em fornos industriais pode provir do acúmulo de álcalis.

A Figura 9 mostra exemplos de reatividades em que materiais de carbono são impregnados com quantidades crescentes de potássio. Inicialmente, a diferença na reatividade do CO_2 entre o carvão vegetal e o coque é bastante alta, com o carvão vegetal apresentando uma reatividade ao CO_2 aproximadamente 10 vezes maior em comparação com o coque.

No entanto, a reatividade do CO_2 aumenta com o teor de potássio e, no exemplo mostrado, a diferença entre o carvão vegetal e o coque é de cerca de 30% a 4%–6% de K. Ao examinar materiais granulados e aglomerados feitos do mesmo carvão vegetal, observa-se que a reatividade é bastante semelhante para os dois materiais de biocarbono, como visto na Figura 9b .

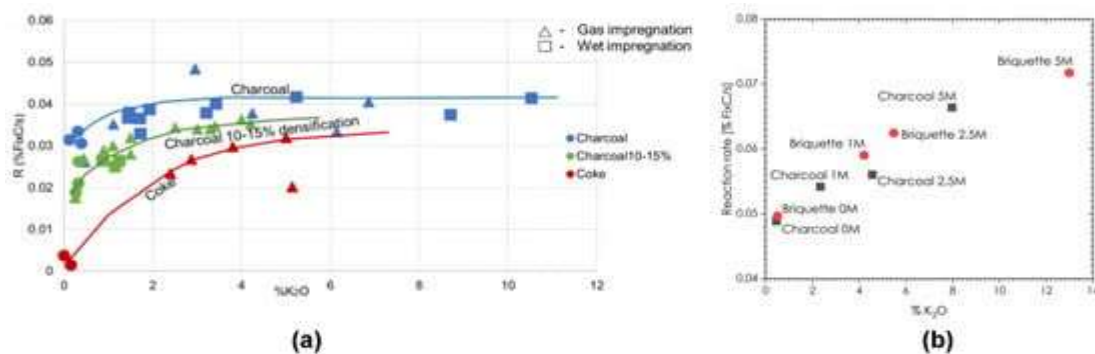


Figura 9. Reatividade do CO_2 (=taxa de reação) versus teor de potássio impregnado onde:

(a) carvão vegetal, carvão vegetal densificado e coque são comparados e (b) carvão vegetal em pedaços (quadrados pretos) e briquetes de carvão vegetal (do mesmo carvão vegetal) (círculos vermelhos) são comparados [6 , 34].

A Figura 10 verifica a maior reatividade do carvão vegetal em comparação com o coque. Observa-se que, durante o aquecimento, em condições não isotérmicas, o carvão vegetal começa a reagir a uma temperatura inferior à do coque. Enquanto o coque requer uma temperatura de cerca de 1000 °C, o carvão vegetal inicia a reação entre 800 e 850 °C.

Contudo, quando o carbono apresenta um teor de potássio mais elevado, a temperatura inicial diminui para ambos os materiais. Vale mencionar que uma regra prática de cerca de 800 °C tem sido utilizada durante os experimentos de pré-redução para o início da reação de Boudouard. E essa temperatura corresponde a um teor de potássio de 3%–4% K, o que está de acordo com os resultados obtidos para o coque em leitos.

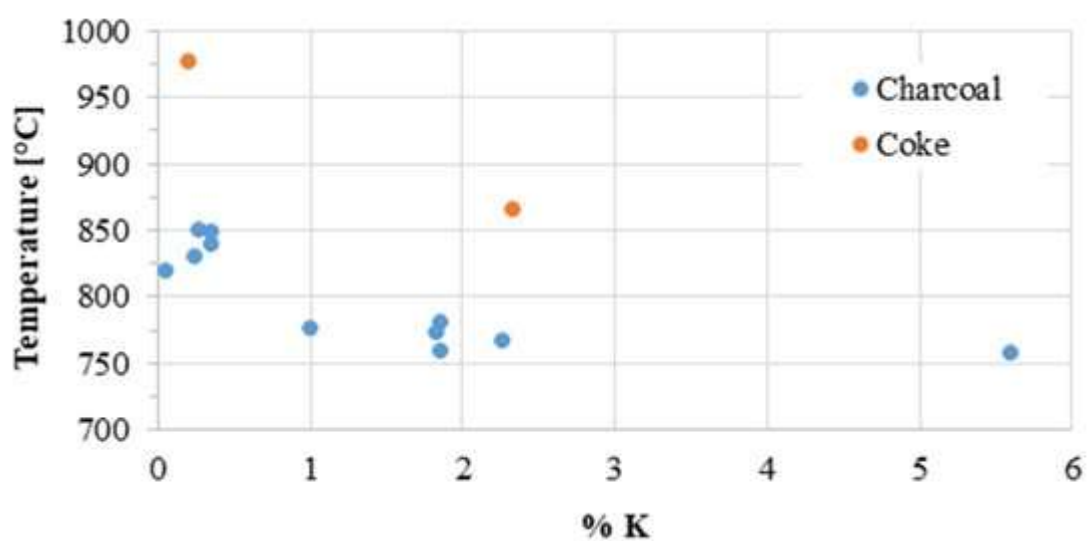


Figura 10. Influência da temperatura inicial na reatividade do CO₂ durante experimentos não isotérmicos [7].

Existem muitas diferenças entre o carvão vegetal e o coque que podem explicar as diferentes taxas de reação, variando da porosidade à estrutura e composição do carbono. Embora isso esteja além do escopo deste artigo, vale ressaltar que o carvão vegetal reage topoquimicamente, enquanto o coque reage em áreas específicas dentro da partícula, como mostrado na Figura 11 .

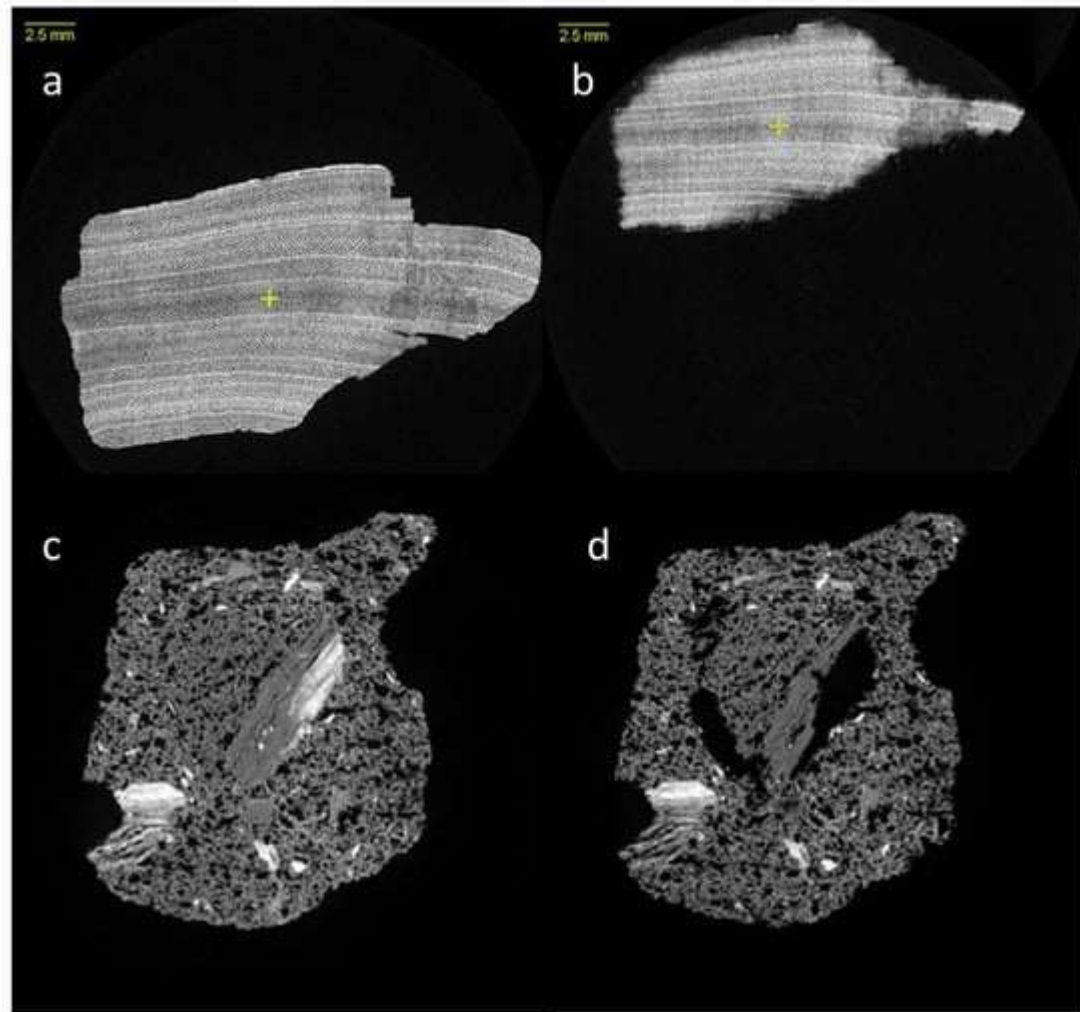


Figura 11. Imagens de TC de (a) carvão vegetal e (b) carvão vegetal oxidado comparados com (c) coque e (d) coque oxidado. O carvão vegetal é reagido topoquimicamente enquanto o coque é reagido em áreas designadas dentro das partículas [14].

4. Reatividade da Escória

A reatividade da escória em materiais carbonáceos é definida como a redução de uma escória líquida a metal. Ligas de Mn, contendo Mn, Si, Fe e C, serão usadas aqui como exemplo. O ferro será reduzido principalmente no estado sólido, portanto, quando a escória líquida se forma, ela tipicamente contém uma mistura de MnO, SiO₂, CaO, Al₂O₃ e MgO. A reação da escória é descrita pelas seguintes reações químicas.

Na produção de SiMn, ambas as reações ocorrem simultaneamente, enquanto em ligas de FeMn, a reação do silício é mínima. A partir de medições em escala piloto e industrial, o teor de MnO em escórias de FeMn tipicamente fica entre 15 e 40% em peso de MnO, enquanto as escórias de SiMn contêm entre 10 e 20% em peso de MnO [35 , 36 , 37 , 38]. Em escórias de FeMn, a cinética de redução depende da distribuição de fases na escória, enquanto em escórias de SiMn, apenas a fase líquida está presente [35 , 39 , 40]. Os estudos aqui relatados foram todos conduzidos em um forno de gota sésil, conforme descrito em [41], onde a gota após a redução é caracterizada usando uma microsonda eletrônica (EPMA). Os substratos são feitos do material de carbono que está sendo investigado.

Em experimentos com FeMn, observou-se que o coque apresentou reatividade ligeiramente maior que o carvão vegetal em um dos estudos [42], enquanto que na segunda investigação (Figura 12) [41] a reatividade foi significativamente maior.

Esses resultados são consistentes com os de Teasdale e Hayes [43], que constataram que o coque metalúrgico reduziu o FeO na escória mais rapidamente que o carvão vegetal. No entanto, existem relatos de [44] que contradizem essas descobertas. Eles constataram que o carvão vegetal apresentou reatividade maior que o coque, a antracita e o grafite, mas as diferenças foram pequenas e dentro de uma faixa de incerteza experimental aceitável.

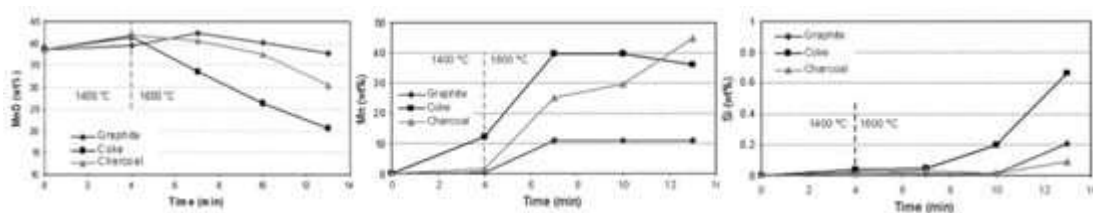


Figura 12. Teor de MnO na escória, teor de Mn e Si no metal, em função do tempo, e materiais de carbono constituídos por 39% de MnO, 29% de SiO₂ escória a 1600 °C em gás Ar [41].

A reatividade do SiMn segue um caminho mais complexo devido ao fato de duas reações ocorrerem simultaneamente. Foi constatado que o enxofre atua como catalisador nessas reações [45 , 46 , 47 , 48].

Para escórias com teor de enxofre muito baixo, o coque apresenta maior reatividade do que o carvão vegetal, como mostrado na Figura 13.

Quando pequenas quantidades de enxofre são adicionadas à escória, o carvão vegetal exibe maior reatividade em comparação com o coque [48 , 49].

Isso ocorre porque o coque tipicamente possui um teor de enxofre maior do que o carvão vegetal, exemplificado por 5000 ppm de S no coque e 20 ppm no carvão vegetal [41]. Isso pode ser parcialmente explicado por uma maior molhabilidade entre o carvão vegetal e a escória quando há até 0,3% de S na escória, em comparação com valores de enxofre mais baixos.

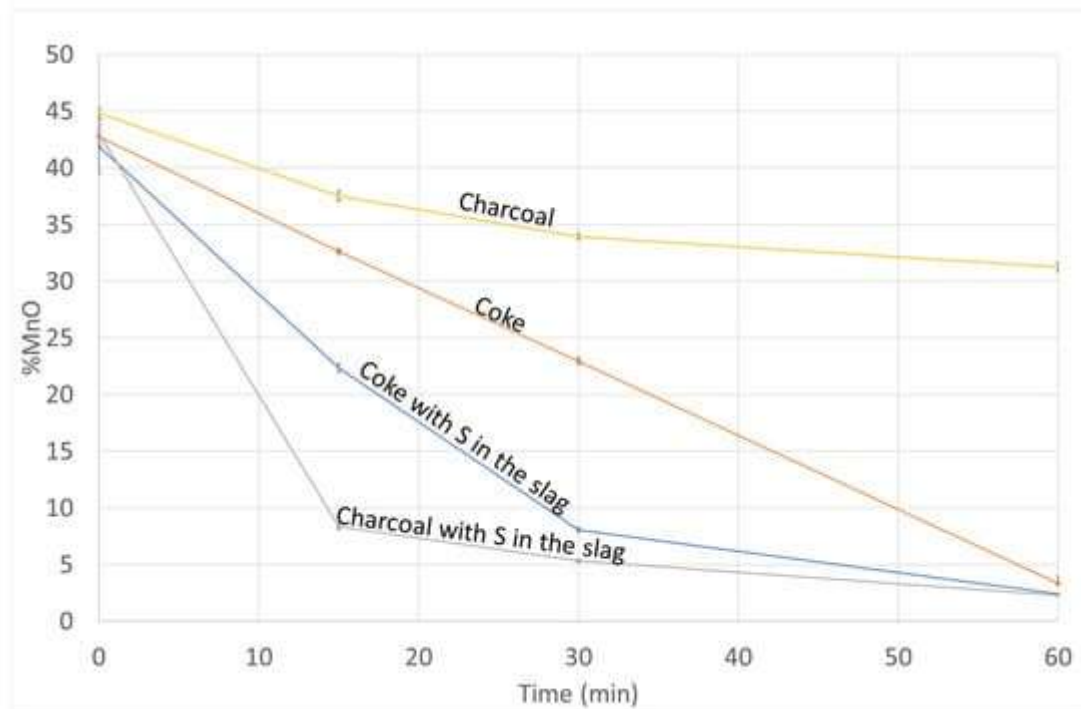


Figura 13. A %MnO diminui com o tempo usando briquetes de coque e carvão, com e sem adição de uma pequena quantidade de enxofre na escória [48].

5. Resistividade elétrica de materiais de carbono. A resistividade elétrica dos materiais em um forno de arco submerso (SAF) determina os caminhos da corrente elétrica, a posição da ponta do eletrodo e a carga total no forno [50 , 51 , 52].

Ao trocar um material de carbono por outro, é importante entender como o sistema elétrico reagirá. A resistividade elétrica de materiais a granel [53 , 54 , 55 , 56 , 57] e a resistência de partículas e de contato [58] de materiais de carbono secos, bem como com a presença de escória, foram estudadas [54 , 59]. Isso também foi estudado fora da NTNU/SINTEF [60 , 61 , 62], mas não será discutido em detalhes, pois outras geometrias e métodos são utilizados. Esta parte do artigo, portanto, resumirá a resistividade a granel de leitos de coque, com e sem escória. Todos os estudos descritos aqui são feitos com o método de quatro pontos, tipicamente com partículas de 10–15 mm e eletrodos superior e inferior. O volume total varia de ~30 L [58] a cerca de ~1 L [63].

A resistividade elétrica dos leitos de coque varia com o tipo de material, como ilustrado na Figura 14. Para o coque, que já foi aquecido no processo de coqueificação, a resistividade elétrica é bastante constante na faixa de 1000 a 1600 °C. A resistência entre diferentes tipos de coque varia por um fator de 1 a 2. Isso não ocorre com o coque de petróleo, que segue a mesma tendência da antracita e do carvão vegetal, onde a resistividade elétrica diminui com a temperatura.

Na área do leito de coque, em temperaturas em torno de 1500–1600 °C, a resistividade do carvão vegetal, do coque de petróleo e da antracita é geralmente um pouco maior do que a do coque.

Também se constatou que o carvão vegetal, na mesma faixa de resistividade e acima, é comparável a carbonos fósseis como o semicoque e o carvão calcinado [55 , 57].

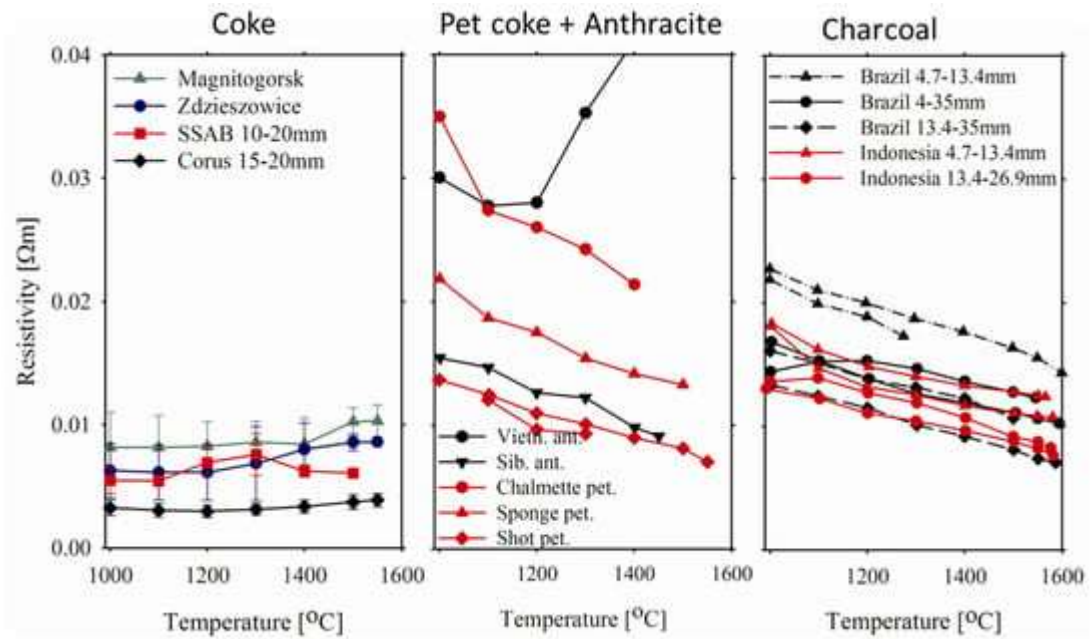


Figura 14. Resistividade elétrica do coque, coque de petróleo, antracito e carvão vegetal [58].

A resistividade volumétrica discutida acima foi medida sem escória, em um teste do tipo leito de coque seco. A resistência em um leito de coque de forno em escala piloto foi medida e a resistividade foi calculada para observar como ela se alterava com a presença de escória.

Quando uma escória com resistividade de $25 \text{ m}\Omega\cdot\text{m}$ foi utilizada em um leito de coque seco com resistividade de $4 \text{ m}\Omega\cdot\text{m}$, o leito de coque com escória apresentou a mesma resistividade do leito de coque seco, $4 \text{ m}\Omega\cdot\text{m}$. Quando uma escória mais condutora, com resistividade de cerca de $6 \text{ m}\Omega\cdot\text{m}$, foi utilizada, a resistividade total diminuiu para cerca de $1,5 \text{ m}\Omega\cdot\text{m}$. Isso está de acordo com os resultados de Surup [59], que mostram que uma escória condutora reduz a resistividade geral. A resistividade elétrica de materiais a granel também depende do tamanho das partículas, como mostrado na Figura 15 .

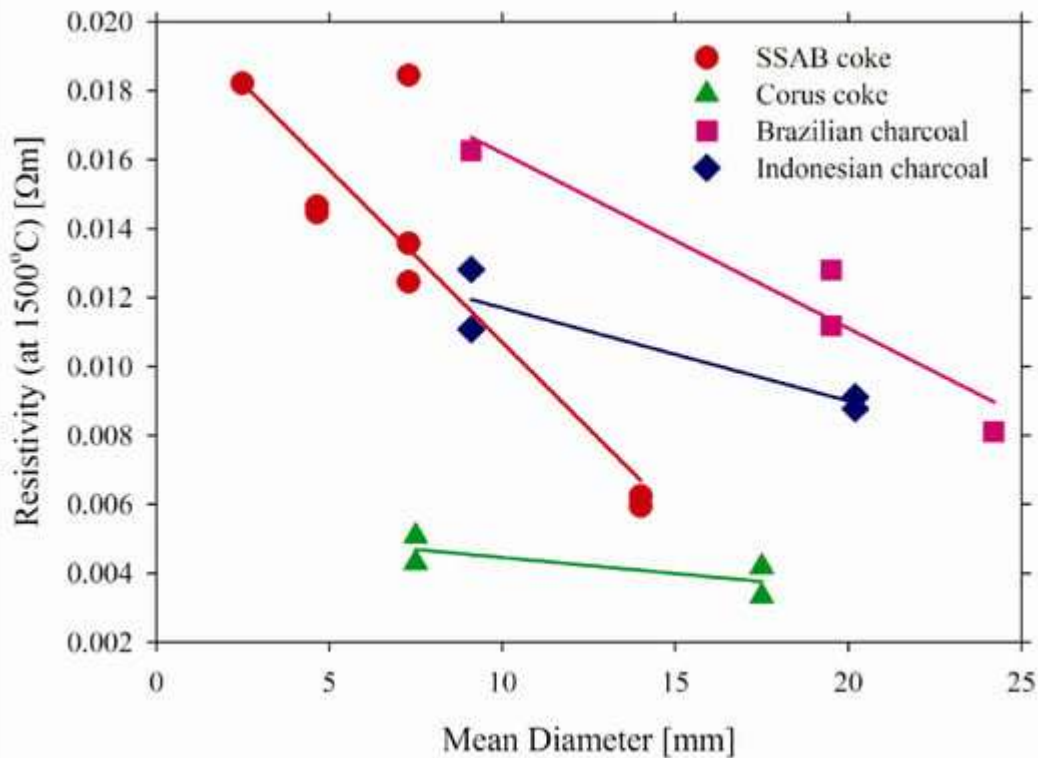


Figura 15. Resistência elétrica em função do tamanho das partículas de coque e carvão [53].

O material de carbono se altera quando aquecido. Em processos como a produção de ferro-ligas de Mn e Si, o CO_2 queima parte do carbono e altera a porosidade e/ou o tamanho das partículas. Em um forno de ferro-ligas de Mn, o carbono pode ser consumido em até 20% na zona de pré-redução com CO_2 . O material pré-reduzido, ou não pré-reduzido, apresenta resistividade semelhante, como mostrado na Figura 16, tanto para coque quanto para carvão vegetal [60]. Na produção de ferro-ligas de Si e silício, o carbono também é transformado em SiC e, com o aumento da transformação em SiC, a resistividade elétrica aumenta [63]. Quando o silício líquido penetra nas partículas de carbono, a resistividade diminui novamente.

Isso é resumido na Figura 17 , onde se observa que o carbono transformado em SiC apresenta uma resistividade bastante alta. A crosta de SiC (rotulada: amostras industriais de SiC) tem, no entanto, uma resistividade muito menor [64], e espera-se que a maior parte da corrente passe pelo arco ou através da crosta de SiC.

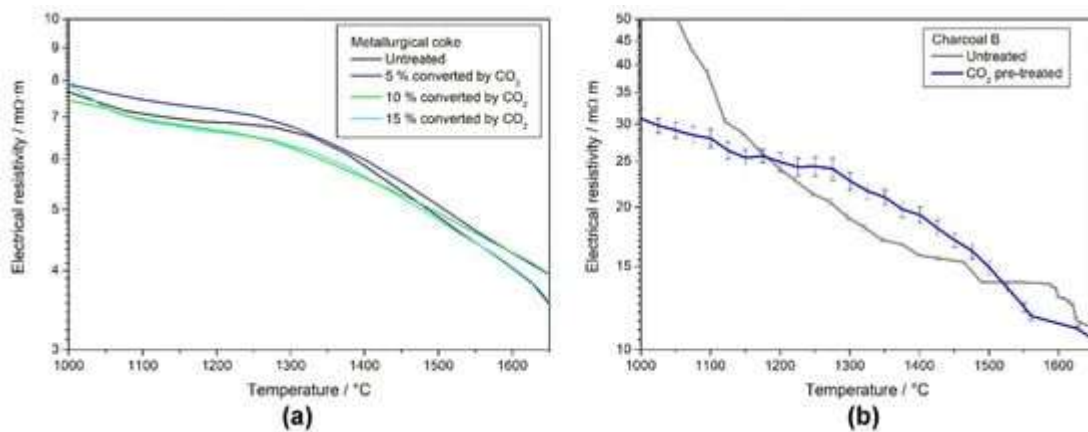


Figura 16. Resistividade elétrica de (a) coque parcialmente queimado e (b) carvão vegetal pré-tratado a 1100 °C em uma mistura de 50/50 vol.% N₂/CO₂ [59].

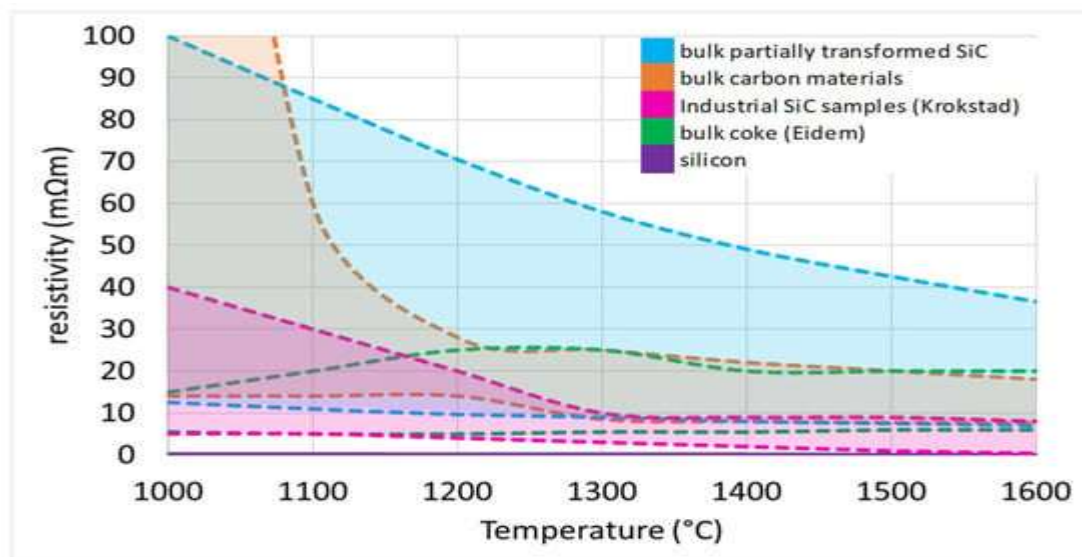


Figura 17. Resumo da resistividade elétrica de vários materiais condutores que podem ser encontrados no forno de ferro-liga de Si [63].

6. Conclusões

Para descarbonizar seus processos, muitos produtores de ferro-ligas substituirão sua mistura de carga de coque, carvão e carvão vegetal por biocarvão. Como o carvão vegetal granulado é o material mais consolidado dentro do grupo do biocarvão, suas propriedades têm sido investigadas.

Ao substituir o coque fóssil por carvão vegetal, diversas mudanças ocorrerão, afetando a operação do forno de arco submerso.

A densidade do carvão vegetal é menor que a do coque, resultando em um fluxo de carga mais rápido. A maior quantidade de voláteis pode afetar a composição dos gases de exaustão, bem como a pré-redução do minério. A reatividade do CO_2 é aproximadamente 10 vezes maior para o carvão vegetal em comparação com o coque metalúrgico. No entanto, na presença de álcalis no forno, a reatividade do carvão vegetal será apenas 30% a 100% maior. Com a presença de álcalis em fornos industriais, ocorrerá maior consumo de carbono e energia devido ao aumento da extensão da reação de Boudouard. A reatividade da escória também será afetada ao se utilizar carvão vegetal em vez de coque, embora isso possa não ser significativo. Por fim, a resistividade elétrica do carvão vegetal é um pouco maior que a do coque, mas ainda na mesma ordem de grandeza. Uma resistividade maior resultará em um comportamento elétrico mais estável.

Contribuições dos autores

MT: redação dos capítulos 1, 3, 4 e 5; ER: redação do capítulo 2 — preparação do rascunho original, MT e ER; redação — revisão e edição, MT e ER;

supervisão do trabalho revisado, MT e ER; administração do projeto, MT e ER; obtenção de financiamento. Todos os autores leram e aprovaram a versão final do manuscrito.

Financiamento

Esta pesquisa foi financiada pelo Conselho Norueguês de Pesquisa, através da bolsa BioMet número 336175, e pela bolsa FME Zero Emission Metal Production número 350325.

Declaração de Disponibilidade de Dados

Como se trata de uma revisão, os dados originais são apresentados nas publicações originais listadas na lista de referências.

Agradecimentos

Cabe ressaltar que o Copilot, versão 4.0, foi utilizado para aprimorar o idioma.

Conflitos de interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse. Os financiadores não tiveram qualquer participação no planejamento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; nem na redação do manuscrito. De acordo com o acordo de consórcio entre as instituições de pesquisa e os financiadores industriais, estes foram contatados antes da submissão da publicação para identificar possíveis informações e antecedentes confidenciais da indústria.

Referências

Nøstvold, C.; Pastor-Vallés, E.; Andersen, V.; Tranell, G.; Pettersen, JB. Avaliação do ciclo de vida do silício de grau metalúrgico comparando misturas de carga e rendimentos. *J. Sustain. Metall.* 2024. [Google Scholar] [CrossRef]
Westfall, LA; Davourie, J.; Ali, M.; McGough, D. Avaliação do ciclo de vida "do berço ao portão" da produção global de ligas de manganês. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2016 , 21 , 1573–1579. [Google Scholar] [CrossRef]

Larssen, TA; Canaguier, V.; Reuter, MA; Ringdalen, E. Integração de simulação de processo e avaliação do ciclo de vida para maior eficiência do processo e redução do impacto ambiental na produção de ferromanganês. *Metals* 2024 , 14 , 1212. [Google Scholar] [CrossRef]

Hauser, P. O bom, o mau e o feio: Promovendo a neutralidade climática, a competitividade e a autonomia estratégica da Europa com o fornecimento de silício verde. In *Anais do Silicon for the Chemical and Solar Industry XVII*, Trondheim, Noruega, 10–13 de setembro de 2024. [Google Scholar]

Brekke, A.; Soldal, E. Não se vê a floresta por causa do carvão: o impacto ambiental do uso de materiais de base biológica na indústria do silício. In *Anais do Silicon for the Chemical and Solar Industry XVI*, Trondheim, Noruega, 14–16 de junho de 2022. [Google Scholar] [CrossRef]

Tangstad, M.; Solberg, E.; Larsen, M.; Kaffash, H. Reatividade do CO₂ com potássio e resistência do carvão vegetal densificado. *Adv . Min. Miner. Eng.* 2024 , 1. Disponível online: <https://irispublishers.com/amme/pdf/AMME.MS.ID.000508.pdf>

Jayakumari, S.; Jahrsengene, G.; Ksiazek, M.; Ringdalen, E. Investigações sobre a reatividade do CO₂ e a resistência térmica de fontes de carbono para a produção de ferro-ligas e silício. In *Anais da 62ª Conferência de Metalurgistas, COM 2023*, Toronto, ON, Canadá, 21–24 de agosto de 2023; Springer Nature: Cham, Suíça, 2023; pp. 1009–1018. [Google Scholar]

Saito, Y.; Tsukamoto, C. Força do coque quente na reação de CO₂. *ISIJ Int.* 2022 , 62 , 606–608. [Google Scholar] [CrossRef]

Kurauchi, MHN; Takano, C.; Narita, CY; Mourão, MB Teste em escala laboratorial de resistência à compressão de carvão: uma nova abordagem. In *Anais do 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 15º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro*, Belo Horizonte, Belo Horizonte, Brasil, 15–18 de setembro de 2014; páginas 4909–4916. [Google Scholar] [CrossRef]

Jayakumari, S.; Ksiazek, M. Geração de finos e resistência de vários materiais de carbono usados nas indústrias de ferro-ligas. In *Anais do Silicon for the Chemical and Solar Industry XVII*, Trondheim, Noruega, 10–13 de setembro de 2024; ISBN 978-82-692919-3-3. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Kumar, M.; Gupta, RC. Influência das condições de carbonização na deposição pirolítica de carbono em carvões de madeira de acácia e eucalipto. *Energy Sources* 1997 , 19 , 295–300. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Kumar, M.; Verma, BB; Gupta, RC Propriedades mecânicas de carvões de madeira de acácia e eucalipto. *Energy Sources* 1999 , 21 , 675–685. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Jusnes, KF; Tangstad, M.; Ringdalen, E. Aquecimento por choque de quartzo usado na produção de silício e ferrossilício. In *Anais do Infacon XV: Congresso Internacional de Ferro-Ligas, Cidade do Cabo, África do Sul, 25–28 de fevereiro de 2018*; Jones, RT, den Hoed, P., Erwee, MW, Eds.; Instituto Sul-Africano de Mineração e Metalurgia: Joanesburgo, África do Sul, 2018. [[Google Scholar](#)]

Rørvik, S.; Smith-Hanssen, N.; Jayakumari, S.; Wang, L. Caracterização de biocarbono para processos metalúrgicos usando microtomografia computadorizada de raios X com experimentos de alta temperatura. Em *Advances in Pyrometallurgy* ; Fleuriaux, C., Steenkamp, JD, Gregurek, D., White, JF, Reynolds, QG, Mackey, PJ, Hockaday, SAC, Eds.; Springer Nature: Cham, Suíça, 2023; pp. 179–197. [[Google Scholar](#)]

Ringdalen, E.; Gärtner, H. Efeito das propriedades físicas do biocarbono na produção de ligas de Si e Mn. In *Anais da Conferência Internacional de Ferro-ligas (INFACON)*, Pequim, China, 18–22 de setembro de 2024. [[Google Scholar](#)]

Tangstad, M.; Beukes, JP; Steenkamp, JD; Ringdalen, E. Capítulo 14: Agentes redutores à base de carvão na produção de ferro-ligas e silício. Em *Novas tendências na conversão de carvão: combustão, gaseificação, emissões e coqueificação* ; Suarez-Ruiz, I., Diez, MA, Rubiera, F., Eds.; Woodhead

Publishing: Cambridge, Reino Unido, 2018; ISBN 978-0-08-102202-3. [Google Scholar]

Chunsan, L. Propriedades do alcatrão, análise, mecanismo de reforma e modelo para gaseificação de biomassa. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009 , 13 , 594–604. [Google Scholar]

Wang, L.; Skreiberg, Ø.; Gronli, M.; Specht, GP; Antal, MJ, Jr. É necessária pressão elevada para atingir um alto rendimento de carbono fixo no carvão vegetal a partir de biomassa? Parte 2: A importância do tamanho das partículas. *Energy Fuels* 2013 , 27 , 2146–2156. [Google Scholar] [CrossRef]

Nishfuji, M.; Fujioka, Y.; Saito, K. Caracterização da geração de gás durante a reação de coqueificação e monitoramento contínuo de COG usando monitoramento de gás ; Nippon Steel: Tóquio, Japão, 2011. [Google Scholar]

Smith-Hanssen, N.; Jahrsengene, G.; Ringdalen, E. Materiais de biocarbono em processos metalúrgicos — Investigação de propriedades críticas. In *Anais do Advances in Pyrometallurgy*; Fleuriaux, C., Steenkamp, JD, Gregurek, D., White, JF, Reynolds, QG, Mackey, PJ, Hockaday, SAC, Eds.; Springer Nature: Cham, Suíça, 2023; pp. 165–177. [Google Scholar]

Aderibigbe, DB; Szekely, J. Estudos sobre a reatividade do coque: Parte 1. Reação do coque produzido convencionalmente com misturas de CO-CO₂ na faixa de temperatura de 850–1000°C. *Ironmaking Steelmak.* 1981 , 1 , 11–19. [Google Scholar]

Ergun, S. Cinética da reação do carbono com o dióxido de carbono. *J. Phys. Chem.* 1956 , 60 , 480–485. [Google Scholar] [CrossRef]

Mianowski, A.; Radko, T.; Siudyga, T. Influência das suposições iniciais nos modelos cinéticos da gaseificação de CO₂ de carvões e coques em fase sólida. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016 , 126 , 1911–1923. [Google Scholar] [CrossRef]

Alam, M.; Debroy, T. Os efeitos de CO e CO₂ na taxa da reação de Boudouard catalisada por Na₂CO₃ . *Metall . Trans . B* 1984 , 15 , 400–403. [Google Scholar] [CrossRef]

Rao, YK; Adjorlolo, A.; Haberman, JH Sobre o mecanismo de catálise da reação de Boudouard por compostos de metais alcalinos. *Carbon* 1982 , 20 , 207–212. [Google Scholar] [CrossRef]

Liu, Y.; Wang, Z.; Wan, K.; Lv, Y.; Xia, J.; He, Y.; Cen, K. Medições in situ das características de liberação e efeitos catalíticos de diferentes formas químicas de sódio durante a combustão do carvão de Zhundong. *Energy Fuels* 2018 , 32 , 6595–6602. [Google Scholar] [CrossRef]

Lindstad, T.; Syvertsen, M.; Ishak, R.; Arntzen, HB. A influência dos álcalis na reação de Boudouard. In *Anais da X Conferência Internacional de Ferro-ligas, Cidade do Cabo, África do Sul, 1–4 de fevereiro de 2004*. [Google Scholar]

Kwon, T.-W.; Kim, SD; Fung, DPC. Cinética da reação de gaseificação de carvão com CO₂ . *Fuel* 1988 , 67 , 530–535. [Google Scholar] [CrossRef]

Samsig, B. (NTNU, Trondheim, Noruega). Reatividade do CO₂ em coque e carvão vegetal. Trabalho não publicado. 2017. [Google Scholar]

Huo, W.; Zhou, Z.; Chen, X.; Dai, Z.; Yu, G. Estudo sobre a reatividade da gaseificação de CO₂ e características físicas de biomassa, coque de petróleo e carvão vegetal. *Bioresour. Technol.* 2014 , 159 , 143–149. [Google Scholar] [CrossRef]

Kaffash, H.; Tangstad, M. Gaseificação de CO₂ de biomassa densificada: a influência de K na taxa de reação. *JOM* 2022 , 74 , 1900–1907. [Google Scholar]

Solhaug, E. Biocarbono densificado e o efeito do potássio na reatividade do CO₂. *Processes* 2021 , 9 , 193. [Google Scholar]

Monsen, B.; Tangstad, M.; Solheim, I.; Syvertsen, M. Carvão para produção de liga de manganês ; Associação Indiana de Produtores de Ferroligas: Nova Deli, Índia, 2007; Volume 11, pp. [Google Acadêmico]

Polkowski, W.; Wallin, M.; Korol, N.; Tangstad, M. Briquete vs. Carvão: Um estudo comparativo sobre a reatividade de diferentes materiais de biocarbono impregnados com potássio com CO₂ / CO. In *Anais do Infacon XVII, Pequim, China, 18–22 de setembro de 2024*. [Google Scholar]

Tangstad, M.; Bublik, S.; Haghdani, S.; Einarsrud, KE; Tang, K. Propriedades da escória no processo de produção primária de ferro-ligas de Mn. *Metall. Mater. Trans. B* 2021 , 52 , 3688–3707. [Google Scholar] [CrossRef]

Lagendijk, H. Comparação da fundição de ferro-ligas de manganês em fornos de arco submerso CA e CC em escala piloto. In *Anais do Décimo Segundo Congresso Internacional de Ferro-ligas, Helsinque, Finlândia, 6–9 de junho de 2010*; pp. 497–507. [Google Scholar]

Eissa, M.; El-Faramawy, H.; Ahmed, A.; Nabil, S.; Halfa, H. Parâmetros que afetam a produção de ferromanganês de alto carbono em forno de arco submerso fechado. *J. Miner. Mater. Charact. Eng.* 2012 , 11 , 1–20. [Google Scholar] [CrossRef]

Coetsee, T.; Reinke, C.; Nell, J.; Pistorius, PC. Mecanismos de redução na redução de minério de manganês. *Metall. Mater. Trans. B* 2015 , 46 , 2534–2552. [Google Scholar] [CrossRef]

Haccuria , E.; Hayes, PC; Jak, E. Estudos de equilíbrio de fases do sistema “MnO”–Al₂O₃ – SiO₂ em equilíbrio com liga metálica. Parte 2: Equilíbrio de fases. *Int. J. Mater. Res.* 2015 , 106 , 225–236. [Google Scholar] [CrossRef]

Zhao, B.; Jak, E.; Hayes, PC . Equilíbrios de fase no sistema “MnO”–CaO–MgO–SiO₂ – Al₂O₃ com razão ponderal Al₂O₃ / SiO₂ de 0,17 e razão ponderal MgO/CaO de 0,25 na saturação da liga Mn–Si. *ISIJ Int.* 2006 , 46 , 1594–1602. [Google Scholar] [CrossRef]

Safarian, J.; Kolbeinsen, L.; Tangstad, M.; Tranell, G. Cinética e mecanismo da redução carbotérmica simultânea de FeO e MnO a partir de escória ferromanganesa de alto carbono. *Metall. Mater. Trans. B* 2009 , 40 , 929–939. [Google Scholar] [CrossRef]

Safarian, J.; Tranell, G.; Kolbeinsen, L.; Tangstad, M.; Gaal, S.; Kaczorowski, J. Cinética de redução de MnO de escórias de ferromanganês com alto teor de carbono por materiais carbonáceos em atmosferas de Ar e CO. *Conheci. Matéria. Trans B* 2008 , 39 , 702–712. [Google Scholar] [CrossRef]

Teasdale, S.; Hayes, PC. Observação da redução de FeO da escória por grafite, coque e carvão vegetal. *ISIJ Int.* 2005 , 45 , 634–641. [Google Scholar] [CrossRef]

Gaal, S.; Berg, K.; Tranell, G.; Olsen, SE; Tangstad, M. Uma investigação sobre aspectos da redução em fase líquida de escória contendo manganês e sílica. In *Anais da 7ª Conferência Internacional sobre Escórias Fundidas, Fundentes e Sais*, Cidade do Cabo, África do Sul, 25–28 de janeiro de 2004; Instituto Sul-Africano de Mineração e Metalurgia: Joanesburgo, África do Sul, 2004; Volume VII, pp. 651–659. [Google Scholar]

Canaguier, V.; Tangstad, M. Cinética da redução de escória na produção de silicomanganês. *Met. Mater. Trans B* 2020 , 51 , 953–962. [Google Scholar] [CrossRef]

Canaguier, V.; Tangstad, M. Observação in situ da redução carbotérmica e formação de espuma de escórias na produção de silicomanganês. *Processes* 2021 , 9 , 2020. [Google Scholar] [CrossRef]

Kim, P.; Larssen, T.; Tangstad, M.; Kawamoto, R. Energias de ativação empíricas da redução de MnO e SiO₂ em escórias de SiMn entre 1500 e 1650 °C. Em *Aplicações dos princípios de engenharia de processos no processamento de materiais, energia e tecnologias ambientais* ; Wang, S., Free, ML, Alam, S., Zhang, M., Taylor, PR, Eds.; Série Minerais, Metais e Materiais; Springer International Publishing: Cham, Suíça, 2017; pp. 475–483. ISBN 978-3-319-51090-3. [Google Scholar]

Hosum, BD. Taxa de redução de escórias SiMn com diferentes materiais de carbono. *Dissertação de Mestrado*, NTNU, Trondheim, Noruega, 2020. [Google Scholar]

Forberg, S. Redução de escórias SiMn com coque e carvão vegetal como redutores. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia: Trondheim, Noruega, 2023. [Google Scholar]

Tesfahunegn, YA; Magnusson, T.; Tangstad, M.; Saevarsdottir, G. Efeito da forma do eletrodo na distribuição de corrente em fornos de arco submerso para produção de silício — uma abordagem de modelagem. *JS Afr. Inst. Min. Metall.* 2018 , 118 , 595–600. [Google Scholar] [CrossRef]

Tesfahunegn, YA; Magnusson, T.; Tangstad, M.; Saevarsdottir, G. Efeito da configuração do carboneto na distribuição de corrente em fornos de arco submerso para produção de silício — Uma abordagem de modelagem. Em *Modelagem e simulação CFD no processamento de materiais 2018* ; Nastac, L., Pericleous, K., Sabau, AS, Zhang, L., Thomas, BG, Eds.; Série Minerais, Metais e Materiais; Springer International Publishing: Cham, Suíça, 2018; pp. 175–185. ISBN 978-3-319-72058-6. [Google Scholar]

Magnussen, T. Parâmetros básicos na operação e projeto de fornos de arco submerso, com referência particular à produção de ligas de alto teor de silício. *J. South. Afr. Inst. Min. Met.* 2018 , 118 , 631–636. [Google Scholar]

Eidem, PA Resistividade elétrica de leitos de coque. Tese de doutorado, Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (NTNU), Trondheim, Noruega, 2008. [Google Scholar]

Eidem, PA Condições elétricas de um leito de coque na produção de SiMn. *Can. Metall. Q.* 2009 , 48 , 355–368. [Google Scholar] [CrossRef]

Pedersen, T. Resistividade elétrica em materiais de carbono convertidos em SiC. Dissertação de mestrado, Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Trondheim, Noruega, 2020. [Google Scholar]

Surup, GR; Pedersen, TA; Chaldien, A.; Beukes, JP; Tangstad, M. Resistividade elétrica de material de leito carbonáceo em alta temperatura. *Processes* 2020 , 8 , 933. [Google Scholar] [CrossRef]

Hoover, H.; Saevarsdottir, G.; Tangstad, M. Resistividade elétrica de materiais de carbono transformados no forno de silício. Em *Furnace Tapping 2022* ; Steenkamp, JD, Gregurek, D., Reynolds, QG, Alvear Flores, G., Joubert, H.,

Mackey, PJ, Eds.; The Minerals, Metals & Materials Series; Springer International Publishing: Cham, Suíça, 2022; pp. 185–197. ISBN 978-3-030-92543-7. [Google Scholar]

Eidem, PA Medição da resistividade do material e da resistência de contato do coque metalúrgico. In Anais do INFACON XI, Nova Delhi, Índia, 18–21 de fevereiro de 2007; pp. 1–11. [Google Scholar]

Surup, GR; Koseniuk, K.; Tangstad, M. A interação da escória e do carbono nas propriedades elétricas. Em Furnace Tapping 2022 ; Steenkamp, JD, Gregurek, D., Reynolds, QG, Alvear Flores, G., Joubert, H., Mackey, PJ, Eds.; The Minerals, Metals & Materials Series; Springer International Publishing: Cham, Suíça, 2022; pp. 171–183. ISBN 978-3-030-92543-7. [Google Scholar]

Nurmukhanbetov, Z.; Privalov, O.; Privalov, L. Redutibilidade e resistência elétrica de materiais carbonáceos em processos de fundição de ferro-ligas. In Anais do Décimo Terceiro Congresso Internacional de Ferro-ligas: Tecnologias Eficientes na Indústria de Ferro-ligas, Almaty, Cazaquistão, 9–12 de junho de 2013. [Google Scholar]

Cromarty, R.; Nhiwatiwa, J. Avaliação da resistividade do coque para o mercado de ligas de manganês. In Anais do INFACON XVI, Trondheim, Noruega, 27–29 de setembro de 2021. [Google Scholar]

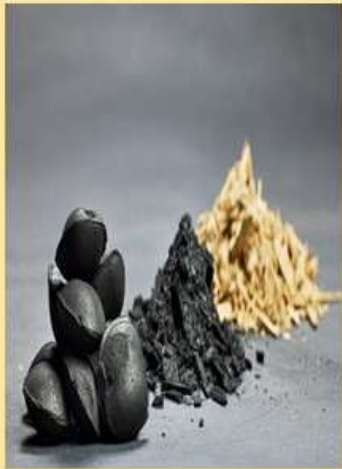
Aviso/Nota do Editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são de exclusiva responsabilidade dos autores e colaboradores individuais. Os editores se eximem de qualquer responsabilidade por danos a pessoas ou bens decorrentes de ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.

Tradução pelo Comitê de Estudos da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e do Instituto Brasileiro de Bioenergia e Desenvolvida pela equipe técnica e de consultoria da Brasil Biomassa e Energia Renovável

**BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL CONSULTORIA EM PROJETOS
BIOCARBONO MAPEAMENTO TIPOS DE BIOMASSA ENGENHARIA E TECNOLOGIA**

**BRASIL
BIOMASSA
CONSULTORIA
ESPECIALIZADA
PLANTAS DE
BIOCARBONO**

Consultoria Especializada em projetos de produção de biocarbono, bio-óleo e gás sintético, abrangendo todo o processo: business plan e mapeamento, estudo de viabilidade e financiamento, capex, opex., engenharia, tecnologia e crédito carbono.



Ajudamos as empresas em transformar os resíduos (florestais, madeira, agricultura e cana-de-açúcar) em produtos de maior valor agregado (biocarbono energético). Atuando desde o mapeamento e suprimento matéria-prima para a produção de Biocarbono.

**BRASIL
BIOMASSA
ESPECIALIZADA
MAPEAMENTO
TIPOS DE
BIOMASSA**

**BRASIL
BIOMASSA
TECNOLOGIA
PIRÓLISE
PRODUÇÃO DE
BIOCARBONO**

Tecnologia de pirólise que converte os tipos de biomassa em Biocarbono, bio-óleo e gás de síntese para atender às demandas energéticas (substituto coque) das indústrias de refino de alumínio, ferro, aço e cimentos e metais.



EXPERIÊNCIA PROFISSIONAL. Desenvolvimento de projeto industrial (consultoria, mapeamento engenharia) com aproveitamento de biomassa para a produção de Biocarbono - bio-óleo e gás sintético (uso alto fornos) para grupo GERDAU SIDERÚRGICA (MG) e REUNION/TECNORED/VALE SIDERÚRGICA (GO, PR, BA, MG, SP).

**BRASIL BIOMASSA CONSULTORIA ENGENHARIA TECNOLOGIA
FONE (41) 30406777 WHATS EMPRESARIAL (41) 998173023
E-MAIL diretoriabrasilbiomassa@gmail.com**

SÉRIE ESPECIAL LIVROS TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCARBONO

PLATAFORMA BRASIL BIOMASSA LIVROS <https://www.brasilbiomassa.com/livrosbiocarbono>







BIOCHAR ENERGÉTICO E SEQUESTRO DE CARBONO



Introdução. A crescente demanda por energia e o fenômeno do aquecimento global motivam a busca por fontes alternativas de energia e o combate aos gases de efeito estufa (GEE) em todo o mundo. As emissões de GEE devem atingir 60 gigatoneladas de CO_2 (GtCO_2)-eq/ano. Assim, manter a estabilidade da temperatura global abaixo de $1,5^\circ\text{C}$ torna-se difícil. Os esforços que podem ser feitos para evitar aumentos da temperatura global superiores a $1,5^\circ\text{C}$ incluem a redução das emissões de GEE em 15GtCO_2 -eq.

O desafio do setor agroindustrial vai exigir uma enorme quantidade de adubos e fertilizantes e o biochar pode ser uma solução ao setor.

O biochar é uma solução sustentável e multifuncional para mudanças climáticas pode ajudar a construir resiliência em comunidades locais de alto risco e sensíveis ao impacto das mudanças climáticas.

Em face do aumento das temperaturas globais, eventos climáticos extremos e a necessidade resultante de agricultura adaptada, o biochar oferece uma solução interseccional para questões em torno da degradação do solo, remoção de carbono, desafios de uso da terra, insegurança alimentar e desenvolvimento econômico.

O biochar é uma das tecnologias de CDR reconhecidas pelo IPCC e também é uma das soluções mais acessíveis e prontas para o mercado. A tecnologia de remoção de carbono do biochar foi responsável por 94% dos créditos de remoção de carbono entregues em 2023.

Biochar. O biochar pode utilizar 4,5 toneladas de CO₂ provenientes de resíduos, sendo, portanto, classificado como uma tecnologia eficaz de emissão negativa. Desafios em diversas áreas, incluindo aspectos econômicos, ambientais e tecnológicos, representam obstáculos para que o biochar atenda aos requisitos de uma estratégia de emissões negativas.

Do ponto de vista ambiental, os desafios das mudanças climáticas podem impactar o potencial da energia da biomassa, levando a condições ambientais mais adversas para a produtividade agrícola, incluindo aumento de temperaturas, inundações ou secas, alterações nos padrões de precipitação e ventos extremos. A utilização de biochar como alternativa de energia renovável para aproveitar a biomassa como substituta dos combustíveis fósseis é a estratégia mais eficaz para reduzir as emissões de GEE.

Como um recurso renovável abundante, os resíduos de biomassa podem ser facilmente convertidos em biocombustíveis por meio de diversas tecnologias. O potencial de recursos de biomassa no Brasil atinge o equivalente a 1,6 bilhões de toneladas envolvendo os resíduos da silvicultura e agroindustrial, com um aumento potencial de 400 milhões de toneladas com o uso dos resíduos da cana-de-açúcar.

No entanto, mais de 60% desses recursos de biomassa permanecem inexplorados ou depositados em lixões ou ainda no campo, sem uso comercial.

A utilização de biomassa como matéria-prima para produzir produtos energéticos alternativos pode ser uma solução sustentável para atender à demanda futura por commodities.

A remoção de carbono em larga escala, também conhecida como emissões negativas, é considerada um cenário importante e altamente promissor para a mitigação das mudanças climáticas. A implicação dessa abordagem é sequestrar carbono da forma mais eficaz possível para limitar o aumento da temperatura global. As tecnologias e abordagens utilizadas para essa remoção de carbono são conhecidas como práticas/tecnologias de emissões negativas. Métodos apropriados para a remoção de carbono incluem o uso de fontes de energia alternativas, incluindo fontes de base biológica.

Materiais derivados de biomassa, como o biochar, apresentam um potencial significativo para acelerar o desenvolvimento de tecnologias de produção de energia.

O biochar, como fonte de carbono negativo, pode ser usado para remover emissões (por exemplo, enxofre) durante sua produção por meio da captura de carbono. Os mecanismos de captura de carbono, que determinam a formação de carbono fixo, são amplamente utilizados em diversas indústrias.

A tecnologia de Captura e Armazenamento de CO₂ (CCS) é o principal meio de alcançar reduções nas emissões de CO₂ na indústria atual. Uma abordagem potencial dentro da tecnologia CCS é o uso de adsorventes de CO₂ para aumentar o sequestro de carbono. O biochar tem potencial para ser uma fonte de energia, para purificação de água e ar e como carvão vegetal para cozinhar em casa. Outros benefícios potenciais incluem a lixiviação de nitratos, a absorção de contaminantes inorgânicos e orgânicos e a redução das emissões de gases traço do solo e da atmosfera.

Características do biochar. Existem diversas maneiras de produzir biochar de boa qualidade. O aumento da temperatura de pirólise eleva o teor de carbono do biochar, melhorando sua estabilidade e potencial de sequestro de carbono. Além disso, concentrações mais elevadas de carbono também estão associadas a menores teores de hidrogênio e oxigênio.

Por exemplo, o aumento da temperatura de produção no processo de pirólise do biochar tende a aumentar o teor de carbono. Isso é importante para a estabilidade a longo prazo e o sequestro de carbono. Outro exemplo, na valorização de resíduos de algodão (RA) por meio de pirólise direta, mostrou que a estabilidade do biochar e a retenção de carbono.

Além disso, a composição do biochar pirolisado a 400 °C apresentou um teor de carbono de aproximadamente 70%, teor de hidrogênio ligeiramente inferior a 4% e teor de oxigênio variando de 24% a 25%. O aumento do carbono tende a diminuir o oxigênio e o hidrogênio.

As características das razões Oxigênio/Carbono (O/C) e Hidrogênio/Carbono Orgânico (H/Corg) também afetam o biochar. Por exemplo, a diminuição das razões O/C e H/Corg pode resultar em uma estrutura de carvão com maior aromaticidade e resistência à degradação microbiana e química. Uma razão O/C inferior a 0,32 indica uma meia vida do carvão superior a 500 anos.

Essa baixa razão H/Corg e O/C pode ser considerada de alta qualidade em termos da estabilidade da estrutura de durabilidade do biochar no solo, o que é um fator chave para emissões negativas. Enquanto isso, prevê-se que o biochar com uma razão O/C < 0,2 tenha uma meia-vida superior a 1000 anos, corroborando seu papel no sequestro de carbono a longo prazo. Na estimativa da estabilidade e durabilidade do biochar no solo, a razão atômica é observada como um indicador de qualidade.

As razões molares H/C org e O/C, que são usadas para a classificação do biochar de acordo com os padrões internacionais e o potencial de sequestro de carbono, são melhor correlacionadas com a matéria volátil (MV)/carbono fixo.

As normas de classificação do biochar também são aplicadas por órgãos internacionais, como a International Biochar Initiative (IBI) e a European Biochar Foundation (EBF).

As normas internacionais da International Biochar Initiative (IBI) e da European Biochar Foundation (EBF) classificam o biochar com base em seu teor de carbono e na relação H/C org , garantindo sua adequação para uso seguro e sequestro de carbono a longo prazo.

De acordo com a IBI, o biochar com fração de massa de C \geq 60% é Classe 1, 30–60% é Classe 2 e 10–30% é Classe 3. Materiais com $<10\%$ de carbono ou uma relação H/C org $> 0,7$ não são considerados biochar. Além disso, a EBF também exige uma fração de massa de carbono $>50\%$ e uma relação molar H/C org $< 0,7$.

O biochar derivado da pirólise atende aos padrões internacionais para aplicações ambientais seguras e de sequestro de carbono. A certificação do teor de carbono orgânico em materiais orgânicos é superior aos valores mínimos exigidos pela IBI. A estabilização do carbono pode ser observada no carbono fixo se este for superior ao encontrado na biomassa e seu teor de C atender aos padrões do Certificado Europeu de Biochar para sequestro de carbono a longo prazo.

A validação internacional da produção de biochar baseada em pirólise para esforços de sequestro de carbono é apoiada por agências climáticas globais, como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que reconheceu o biochar como uma tecnologia de remoção de dióxido de carbono (CDR). A quantificação da CDR para vários tipos de carvão pode ser calculada em g CO₂e / g de biochar.

Um maior teor de carbono e estabilidade térmica aumentam a vida útil do armazenamento de carbono, o que é importante para a eficácia das emissões líquidas negativas (NET).

O biochar obtido em altas temperaturas apresenta um aumento no Poder Calorífico Superior (PCS), tornando-o mais termicamente estável.

O biochar com maior teor de carbono fixo queima de forma mais eficiente e possui maior poder calorífico. Portanto, é importante focar na maximização do rendimento de carbono fixo. A influência das matérias-primas também afeta o teor total de carbono. O biochar de madeira e cana-de-açúcar tem alto teor de carbono, mas baixas concentrações de nutrientes, em contraste, a cama de aves e o lodo de esgoto têm alto teor de micronutrientes, como Zn, Cu e Fe. Os materiais lenhosos apresentaram a maior área superficial (126,2 m²/g) e teor de carbono (73,8%) em temperaturas de pirólise relativamente moderadas (em torno de 440 °C).

Observações sobre o poder calorífico também foram realizadas para demonstrar o papel do biochar como vetor energético. Isso visa aumentar o conteúdo energético das fontes de biomassa.

O biochar pode apresentar alta densidade energética, tornando-o adequado como alternativa aos combustíveis fósseis. O biochar tem potencial para ser um substituto sólido para o carvão rico em carbono, com estabilidade e valor energético aprimorados. Comparado ao carvão, o carbono e o poder calorífico do biochar podem aumentar por meio do processamento, enquanto sua matéria volátil pode diminuir.

Vários fatores podem ser aprimorados no biochar como produto energético, como densidade energética, hidrofobicidade e redução do teor de água, nitrogênio, enxofre e volume aparente. Em termos de PCS (Poder Calorífico Superior), seu valor é quase similar ao do carvão, em torno de 30,5–31,8 MJ kg⁻¹.

Na descarbonização do setor industrial, o biochar pode ser utilizado como um substituto sustentável para os combustíveis fósseis. O poder calorífico superior (PCS) do biochar a 500 °C atinge 27,33 MJ kg⁻¹, comparável ao da antracita.

Outro exemplo é a palha do milho, soja e trigo, que apresentam maior potencial para biochar, comparável ao do carvão, com PCS mais elevado (26,18–27,50 MJ kg⁻¹) e carbono fixo (53,78–59,92%). A qualidade elementar do biochar também é melhorada em resíduos de cana-de-açúcar. O alto teor de carbono e o baixo teor de nitrogênio no biochar, onde o teor de C chega a 80,93%, as razões atômicas H/C org e O/C são consistentes com estruturas aromáticas condensadas, e o baixo teor de N (<1%) o tornam adequado para uso energético, sequestro de carbono e melhoramento do solo.

Sua maior estabilidade, menor teor de matéria volátil e composição elementar favorável reforçam ainda mais seu papel na descarbonização do setor industrial.

A identificação da porosidade também é uma característica importante para o armazenamento e filtração de carbono. Tamanhos de poros inferiores a 2 nm são microporosos, semelhantes ao tamanho dos poros do carvão ativado. Métodos de produção com melhor porosidade e área superficial podem afetar a capacidade de adsorção do carbono.

A pirólise por micro-ondas é considerada um método promissor para produzir biochar poroso com maior área superficial específica. É valioso para a fertilidade do solo e a ciclagem de nutrientes se o biochar for enriquecido com grupos funcionais de superfície e minerais como nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio e potássio.

O nitrogênio e os grupos funcionais no biochar pirolítico podem ser ativados e modificados para uso como adsorventes.

Neutralidade de Carbono. A utilização de resíduos como fonte de energia sustentável pode reduzir as emissões de CO₂. Os resíduos podem produzir produtos de carbono estáveis e atuar como vetores energéticos que podem contribuir para a neutralidade de carbono. O processo de pirólise de resíduos pode produzir energia, aumentar o rendimento de metano, reduzir a toxicidade e apoiar a mitigação de carbono. Isso é evidenciado pelo condensado aquoso de pirólise, um coproduto formado durante a pirólise. Seu uso como matéria-prima para a produção de biogás é facilitado pela presença de biochar.

O biochar estabiliza o carbono a longo prazo, contribuindo para a neutralidade de carbono. A resistência do biochar à degradação microbiana aumenta com o aumento da temperatura de pirólise devido ao aumento da concentração de carbono aromático. O papel duplo do biochar no sequestro de carbono e na redução de gases de efeito estufa é evidente nas emissões de CO₂, CH₄ e N₂O no solo e no composto, que afetam a abundância de bactérias funcionais.

Outros esforços também estão sendo feitos para reduzir as emissões que contaminam o solo, como os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs). Como medida de remediação para solos contaminados organicamente, o biochar suportado por ferro zero-valente em nanoescala (nZVI/BC) ativou com sucesso o persulfato, aumentando significativamente a taxa de degradação do contaminante em até 322%.

Esses resultados destacam coletivamente o papel duplo do biochar na imobilização de HAPs. É necessário cautela, pois os níveis de HAPs, um tipo de poluente orgânico tóxico, no biochar são influenciados pela temperatura de pirólise e pelo tipo de matéria-prima.

Matérias-primas com alto teor de celulose e pectina produzem mais HAPs do que matérias-primas com lignina. Esforços de tratamento do solo, como a lixiviação de HAPs em solos tratados, apresentam valores 99,9% menores do que em solos não tratados (amontoados) após 100 anos.

Metais pesados como Cu, Hg, Ni e Zn também são melhor retidos no solo, embora alguns elementos como Mo e Ba sejam mais lixiviados dependendo das condições.

Esforços para aumentar o carbono orgânico do solo. O armazenamento de carbono a longo prazo ocorre devido à estrutura aromática estável do biochar, que produz o maior sequestro de carbono de 2,94 toneladas C/ha e 10,76 toneladas CO₂-eq/ha de mitigação de gases de efeito estufa.

Os benefícios da sustentabilidade do biochar e o mecanismo eficiente de utilização da biomassa por meio de processamento que produz produtos confiáveis podem reduzir as emissões de gases de efeito estufa e outros impactos ambientais. Existe biochar multifuncional para sustentabilidade, como remediação do solo, gestão de resíduos, redução de gases de efeito estufa e produção de energia.

O potencial do biochar para minimizar os impactos negativos no meio ambiente e oferecer benefícios adicionais, como aumento da fertilidade do solo, redução das emissões de N_2O e aumento da retenção de água. Por exemplo, o biochar proveniente de resíduos de polpa de café apresenta propriedades hidrofóbicas, tornando-o mais adequado para armazenamento ambiental de longo prazo e aplicações, incluindo sequestro de carbono.

Já o biochar de madeira de pinho promove a valorização de resíduos, resultando em menor propagação de chamas, fumaça e emissões tóxicas.

As emissões de CO e CO_2 durante a combustão são reduzidas, tornando o composto mais seguro e ecologicamente correto. Ao contrário dos retardantes de chama tradicionais (por exemplo, polifosfato de amônio), o biochar não libera substâncias tóxicas durante a combustão. Aumenta a estabilidade térmica e reduz as emissões de fumaça.

Existe ainda um sistema de utilização de biomassa com uso eficiente de recursos que produz produtos de alto valor agregado a partir de tecnologias de pirólise e retificação rápida com menores impactos ambientais.

As emissões de gases de efeito estufa do sistema RBU foram reduzidas em 29%, e fatores de impacto como depleção abiótica, acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozônio e toxicidade humana foram reduzidos em 64,3%, 69,6%, 26,8%, 10,8% e 63,3%, respectivamente, em comparação com o sistema típico de utilização de biomassa.

O aumento de carbono no biochar indica boa capacidade de captura de carbono, apoiando a neutralidade de carbono. Por exemplo, o SCG apresentou um aumento no teor de carbono de 45,91% em peso para 54,55% em peso, e o PCS (Poder Calorífico Superior) pôde ser aumentado em aproximadamente 23,41%. Um processo de aquecimento controlado aplicado à biomassa pode convertê-la em um combustível sólido (biochar) com maior densidade energética e características de combustão superiores.

O biochar produzido por carbonização e ativação química (usando KOH) da biomassa desenvolve uma estrutura ultramicroporosa com tamanho de poro de aproximadamente 0,65 nm e microporosidade muito alta (até 91,7%).

Essa estrutura proporciona uma grande área superficial específica (até 1027 m² / g), ideal para adsorver moléculas de CO₂ à temperatura ambiente e pressão atmosférica.

Países como a Noruega, a Grécia e os Países Baixos descobriram que a energia da biomassa tem um efeito negativo estatisticamente significativo a longo prazo nas emissões de CO₂. Estes resultados foram obtidos a partir de uma análise da relação estatística entre as emissões de CO₂, o consumo de energia da biomassa, o progresso tecnológico e o PIB.

As emissões de CO₂ aumentam inicialmente juntamente com o PIB, mas diminuem após atingirem um determinado limiar económico. O consumo de energia da biomassa está negativamente correlacionado com as emissões de CO₂, mas o impacto não é estatisticamente significativo devido à sua pequena participação no consumo total de energia.

Produção de biochar como tecnologia de emissão negativa. A absorção de biochar está ganhando cada vez mais atenção como uma tecnologia de emissões negativas para mitigar as mudanças climáticas. Os sistemas de biochar podem ser tanto carbono-negativos quanto energéticos. Os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) mostram que a pirólise lenta da biomassa lignocelulósica resulta em produção positiva de energia e emissões negativas de potencial de aquecimento global.



A pirólise rápida de resíduos domésticos lignocelulósicos fornece um caminho sustentável para a recuperação de energia e materiais. O biochar nesse processo contribui para a estabilidade do solo a longo prazo.

O biochar tem um efeito positivo no meio ambiente, ajudando a reduzir a produção de gases de efeito estufa. Aproximadamente 3 Gt/ano de conversão de biomassa em biochar podem reduzir aproximadamente 2,75 Gt de CO₂ por ano até 2050. Os detalhes básicos vêm do cálculo em que 3/11 (27,3%) da massa de uma molécula de CO₂ consiste em carbono, com o restante sendo a massa dos átomos de oxigênio. 1 gigatonelada de carbono (GtC) é, portanto, equivalente a 3,7 GtCO₂ na atmosfera. Isso também proporciona um impacto energético excedente 15,6 gigajoules (GJ) para a redução de 1 ton. de CO₂.

Isso é corroborado pela disponibilidade de biomassa, que representa aproximadamente 10% do fornecimento global de energia, equivalente a 50 exajoules (EJ) de energia. A geração potencial de energia a partir da biomassa é estimada em 140–270 EJ.

A chave para emissões negativas reside também na resistência do biochar à degradação e em indicadores de estabilidade, como menores razões H/C org e O/C. As razões molares H/C org e O/C diminuem com o aumento da temperatura de pirólise, indicando maior carbonização e aromaticidade. O teor de carbono resultante pode exceder 70–84% em peso.

O biochar resultante pode ser utilizado em aplicações como melhoramento do solo, sequestro de carbono, absorção de poluentes, células de combustível microbianas e suporte de catalisadores. Por exemplo, o teor de carbono do biochar derivado de bagaço de azeitona é de 85%, com uma razão O/C de 0,15. O biochar com uma razão O/C < 0,4 é mais adequado para melhoramento do solo e sequestro de carbono.

Pirólise. O processo termoquímico de pirólise produz bioenergia na forma de biochar, gás de síntese e bio-óleo, tornando-se uma técnica de produção de energia sustentável e ambientalmente amigável, sem oxigênio. Por exemplo, o poder calorífico do biochar atinge $27,31 \text{ MJ kg}^{-1}$ a $400 \text{ }^\circ\text{C}$, o que o torna um bom biocombustível sólido.

A via de carbono e a formação de biochar por meio da pirólise, onde a matéria orgânica é aquecida até se decompor em condições anaeróbicas ou anóxicas, são categorizadas em três fases: secagem, pirólise e carbonização.

Na fase de secagem, a água da matéria-prima evapora; na fase de pirólise, a matéria orgânica começa a se decompor, produzindo gases voláteis, produtos líquidos e resíduos sólidos (carvão); na fase de carbonização, os sólidos restantes são carbonizados para formar o biochar. A pirólise também produz biogás como um subproduto de alto valor a partir de catalisador de dolomita com 2,27% em peso de bio-óleo com o maior teor de hidrocarbonetos (86,35%).

A energia alternativa produzida pela pirólise também está na forma de gás e bio-óleo que é usado como substituto de combustíveis fósseis, substituindo o carvão para produzir eletricidade equivalente a 678 kWh/ton de resíduo e também compensa aproximadamente 725 kg CO_2 e/ton de resíduo vegetal.

As propriedades do biochar são influenciadas pelo tipo de biomassa e pelas condições de pirólise. Temperaturas de tratamento mais elevadas levam à aromatização, à formação de microporos e ao aumento da estabilidade para o sequestro de carbono a longo prazo.

O biochar é um produto absorvedor de CO_2 eficaz devido à sua estrutura microporosa e composição, incluindo carbono e minerais. As principais etapas da pirólise começam com a evaporação da água na Zona 1 (25–125 °C), seguida pela degradação dos componentes hemicelulose, celulose e lignina em diferentes faixas de temperatura no processo de pirólise, nomeadamente hemicelulose a 210–370 °C (baixa estabilidade térmica), celulose a 260–410 °C (principal fase de desvolatilização) e lignina a 350–650 °C (termicamente estável, decompõe-se lentamente numa ampla faixa de temperatura).

Essas etapas de decomposição térmica produzem biochar (resíduo sólido rico em carbono), bio-óleo (voláteis condensáveis) e gases não condensáveis (por exemplo, CO , CO_2 , CH_4 , H_2). O mecanismo envolve a despolimerização de polissacarídeos de cadeia longa, descarboxilação e desidratação, levando à perda de grupos funcionais (OH , COOH) e à formação de uma estrutura de carbono aromático termicamente estável (biochar).

O craqueamento térmico de polímeros (em plásticos) e lignina na biomassa ajuda a formar uma densa rede de carbono aromático, aumentando a estabilidade do biochar e seu potencial para sequestro de carbono.

À medida que a temperatura de pirólise aumenta, a estrutura de carbono sofre aromatização e contração, resultando na formação de microporos e domínios grafiticos. Essas características tornam o biochar derivado da madeira especialmente valioso para a melhoria do solo, recuperação de nutrientes e purificação da água, enquanto a transferência de calor controlada oferece um caminho para otimizar a produção sustentável.

O biochar de madeira é um corretivo de solo muito adequado para aumentar sua capacidade de retenção (mesmo em uma perspectiva de longo prazo). O biochar de madeira é um agente promissor para a recuperação de P e N. É um biofiltro apropriado para a purificação de água (residual), processo durante o qual várias modificações, como a ativação da superfície, são frequentemente necessárias. Para a mesma matéria-prima, com o aumento da Temperatura Máxima de Tratamento (TMT) durante a pirólise, ocorre maior destruição da matéria orgânica. Para refinar e controlar a taxa de transferência de calor, que pode então ser usada para otimizar o processo para a produção sustentável de biochar.

A tecnologia de pirólise apresenta alta velocidade de reação, produtos diversos e alta eficiência de conversão de energia, sendo que o projeto do reator e as condições operacionais influenciam fortemente a distribuição e a qualidade do produto.

Por exemplo, reatores rotativos promovem aquecimento uniforme, melhoram a transferência de calor e massa e minimizam o superaquecimento local.

A pirólise de fluxo contínuo, utilizando fornos de pirólise do tipo parafuso, caracteriza-se pela facilidade de operação e manutenção, como uma solução inteligente para operações de aproveitamento de resíduos.

Para a pirólise lenta, o objetivo principal é maximizar o rendimento e o potencial de absorção do biochar. Os fatores que afetam a composição e o rendimento dos produtos da pirólise incluem as características da matéria-prima, a temperatura de pirólise, a taxa de aquecimento e o tempo de residência.

A pirólise lenta é um processo otimizado que produz mais biochar do que outros métodos, sendo que cerca de 35% do biochar é obtido a partir da pirólise lenta da biomassa.

A pirólise lenta destaca-se como uma tecnologia de energia renovável (NET) altamente eficaz devido à sua capacidade estável de absorção de carbono, formando biochar a partir do carbono sólido acumulado como uma medida de mitigação das mudanças climáticas.

A temperatura ideal estabiliza o conteúdo energético, permitindo que o biochar funcione tanto como um sumidouro de carbono quanto como um combustível sólido comparável ao carvão de baixo grau.

A pirólise aumenta o potencial de absorção a longo prazo do biochar, otimizando a temperatura. Temperaturas médias (300–500 °C) otimizam a estabilidade e a área superficial para a adsorção de carbono, e temperaturas mais altas (>500 °C) aumentam o teor de carbono e reduzem os voláteis . O rendimento do biochar aumenta devido à possibilidade de reações secundárias e pode diminuir devido à maior volatilização da biomassa. A perda de frações alifáticas leva a rendimentos mais altos em baixas temperaturas.

Na pirólise rápida de biomassa, há pesquisas sobre a intensificação do processo utilizando operação autotérmica em um reator de leito fluidizado. A operação autotérmica utiliza a oxidação parcial dos produtos da pirólise (principalmente carvão e voláteis leves) para fornecer calor interno, eliminando a necessidade de fluidos externos de transferência de calor, como areia ou gases inertes.

Isso reduz os custos de energia e a complexidade do sistema. A pirólise autotérmica aumenta a porosidade do biocarvão e proporciona melhor controle sobre a distribuição dos produtos.

Além disso, devido à redução do volume líquido, o processo aumenta a produção de gás, que pode ser utilizado como via de produção de hidrogênio, proporcionando uma conversão mais eficiente com maior concentração de O_2 .

Reatores verticais de pirólise rápida de alta temperatura, como os reatores de tubo de queda, possuem um mecanismo no qual a biomassa é alimentada no topo e cai rapidamente através de uma zona aquecida sob a influência da gravidade.

A simulação foi realizada utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) com um modelo multifásico de Euler-Lagrange para simular o reator e avaliar a qualidade do carvão com tamanho de partícula de 500 μm . A melhor qualidade de biochar com teor de carbono encontrada foi o biochar de palha de trigo e milho, com 70,4% de C (experimento) e 73,3% (simulação), enquanto o biochar de palha da cevada e da soja apresentou 65,6% de C (experimento) e 64,2% para a palha do feijão.

No geral, essas inovações reforçam a viabilidade da pirólise rápida como uma via dupla para energia limpa e sequestro de carbono, mas é necessária uma otimização adicional para equilibrar a distribuição do produto e garantir a viabilidade econômica.

A pirólise eficiente e de baixa emissão por micro-ondas de biomassa residual pode produzir biochar de alto valor. Ao atingir a estabilidade do carbono, o teor de carbono do biochar aumentou após a pirólise por micro-ondas a 550 °C, passando de 19,6% para 70,7%, enquanto o teor de voláteis diminuiu.

A pirólise por micro-ondas, como uma via termoquímica moderna com processo de aquecimento, promove reações químicas mais eficientes, rápidas e produtivas. A estrutura porosa do biochar também é aprimorada, tornando-o um material ideal com emissão negativa de carbono para aplicações de longo prazo no solo e mitigação das mudanças climáticas.

A pirólise assistida por micro-ondas (MAP) também pode produzir biochar como alternativa ao carvão. Sua tecnologia superior apresenta menor tempo de processamento, maior taxa de aquecimento e menor consumo de energia do que as fontes de aquecimento tradicionais.

A formação de biochar ocorre principalmente em pirólise lenta e MAP em temperaturas mais baixas com longo tempo de residência. O rendimento diminui com o aumento da temperatura; por exemplo, a casca de arroz produz 43,3% de biochar a 300 °C. A pirólise por micro-ondas pode ser útil como removedor de emissões (por exemplo, enxofre) durante sua produção, atuando como um produto com emissão negativa de carbono.

Seu teor é relativamente reduzido em cinco espécies de enxofre, além da conversão de parte do enxofre orgânico em sulfato inorgânico, que é retido no biochar.

A pirólise por micro-ondas reduz a formação de produtos perigosos e minimiza as emissões de poluentes, tornando essa técnica ecologicamente correta. Isso posiciona uma rota sustentável de produção de biochar, mas também como uma estratégia prática para sequestro de carbono e remediação ambiental.

A pirólise melhora a estabilidade do carbono e a retenção de nutrientes, reforçando seu papel nos sistemas agrícolas. Na copirólise, podem ser produzidos maiores rendimentos de biochar, o que aumenta a recuperação de P e K. A eficiência termoquímica da copirólise é mais econômica quando combinada com matérias-primas ricas em nutrientes e carbono.

As técnicas de copirólise também liberam menos CO₂ do que os combustíveis fósseis. A eficácia do biochar obtido por copirólise pode ser demonstrada pela avaliação de três tipos de resíduos: cama de aves (CA), talos de banana (TB) e fosfogesso (PG), que produzem biochars ricos em potássio (K), fósforo (P) e enxofre (S). Os maiores teores encontrados no biochar foram de K (5,1%), S (11,35%) e P (4,48%).

A integração de resíduos plásticos em sistemas de copirólise também pode ser realizada em consonância com estratégias de emissão negativa na produção de biochar. A temperatura e a carga do catalisador são as duas características mais importantes que afetam significativamente o rendimento de biochar e gás de síntese da copirólise de biomassa.

Portanto, a copirólise é uma via versátil de emissão negativa que acopla a valorização de resíduos com a fertilidade do solo e a recuperação de energia.

O poder calorífico inferior (PCI) dos componentes atingiu $29,93 \text{ MJ kg}^{-1}$, um bom resultado para as matérias-primas de pirólise, comparado ao carvão, cujo poder calorífico é de $29,31 \text{ MJ kg}^{-1}$. A pirólise também foi integrada a outras tecnologias, como a digestão anaeróbia (DA) para a valorização da biomassa lignocelulósica. A pirólise do digestato sólido resultante produziu biochar com rendimentos variando de 28,81 a 35,96%, enquanto o bio-óleo e o gás de pirólise diminuíram gradualmente. A maior eficiência energética foi de 71,9%, com um rendimento energético líquido de $2,0 \text{ MJ kg}^{-1}$.

A produção de biochar nitrogenado a partir do digestato de DA, utilizando ureia proveniente da pirólise a $600 \text{ }^\circ\text{C}$ com uma proporção digestato:ureia de 1:1, resultou em biochar rico em carbono e um biochar enriquecido em nitrogênio com alta capacidade de adsorção de CO_2 de $1,22 \text{ mmol/g}$.

Seu alto teor de nitrogênio aumentou significativamente a adsorção química de CO_2 , destacando sua dupla função como um material eficaz de armazenamento e adsorção de carbono para aplicações de emissão negativa. A pirólise apresenta muitas aplicações potenciais, por exemplo, como cogeração de calor e eletricidade, apoiando sistemas de recuperação de energia além da geração de eletricidade a partir de biomassa, aumentando assim a eficiência da produção de biochar.

Além disso, o processamento de resíduos orgânicos de alimentos representa uma estratégia sustentável com emissão negativa de carbono. Comparada ao aterro sanitário e à incineração, a pirólise é geralmente considerada um método mais eficiente em termos energéticos, ambientalmente amigável e econômico.

Foi proposto também que o uso da pirólise para processar sistemas de biomassa com recuperação de energia (RBU) é uma forma sintética de economizar energia significativa.

Comparados aos sistemas convencionais, os sistemas RBU produzem diversos produtos de alto valor agregado com base na pirólise. Ao contrário da incineração, a pirólise apresenta baixo consumo de carbono e baixas emissões de CO₂.

Para atingir a neutralidade de carbono, indica-se que a produção de 100 a 300 Gt equivalentes de biochar por meio da pirólise é necessária para evitar o aquecimento global abaixo de 1,5 °C. O biochar da pirólise tem vários benefícios em comparação com a biomassa bruta, maior hidrofobicidade e friabilidade, o que aumenta o processamento e armazenamento.

Gaseificação. A gaseificação converte biomassa em uma mistura gasosa por meio de oxidação parcial em altas temperaturas. A gaseificação pode mitigar as mudanças climáticas em aterros sanitários e converter resíduos carbonáceos em H₂, potencialmente substituindo combustíveis fósseis.

A gaseificação controlada pode transformar o biochar em um produto sólido com emissão negativa de carbono. A gaseificação pode produzir biochar poroso, o que é acompanhado por aumentos significativos na eficiência de gaseificação de carbono (EGC) e na eficiência de gaseificação de hidrogênio (EGH). Um desses métodos é a gaseificação em água supercrítica (GAAS), que converte resíduos úmidos sem a necessidade de secagem.

Um sistema projetado combina processos de pirólise, gaseificação e combustão em um único dispositivo para otimizar a produção de hidrogênio e biochar.

Este sistema também utiliza biochar no craqueamento de alcatrão, onde um catalisador de biochar na saída do gaseificador reduz o teor de alcatrão de 3,24 para 1,02 g/Nm³ (uma redução de 68,6%). Este sistema consiste em uma Zona de Pirólise Ciclônica no topo, com fluxo de ar formando um vórtice.

No meio, há um sistema de pirólise rápida que produz gases voláteis a partir do biochar sólido devido à força centrífuga e à gaseificação, que reage o biochar com CO₂ e /ou H₂O para produzir H₂ com um teor máximo de 3,91%.

O biochar produzido pela gaseificação tem potencial para ser reciclado como combustível, pois contém carbono e alto poder calorífico. O biochar pode ser usado como matéria-prima para gaseificação, convertendo o carbono remanescente do processo de gaseificação anterior em combustível gasoso adicional. Os produtos de biochar do sistema de gaseificação podem gerar eletricidade e substituir a eletricidade da rede.

Este processo também apresenta valores negativos para o potencial de danos aos ecossistemas e à saúde humana, com valores que variam de -1×10^{-7} a -2×10^{-8} espécies x ano e de -1×10^{-5} a -5×10^{-6} DALY por kg de biorresíduo processado. O potencial de danos tem uma pontuação negativa, indicando benefícios ambientais.

A metodologia de avaliação do impacto do ciclo de vida utilizada para medir essa pontuação é a ReCiPe. Esses avanços sinalizam um caminho promissor para a energia sustentável e a gestão de resíduos, transformando biorresíduos em combustíveis limpos e, ao mesmo tempo, gerando pontuações de impacto ambiental líquido positivas.

Existe também uma combinação de outras tecnologias, como a energia solar e a gaseificação de cachos de frutos vazios de palma de óleo (OPEFB), que captura com sucesso o carbono e utiliza o CO₂ como agente de gaseificação para produzir gás de síntese. Este processo atinge uma taxa de consumo líquido de carbono de 0,7 g/min e uma eficiência de conversão de carbono de 94,9%. O gás de síntese (incluindo H₂) tem um fator de aprimoramento energético de 1,4. A presença de hidrogênio melhora a qualidade energética do gás de síntese, especialmente em aplicações que requerem combustão limpa ou vias de síntese.

Carbonização Hidrotérmica. Esta técnica é um processo termoquímico que utiliza água como meio de reação a alta temperatura e pressão, sem a necessidade de extensa pré-secagem. A reação ocorre em um reator fechado com pressão de batelada (por exemplo, capacidade de 2 L, até 300 °C e 15 MPa).

O reator é ventilado com nitrogênio para manter o sistema livre de oxigênio. O aquecimento e a reação ocorrem quando o reator é aquecido a 180–250 °C e mantido nessa temperatura por 30 min.

A água atua como solvente e catalisador, acelerando as reações de hidrólise, desidratação, condensação e polimerização para formar hidrocarvão.

O hidrocarvão (um produto sólido da HTC) oferece benefícios ambientais significativos, incluindo uma redução de até 81,5% no GWP e uma redução de 96% na toxicidade humana. O hidrocarvão pode substituir os combustíveis fósseis como objetivo principal em estratégias de emissões negativas e sequestra carbono estável em forma sólida, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida.

É rico em carbono e combustível, com propriedades semelhantes ao carvão sub-bituminoso. O hidrocarvão é caracterizado por um teor de carbono relativamente alto (aproximadamente 48% em base seca e livre de cinzas) e um baixo teor de cinzas (4,8% em base seca). Seu uso como combustível também é favorecido pelo seu teor de cinzas relativamente baixo em comparação com outros resíduos biológicos. Essa tecnologia pode ser combinada com a gaseificação, que converte biomassa com 90% de água em combustíveis sólidos de alta qualidade (hidrocarbonetos).

Seu baixo teor de cinzas e a compatibilidade com processos de gaseificação reforçam ainda mais sua utilidade para energia limpa e benefícios ambientais.

Integração com Sistemas de Energia de Biomassa. A integração de sistemas de energia de biomassa que incorporam a produção de biochar exige uma análise cuidadosa dos parâmetros operacionais que regem tanto o rendimento energético quanto a qualidade do biochar.

Fatores chave — incluindo o tipo de matéria-prima, a temperatura do processo, a taxa de aquecimento, as condições de limitação de oxigênio e o tempo de residência — influenciam fortemente o desempenho do sistema e as características do produto. Em configurações baseadas em pirólise, por exemplo, frações gasosas e líquidas, como gás de síntese e bio-óleo, podem ser aproveitadas como vetores energéticos, enquanto o biochar é simultaneamente recuperado como um coproduto sólido com aplicações valiosas no solo e no sequestro de carbono.

Tais sistemas integrados aumentam a eficiência geral da utilização da biomassa, combinando a geração de energia renovável com benefícios ambientais significativos.

A qualidade do biochar é normalmente avaliada por meio de parâmetros como teor de carbono fixo, área superficial, porosidade e comportamento de mineralização — todos diretamente afetados pelas variáveis do processo. Pesquisas atuais demonstram consistentemente que o biochar funciona não apenas como um corretivo de solo eficaz, melhorando a fertilidade e a estrutura, mas também como um sumidouro de carbono durável que reforça a sustentabilidade ambiental e energética dos sistemas de conversão de biomassa.

A integração da produção de energia com a recuperação de biochar proporciona, portanto, um caminho viável para a valorização sustentável de resíduos, permitindo a geração de energia renovável e mitigando as alterações climáticas através da estabilização a longo prazo do carbono nos solos.

Estas abordagens interdisciplinares apoiam o avanço dos modelos de bioeconomia circular e contribuem para objetivos mais amplos de desenvolvimento sustentável.

Fatores que afetam a qualidade do biochar. As propriedades físicas e químicas do biochar — como densidade aparente, teor de carbono fixo, estabilidade, área superficial específica, grupos funcionais de superfície e pH — são fortemente influenciadas pela natureza da matéria-prima e pelas condições do processo de conversão termoquímica.

Dentre esses fatores, a temperatura de pirólise exerce a maior influência: o aumento da temperatura melhora o teor de carbono fixo e a estabilidade estrutural, aumentando assim a persistência a longo prazo do biochar como um reservatório de carbono. No entanto, temperaturas elevadas geralmente reduzem o rendimento geral do biochar.

A taxa de aquecimento e o tempo de residência também desempenham papéis cruciais na determinação do desenvolvimento dos poros e da composição química, que, por sua vez, afetam a capacidade de retenção de água, a adsorção de nutrientes e as interações com a microbiota do solo.

Além disso, a configuração do reator, a presença de vapores voláteis e os processos de pós-tratamento podem modificar ainda mais essas características físico-químicas, adequando o biochar para aplicações específicas.

As seguintes são técnicas analíticas comuns para caracterizar o biochar:

(i) adsorção de nitrogênio BET para área superficial específica e porosidade;

(ii) MEV/EDS para análise morfológica;

(iii) FTIR e XRD para grupos funcionais e fases minerais; e

Aplicação agrícola do biochar: benefícios e mecanismos

Melhoria das propriedades do solo. A incorporação de biochar no solo pode melhorar significativamente propriedades físico-químicas e biológicas essenciais para a saúde do solo. Devido à sua alta porosidade, o biochar melhora a retenção de água no solo — uma função especialmente valiosa em solos arenosos ou degradados, propensos à rápida perda de umidade.

Além disso, o biochar aumenta a capacidade de troca catiônica do solo, promovendo a retenção e a liberação gradual de nutrientes, reduzindo a lixiviação de nutrientes e melhorando a eficiência do uso de fertilizantes. Outro efeito importante é a melhoria da acidez do solo, uma vez que o biochar pode neutralizar íons de hidrogênio e elevar os níveis de pH em solos ácidos, criando assim condições mais favoráveis para a atividade microbiana e a absorção de nutrientes pelas plantas.

A contribuição da matéria orgânica proveniente do biochar melhora o teor de carbono do solo, o que, por sua vez, tem um efeito positivo na estrutura do solo, na capacidade de troca catiônica e na capacidade de tamponamento do solo. O biochar também proporciona um habitat estável para microrganismos benéficos devido à sua estrutura porosa e grande área de superfície específica, o que facilita a colonização e proliferação de bactérias e fungos essenciais para os processos biogeoquímicos do solo.

O aumento da atividade microbiana contribui para a formação de matéria orgânica estável e para melhorias gerais na qualidade do solo. Além disso, ao manter níveis ótimos de umidade, disponibilidade de nutrientes e estabilidade estrutural, o biochar pode fortalecer a resiliência das plantas ao estresse ambiental, resultando em culturas mais saudáveis e produtivas.

A adição de biochar ao solo também aumenta a atividade microbiana. Observou-se que a aplicação de biochar ao solo aumenta a atividade de enzimas como a urease. Além dos seus benefícios agrônômicos, a capacidade do biochar de armazenar carbono estável no solo reforça o seu papel como uma ferramenta eficaz para mitigar as alterações climáticas através do sequestro de carbono atmosférico a longo prazo. Meta-análises relatam melhorias médias na produtividade das culturas de 10–20%, com respostas maiores (30–40%) observadas em solos tropicais ácidos e pobres em nutrientes. No entanto, a validação específica do local continua a ser crucial, uma vez que estes valores diferem significativamente com base no tipo de solo, na taxa de tratamento e na co-aplicação com fertilizantes.

Sequestro de carbono e mitigação das mudanças climáticas. O biochar representa uma estratégia promissora para o sequestro de carbono e a mitigação das mudanças climáticas devido à sua capacidade de estabilizar o carbono no solo por longos períodos — variando de várias décadas a milênios — dependendo das condições de produção e do ambiente do solo.

Essa estabilidade a longo prazo permite que o biochar funcione como um sumidouro de carbono eficaz, impedindo o retorno do carbono armazenado para a atmosfera como dióxido de carbono e, assim, contribuindo para reduções líquidas nas concentrações de gases de efeito estufa.

Devido a essa propriedade, o biochar tem sido cada vez mais reconhecido como uma tecnologia de emissões negativas, particularmente quando integrado a sistemas de energia baseados em biomassa dentro da estrutura de bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS).

Nesses sistemas, a biomassa serve tanto como fonte de energia quanto como precursor para a produção de biochar, com o material resultante aplicado ao solo para garantir o sequestro estável de carbono. Além do armazenamento direto de carbono, o biochar pode influenciar benéficamente a dinâmica do carbono nativo do solo, induzindo um efeito de priming negativo que suprime a mineralização e a emissão do carbono orgânico existente no solo, aumentando ainda mais seu potencial de mitigação. Sua adição também estimula a biomassa e a atividade microbiana, promovendo a formação de complexos organominerais estáveis e matéria orgânica persistente.

Em relação à redução das emissões de gases de efeito estufa, o biochar tem o potencial de reduzir as emissões de N_2O e CH_4 provenientes de práticas agrícolas. Estima-se, por exemplo, que a aplicação de biochar ao solo pode reduzir as emissões de N_2O em até 38%. Alguns estudos mostram aumentos nas emissões de CO_2 ou CH_4 após a aplicação de biochar, enquanto muitos afirmam reduções nas emissões de N_2O e CH_4 .

Esses aumentos são frequentemente associados a (i) maior aeração do solo, acelerando a mineralização do carbono nativo, (ii) frações de carbono lábil no biochar fresco, promovendo a respiração microbiana, e (iii) condições redox alteradas, impulsionando a metanogênese em solos com drenagem deficiente. Esses mecanismos enfatizam a importância crucial de avaliar as interações entre o biochar e o solo sob circunstâncias hidrológicas e bioquímicas específicas do local.

Além disso, o biochar pode ser usado como insumo agrícola para promover a agricultura de baixo carbono. Essas práticas incluem:

(i) o uso de biochar como matriz transportadora de nutrientes por meio da formulação de fertilizantes de liberação lenta à base de biochar e (ii) o uso de biochar como aditivo na compostagem.

Em ambos os casos, a formulação de bioinsumos à base de biochar provou ser uma alternativa promissora para incorporar o biochar às práticas agrícolas, potencialmente ajudando a reduzir a dependência de insumos agrícolas sintetizados quimicamente, como fertilizantes nitrogenados, que têm sido associados a impactos negativos, como maiores emissões de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida.

Juntos, esses processos posicionam o biochar como uma ferramenta robusta e sustentável que melhora a qualidade do solo e a produtividade agrícola e serve como um componente chave na transição para agroecossistemas de baixa emissão e resilientes ao clima com captura ativa de carbono atmosférico.

Sinergias entre energia, resíduos agrícolas e fertilidade do solo. A utilização de resíduos agrícolas para geração de energia e produção de biochar tornou-se um componente estratégico da economia circular moderna e das estruturas de transição energética.

Nessa abordagem, a biomassa residual — frequentemente subutilizada ou descartada por meio de práticas que contribuem para as emissões de gases de efeito estufa e a degradação ambiental — é convertida, por meio de processos termoquímicos, em vetores de energia renovável e um coproduto rico em carbono com alto valor agrônômico.

Essa transformação permite o fechamento dos ciclos de materiais e energia, seguindo o caminho: resíduos → energia + biochar → enriquecimento do solo → aumento da produtividade → redução da dependência de insumos químicos.

A integração desses processos não apenas alivia a pressão sobre aterros sanitários e sistemas de disposição final, mas também fornece um substituto renovável para combustíveis fósseis, promovendo a autossuficiência energética em sistemas agrícolas e rurais. Ao mesmo tempo, a incorporação de biochar no solo aumenta a retenção de nutrientes e água, melhora a estrutura do solo e fortalece a resiliência ao estresse climático.

Como resultado, os sistemas agrícolas podem diminuir sua dependência de fertilizantes sintéticos e substratos externos, reduzindo os custos de produção e conservando os recursos naturais.

Em suma, o uso combinado de bioenergia e biochar derivado de resíduos agrícolas representa uma estratégia holística e sinérgica que interliga a gestão sustentável de resíduos, a produção de energia renovável e a recuperação do solo. Esse modelo integrado proporciona benefícios ambientais, econômicos e sociais significativos, reforça os objetivos globais de sustentabilidade e abre novas oportunidades para inovação e criação de valor em toda a cadeia de valor.

Oportunidades para Sistemas de Agricultura de Biomassa

Valorização de Resíduos e Economia Circular. A produção de biochar oferece um caminho eficaz para a valorização de resíduos agrícolas, florestais e urbanos, transformando materiais frequentemente subutilizados ou gerenciados de forma inadequada — como aqueles sujeitos à queima a céu aberto ou descarte descontrolado — em um produto de valor agregado com diversas aplicações.

Esse processo está diretamente alinhado aos princípios da economia circular, reintegrando o carbono e os nutrientes contidos nos resíduos orgânicos de volta aos ciclos produtivos, reduzindo assim o volume de resíduos e mitigando as emissões associadas à sua degradação natural ou combustão.

Do ponto de vista ambiental, a conversão de biomassa residual em biochar reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos, prevenindo a liberação de dióxido de carbono, metano e partículas finas que, de outra forma, resultariam da decomposição ou queima a céu aberto.

Além disso, a estabilização do carbono na matriz do biochar facilita seu sequestro a longo prazo no solo, proporcionando benefícios adicionais de mitigação das mudanças climáticas. Do ponto de vista econômico, a produção de biochar a partir de fluxos de resíduos cria novas oportunidades de mercado, incluindo sua comercialização como corretivo de solo, seu uso no desenvolvimento de produtos de alto valor agregado, como adsorventes, substratos ou materiais compósitos, e sua potencial inclusão em esquemas de crédito de carbono e compensação de emissões. A valorização de resíduos por meio da produção de biochar não apenas mitiga os impactos ambientais, mas também apoia o desenvolvimento de modelos de negócios sustentáveis e resilientes que integram a gestão de resíduos com a produtividade agrícola e a geração de energia renovável — contribuindo para uma economia circular de baixo carbono.

A promessa dos sistemas de biochar é reforçada por experiências intersetoriais na implementação da economia circular.

Pesquisas recentes na indústria de mineração, por exemplo, mostram modelos eficazes de ciclo fechado para reutilização de resíduos e valorização de rejeitos. Esses exemplos demonstram como resíduos industriais podem ser reaproveitados como matérias-primas secundárias, reduzindo os riscos ambientais e gerando novas receitas. A afirmação de que sistemas circulares baseados em biochar podem ser estendidos para além da agricultura e auxiliar esforços mais amplos de ecologia industrial é fortalecida pela inclusão dessas similaridades.

Integração com Programas de Carbono e Financiamento Climático. A capacidade excepcional do biochar de armazenar carbono em formas estáveis e de longa duração cria oportunidades concretas para sua integração em estruturas de mitigação climática e financiamento verde. Ao fixar o carbono em estruturas recalcitrantes que persistem por séculos, o biochar proporciona benefícios climáticos mensuráveis e verificáveis que se enquadram nos critérios de mercados voluntários de carbono, esquemas de pagamento por serviços ecossistêmicos e programas nacionais de redução de emissões. Reconhecer o valor do carbono retido nos solos por meio do uso de biochar aumenta a rentabilidade dos sistemas biomassa-biochar e motiva sua adoção nos setores rural e agroindustrial.

O biochar vai além de seu papel tradicional como corretivo de solo para funcionar como um ativo climático dentro de cadeias de valor sustentáveis, gerando retornos financeiros atrelados à melhoria da produtividade do solo e reduções de emissões comprovadas.

Incorporar o biochar em instrumentos internacionais de financiamento climático — como fundos verdes, programas de crédito de carbono e mecanismos de desenvolvimento limpo — pode atrair investimentos para tecnologias descentralizadas que convertem resíduos em energia renovável e reservas estáveis de carbono.

Este modelo integrado promove a descarbonização agrícola, ao mesmo tempo que reforça as estratégias de economia circular em que a valorização dos resíduos produz ganhos ambientais e econômicos.

Melhoria da produtividade agrícola e redução de insumos. A aplicação de biochar em sistemas agrícolas representa uma estratégia eficaz para melhorar a qualidade do solo e otimizar o uso de insumos, contribuindo assim para uma produção mais eficiente e sustentável. Graças à sua alta porosidade, grande área superficial específica e abundância de grupos funcionais ativos, o biochar melhora a retenção de água e nutrientes, aumenta a capacidade de troca catiônica e estimula a atividade microbiana do solo.

Essas propriedades físicas e químicas promovem um ambiente radicular mais estável e fértil, resultando em um crescimento vegetal mais vigoroso e sustentado.

A incorporação de biochar em solos agrícolas pode reduzir significativamente a dependência de fertilizantes sintéticos, melhorando a eficiência do uso de nutrientes e diminuindo as perdas por lixiviação.

Essa característica é particularmente relevante em regiões com limitações econômicas ou logísticas de acesso a fertilizantes químicos, bem como em solos com baixa capacidade de retenção de nutrientes. Além disso, a estrutura porosa do biochar contribui para a melhoria da eficiência hídrica, reduzindo a evapotranspiração e aumentando a disponibilidade de água na zona radicular, resultando em maior resiliência a condições de seca. Nas regiões tropicais e subtropicais, onde os solos são frequentemente muito intemperizados e pobres em matéria orgânica, o biochar atua como restaurador da fertilidade do solo, ajudando a recuperar a produtividade de terras degradadas e a manter a estabilidade dos sistemas agrícolas face às variações climáticas.

A sua integração em práticas agroecológicas e programas de gestão sustentável do solo pode, portanto, aumentar a produtividade agrícola, melhorar a segurança alimentar e reduzir a pegada ambiental da produção primária.

Flexibilidade e escalabilidade tecnológica. As tecnologias de conversão de biomassa exibem notável flexibilidade em termos de projeto e operação, permitindo sua implantação em diversos contextos de produção — desde sistemas agrícolas de pequena escala até grandes instalações industriais. Essa adaptabilidade tecnológica aumenta a viabilidade do modelo integrado de energia-biochar-agricultura sustentável, permitindo que os sistemas se ajustem às condições locais de disponibilidade de biomassa, capacidade de infraestrutura e demanda de energia.

Em ambientes rurais ou de pequena escala, unidades modulares de pirólise e gaseificação podem ser implementadas de forma descentralizada, utilizando resíduos agrícolas no local e minimizando os custos associados ao transporte e manuseio de materiais. Em nível industrial, instalações de conversão de médio e grande porte podem integrar a geração de bioenergia com a coprodução de biochar e outros materiais de valor agregado, otimizando assim o potencial energético da biomassa e proporcionando múltiplos benefícios ambientais e econômicos.

A valorização de coprodutos como o biochar diversifica ainda mais as fontes de receita, reduzindo a dependência exclusiva da venda de energia.

O biochar pode servir como um corretivo agrícola, um adsorvente ambiental ou um precursor para materiais avançados, enquanto as frações gasosas e líquidas produzidas durante a pirólise podem ser utilizadas como combustíveis ou matérias-primas químicas. Essa diversificação aumenta a rentabilidade do processo, mitiga o risco econômico e reforça a sustentabilidade a longo prazo dos sistemas de conversão de biomassa.

Desafios e Barreiras

Divergências Técnicas e Econômicas. Apesar do crescente interesse na produção e utilização de biochar, diversas barreiras técnicas e econômicas continuam a limitar sua ampla adoção e integração em sistemas agrícolas e energéticos. A viabilidade econômica permanece um dos desafios mais significativos, visto que os custos associados à conversão de biomassa — investimento de capital, operação e manutenção de equipamentos, transporte da matéria-prima, secagem e pós-processamento — variam substancialmente entre os contextos.

Esses custos dependem da escala de produção, do tipo e disponibilidade da matéria-prima, dos preços locais de energia e fertilizantes e da presença de incentivos relacionados à redução de emissões ou à geração de créditos de carbono. Como resultado, sistemas de pequena escala podem se beneficiar da redução dos custos de logística e manuseio, enquanto instalações de grande escala dependem de economias de escala, criando cenários econômicos marcadamente diferentes entre regiões e modelos de produção.

Estima-se que a produção de biochar em larga escala possa custar entre US\$ 220 e US\$ 346 por tonelada, enquanto a produção em pequena escala custa aproximadamente US \$ 400 por tonelada. Esses valores podem variar dependendo do local de produção, dos custos de mão de obra e de outros fatores mencionados anteriormente.

Estudos de viabilidade econômica demonstraram que a coprodução de energia derivada de biomassa e biochar é o caminho mais promissor para projetos futuros. Por outro lado, o uso agrícola de biochar tem demonstrado benefícios econômicos. Por exemplo, a combinação de biochar com fertilizantes NPK e rizobactérias aumentou a produtividade do trigo e os lucros líquidos por hectare. Da mesma forma, a compostagem conjunta com biochar impulsionou a produção de milho em 243%, gerando lucros líquidos de mais de US\$ 1.000 por hectare.

Uma segunda limitação decorre do desempenho heterogêneo do biochar em solos agrícolas. Sua eficácia varia não apenas devido a diferenças na composição da matéria-prima, temperatura de pirólise e condições operacionais, mas também devido às características físico-químicas específicas de cada solo. Embora numerosos estudos relatem benefícios substanciais em solos degradados, ácidos ou tropicais, as respostas em solos temperados ou ricos em nutrientes são frequentemente mais modestas ou incertas. Essa variabilidade complica os esforços para padronizar as taxas de aplicação e as recomendações agronômicas, destacando a necessidade de avaliar o desempenho do biochar em condições específicas de clima, textura, fertilidade e manejo da cultura.

Um terceiro desafio crítico envolve a competição por recursos de biomassa. Em muitas regiões, os resíduos agrícolas e florestais adequados para a produção de biochar também são demandados para a fabricação de pellets, geração de biocombustíveis, cama para animais ou combustão direta para calor e energia. Essa competição pode restringir a disponibilidade de matéria-prima, aumentar os custos da matéria-prima e prejudicar a sustentabilidade da cadeia de suprimentos. A prioridade relativa desses usos concorrentes depende das condições econômicas, logísticas, marcos regulatórios e estratégias regionais relacionadas a serviços ecossistêmicos e mitigação das mudanças climáticas.

Análises econômicas revelam que o custo da matéria-prima, a distância de transporte e o valor dos créditos de carbono têm um impacto significativo na rentabilidade do biochar. Flutuações de preço da matéria-prima de $\pm 25\%$ podem fazer com que o valor presente líquido (VPL) mude de positivo para negativo, de acordo com estudos técnico-econômicos. Dependendo do uso de coprodutos (calor, gás de síntese e bio-óleo), as unidades de pirólise descentralizadas geralmente têm tempos de retorno de 4 a 9 anos. O manuscrito fornecido contém apenas intervalos gerais publicados porque não consigo verificar números precisos para cada tecnologia.

Regulamentos, Normas e Qualidade do Produto. O desenvolvimento e a implantação em larga escala do biochar — tanto como corretivo agrícola quanto como ferramenta de mitigação das mudanças climáticas — dependem do estabelecimento de estruturas regulatórias robustas e padrões de qualidade consistentes.

Um grande desafio, no entanto, reside na ausência de critérios internacionais harmonizados que regulem propriedades chave, como concentrações de metais pesados e contaminantes orgânicos, estabilidade do carbono, teor de cinzas, tamanho das partículas e limites mínimos de desempenho agrônômico.

Essa fragmentação regulatória complica a comparação de produtos, limita a participação em mercados internacionais e mina a confiança entre agricultores, empresas e agências de fiscalização. A criação de padrões verificáveis e amplamente aceitos representa, portanto, um passo crítico para garantir a segurança, a eficácia e a rastreabilidade do biochar em suas diversas aplicações. A expansão do setor de biochar também exige garantias de que a biomassa utilizada como matéria-prima provenha de fontes sustentáveis.

Sem essas salvaguardas, o aumento da demanda por biomassa pode incentivar práticas contraproducentes, incluindo a conversão de ecossistemas naturais, a superexploração de resíduos florestais ou a competição com culturas destinadas à alimentação humana e animal.

Portanto, são essenciais os esquemas de certificação que verificam o fornecimento responsável de biomassa, protegem os serviços ecossistêmicos e estão alinhados com as políticas de conservação e uso sustentável da terra. A integração de padrões de qualidade, sistemas de certificação e diretrizes regulatórias claras protegerá a integridade ambiental e agrônômica do biochar, reforçará a confiança do mercado, facilitará o comércio internacional e apoiará a adoção de tecnologias de conversão de biomassa consistentes com os objetivos de sustentabilidade e descarbonização de longo prazo.

LIVROS TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCHAR

<https://www.brasilbiomassa.com/livrosbiochar>

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

**LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR**



EDITORA BRASIL BIOMASSA

2026



BIOCHAR CHAVE CONSTRUIR SISTEMAS ALIMENTARES RESILIENTES E AGRICULTURA SUSTENTÁVEL



Diante dos crescentes desafios das mudanças climáticas, a necessidade de soluções inovadoras e sustentáveis nunca foi tão urgente. O sequestro duradouro de carbono, o aumento do gerenciamento de recursos e a melhoria da saúde do solo fazem do nosso carbono refinado uma maneira excelente de enfrentar as mudanças. O potencial do biochar vai muito além de ser uma mera ferramenta de remoção de carbono.

Esta substância transformadora detém a chave para criar ecossistemas resilientes capazes de suportar as mudanças iminentes provocadas pelas mudanças climáticas. Uma das contribuições mais significativas do biochar para a resiliência do ecossistema está em sua capacidade de melhorar a saúde e a fertilidade do solo.

Quando incorporado aos solos, o biochar melhora a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana. Essas melhorias no solo fornecem um solo fértil para o crescimento das plantas, biodiversidade e apoiando o desenvolvimento de ecossistemas.

Mitigando riscos relacionados ao clima

A mudança climática traz uma série de desafios, de eventos climáticos extremos a mudanças nos padrões de precipitação.

O biochar, ao promover a retenção de água nos solos, ajuda a mitigar os impactos de secas e inundações. Essa capacidade de regulação da água é crucial para que plantas e ecossistemas se adaptem às mudanças nas condições climáticas, garantindo sua sobrevivência diante da adversidade.

Embora o biochar seja eficaz no sequestro de carbono, sua aplicação também ajuda a reduzir as emissões de gases de efeito estufa dos solos. Ao melhorar a estrutura do solo e a atividade microbiana, o biochar minimiza a liberação de óxido nitroso, um potente gás de efeito estufa.

Essa ação dupla – sequestro de carbono e redução de emissões – posiciona o biochar como um poderoso aliado na luta contra as mudanças climáticas.

Apoiando a agricultura sustentável

O setor agrícola desempenha um papel fundamental no ecossistema global, e sua resiliência é essencial para a segurança alimentar.

O biochar, quando integrado às práticas agrícolas, melhora o ciclo de nutrientes, reduz a necessidade de fertilizantes sintéticos e melhora o rendimento das colheitas.

Esses benefícios não apenas contribuem para a agricultura sustentável, mas também apoiam o desenvolvimento de sistemas agrícolas resilientes capazes de se adaptar a um clima em mudança.

À medida que enfrentamos os desafios de um clima em rápida mudança, a importância de soluções holísticas e sustentáveis não pode ser exagerada. O biochar, com seus benefícios multifacetados, se destaca como um ator-chave na criação de ecossistemas resilientes. Além de seu papel na remoção de carbono, o biochar contribui para melhorar a saúde do solo, a mitigação de riscos climáticos e a agricultura sustentável.



Ao abraçar o potencial do biochar, daremos passos significativos em direção à construção de um futuro mais resiliente e adaptável para o nosso planeta.

Começamos com o lixo

Lixo Urbano. Tradicionalmente, o lixo criou uma série de problemas, incluindo ineficiência de recursos, aumento de custos, poluição e escoamento de contaminantes, mas felizmente há outra maneira.

Coletamos biomassa lenhosa de uma variedade de fontes que são todas destinadas a aterros sanitários ou fossas de queima a céu aberto, este é o início do nosso sistema circular - a prevenção da degradação ou incineração de material rico em carbono. Sem intervenção, este material resultaria em futuras emissões de carbono.

Processamento

A tecnologia de pirólise é uma maneira testada, quantificável e patenteada de produzir produtos valiosos a partir de biomassa residual, este processo é a base da solução circular o que impulsiona nossa marca de desenvolvimento regenerativo.

Essencialmente, a pirólise é o aquecimento da biomassa na ausência da presença de oxigênio, resultando em um material de carbono quase puro.

Uma vez produzido, executamos processos específicos de pós-tratamento para refinar ainda mais o biochar, incluindo micronizá-lo em nanopartículas, infundi-lo com bio estimulantes e misturá-lo com outras mídias para criar solos estruturais.

Principais benefícios

Entre muitos benefícios, o biochar e o nanochar resolvem problemas inerentes ao descarte de resíduos e criam oportunidades para a regeneração de terras degradadas. Estudos e pilotos do mundo real mostraram resultados incríveis da aplicação do biochar em vários tipos de solo, condições climáticas e tipos de cultivo.

Retenção de água 40-70% de retenção

A escassez de água é um problema global que piora em algumas regiões devido às mudanças nas condições climáticas. Nosso nanochar é poroso e tem alta área de superfície, o que permite armazenar água e fornecê-la ao sistema radicular quando necessário.



Estabilização de pH Equilíbrio

específico do produto

O pH do solo pode dificultar muito o estabelecimento de novas plantas, pois geralmente o biochar é alcalino, mas também pode ser pós-processado para torná-lo ácido. Dependendo de suas necessidades específicas, temos uma solução para atingir a neutralidade.



Aumentar a absorção de carbono

2X a quantidade de carbono aplicada

O biochar melhora o rendimento e a saúde das plantas, então é natural esperar aumentos associados na absorção de carbono. Curiosamente, um estudo recente validou isso, mostrando um aumento de carbono no solo em duas vezes a quantidade de biochar aplicada.

Neutralização de toxinas Capacidade de ligação significativa

Com altas propriedades de troca de cátions e ânions, o biochar é um condutor natural. Uma ampla gama de estudos mostrou sua eficácia na ligação a toxinas e metais pesados, o que tem amplas implicações no tratamento agrícola e de água.

Crescimento microbiano Estudos mostraram aumentos moderados

O biochar promove as atividades metabólicas dos micróbios do solo e aumenta a abundância da comunidade microbiana em uma variedade de tipos de solo e climas. Isso permite solos mais saudáveis que, em última análise, tornam as plantas mais saudáveis.

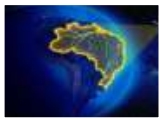
Redução de fertilizantes Redução de 50-80%

Com sua incrível capacidade de se ligar a nutrientes, a aplicação de biochar no solo, ao longo do tempo, reduz a quantidade de fertilizante necessária. À medida que a indústria amadurece e novos dados surgem, esperamos que a economia de custos seja o principal impulsionador da adoção do biochar.

Créditos de carbono

A compensação das emissões de carbono é necessária para que a comunidade global evite os piores efeitos das mudanças climáticas. Cada tonelada de biochar colocada no solo de forma duradoura (>1000 anos) sequestra aproximadamente três toneladas de carbono da atmosfera, o que, ao mesmo tempo em que melhora os sistemas nos quais está integrado, o torna uma das melhores maneiras de gerar créditos de carbono de qualidade e reduzir sua pegada.





ECONOMIA CIRCULAR PIRÓLISE E SOLUÇÕES DE ENERGIA FUTURA

O mundo está em uma encruzilhada quando se trata de energia. À medida que a população global continua a crescer e se urbanizar, a demanda por energia está disparando e também nos encontramos diante de desafios ambientais sem precedentes, incluindo mudanças climáticas e esgotamento de recursos.

Para abordar essas questões e, ao mesmo tempo, atender às necessidades futuras de energia, é crucial adotar soluções circulares.

Neste artigo, exploraremos a importância das soluções de energia circular e nos aprofundaremos em exemplos específicos, incluindo o inovador sistema de pirólise.

Economia Circular em Energia

A economia circular, uma abordagem que enfatiza a sustentabilidade, a redução de resíduos e a regeneração de recursos, está ganhando força em todos os setores. No setor de energia, as soluções circulares oferecem um caminho não apenas para satisfazer a fome de energia do mundo, mas também para reduzir os impactos ambientais. Aqui estão algumas das principais razões pelas quais as soluções circulares são vitais:

1. **Eficiência de Recursos:** Os sistemas tradicionais de energia linear, como combustíveis fósseis, são notórios por sua ineficiência e esgotamento de recursos. Soluções de energia circular, por outro lado, priorizam a eficiência por meio da reutilização e reciclagem de recursos.

2. Redução de resíduos: sistemas de energia circular minimizam a produção de resíduos. Isso significa projetar processos que gerem menos resíduos e encontrar maneiras de reaproveitar materiais residuais, criando um ecossistema de energia mais sustentável.

3. Preservação ambiental: soluções circulares, especialmente aquelas baseadas em energia renovável, ajudam a reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a degradação ambiental associada a fontes de energia convencionais.

Pirólise: uma inovação em energia circular

A pirólise é um excelente exemplo de tecnologia circular inovadora que tem o potencial de revolucionar o setor de energia. É um processo térmico que converte materiais orgânicos, como biomassa e resíduos, em produtos valiosos, incluindo biochar, bio-óleo e gás de síntese. Veja por que a pirólise é uma virada de jogo:

1. Utilização de biomassa: a pirólise pode converter resíduos agrícolas, resíduos florestais e outros materiais orgânicos em biocombustíveis e biochar. Isso reduz o impacto ambiental do descarte de resíduos e fornece uma fonte sustentável de energia.

2. Sequestro de carbono: o biochar, um subproduto da pirólise, pode ser usado para sequestrar carbono no solo, aumentando a fertilidade do solo e reduzindo os níveis de dióxido de carbono na atmosfera.

3. Diversificação de energia: o bio-óleo e o gás de síntese produzidos por meio da pirólise podem ser usados como fontes de energia limpa e renovável, reduzindo nossa dependência de combustíveis fósseis.
4. Redução de resíduos: ao converter resíduos orgânicos em produtos valiosos, a pirólise minimiza a geração de resíduos e o uso em aterros sanitários, contribuindo para uma economia circular.
5. Restauração do habitat: uma vez que o biochar é infundido no solo, ele produz uma série de resultados positivos, incluindo retenção de água preciosa, aumento da atividade microbiana do solo, melhoria da saúde das plantas e redução da quantidade de fertilizantes necessários.

Exemplos de outras soluções circulares

1. Fontes de energia renováveis: aproveitar o poder do sol, do vento e da água é um excelente exemplo de energia circular. Essas fontes são praticamente ilimitadas e não produzem emissões prejudiciais durante a produção de energia. Painéis solares, turbinas eólicas e usinas hidrelétricas estão se tornando cada vez mais populares como soluções de energia circular.
2. Armazenamento de energia: tecnologias de armazenamento de energia, como baterias avançadas, nos permitem armazenar o excesso de energia para uso posterior. Esses sistemas podem ser recarregados e reutilizados, reduzindo a necessidade de produção energia e minimizando desperdício.

3. Redes inteligentes: redes inteligentes otimizam a distribuição de energia monitorando a demanda em tempo real e ajustando o fornecimento de acordo. Isso reduz as perdas de energia durante a transmissão e torna os sistemas de energia mais eficientes.

4. Edifícios circulares: projetos de edifícios circulares incorporam recursos de eficiência energética, como aquecimento solar passivo, ventilação natural e materiais sustentáveis. Essas estruturas consomem menos energia e contribuem para um ecossistema de energia circular.

Soluções de energia circular são indispensáveis para um futuro sustentável. Desde o aproveitamento de fontes de energia renováveis até tecnologias inovadoras como a pirólise, essas abordagens oferecem uma maneira de atender às crescentes necessidades de energia do mundo, preservando o planeta. Ao adotar princípios circulares no setor de energia, podemos reduzir o esgotamento de recursos, minimizar o desperdício e avançar em direção a um futuro energético mais limpo e sustentável.



BMW INVESTE NA REMOÇÃO DE CARBONO PELO BIOCHAR E OBTÉM CRÉDITOS DE CARBONO



A BMW aposentou 25.000 toneladas de créditos de CO₂ baseados em biochar como parte de sua estratégia de sustentabilidade. Os créditos apoiam o sequestro de carbono de longo prazo. A BMW planeja aposentar até 57.500 tCO₂e até 2026, visando zero líquido até 2050.

O BMW Group deu seu primeiro passo na remoção de carbono com base em biochar, aposentando 25.000 toneladas de créditos de CO₂ (tCO₂e). Essa medida está alinhada com sua estratégia de sustentabilidade mais ampla, que inclui compensar até 10% de suas emissões por meio de créditos de remoção de dióxido de carbono até 2050. Os créditos foram obtidos da Atmosfair e da Firstclimate, duas organizações alemãs que trabalham em projetos de biochar. Elas foram certificadas sob o padrão Global Biochar C-Sink, uma atualização da estrutura European Biochar Certificate C-Sink introduzida em 2024.

A aposentadoria de 25.000 tCO₂e em créditos de biochar pela BMW é estimada em US\$ 3,25 milhões, com preços de mercado em média de US\$ 130 por tonelada. Isso representa um investimento pequeno, mas estratégico, considerando os lucros antes dos impostos da BMW de US\$ 11,9 bilhões (€ 10,9 bilhões) no ano passado.

A empresa relatou US\$ 11,9 bilhões (€ 10,9 bilhões) em lucros antes dos impostos em 2024, tornando este um investimento relativamente pequeno, mas estratégico, em sequestro de carbono.

À medida que grandes corporações como a BMW integram a remoção de carbono em suas estratégias de longo prazo, a demanda por créditos de carbono verificáveis e de alta qualidade continua a aumentar. As empresas agora têm maior flexibilidade para moldar seus caminhos de sustentabilidade, mas o nível de liderança continua alto.

Olhando para o futuro, a BMW planeja aposentar entre 46.000 e 57.500 tCO₂e de créditos de biochar ao longo de 2025 e 2026. A empresa estabeleceu uma meta líquida zero para 2050, visando reduzir suas emissões de Escopo 1, 2 e 3 em pelo menos 90% de sua linha de base de 2019 de 150,1 milhões de tCO₂e. As compensações serão usadas apenas para emissões que não podem ser reduzidas ainda mais.

Ao investir em biochar agora, a BMW busca apoiar o dimensionamento de tecnologias de remoção de carbono e garantir compensações de alta qualidade para seus compromissos climáticos de longo prazo.



GRANDE ANO DO BIOCHAR: 107.000 TON. ENTREGUES COM A REMOÇÃO DE CARBONO DE 8 MILHÕES DE TON.

De acordo com o CDR.fyi, as compras de remoção de carbono atingiram 8 milhões de toneladas (+78%) com o biochar desempenhando um papel fundamental. A Exomad Green liderou com 107.000 toneladas entregues. No entanto, a concentração de compradores e os investimentos em declínio representam desafios.

As empresas de biochar devem expandir a demanda, garantir contratos e defender políticas de apoio. O mercado de remoção de dióxido de carbono (CDR) viu um crescimento impressionante com volumes totais comprados atingindo quase 8 milhões de toneladas, um aumento de 78%.

Esses números são baseados em compras divulgadas publicamente, o que significa que a atividade real do mercado pode ser maior. No entanto, um desafio importante permanece: a proporção de entrega para reserva é de apenas 4,4%, refletindo dificuldades de escala em estágio inicial no setor.

O biochar continua a desempenhar um papel crítico no CDR durável, com a Exomad Green sozinha entregando 107.000 toneladas de remoção de CO₂ até o momento — tornando-se um grande contribuidor para contratos cumpridos.

Com entregas totais de CDR aumentando 120% ano a ano para 318.600 toneladas, o biochar é uma força líder na transformação de compromissos reservados em impacto climático real.

Apesar desse crescimento, o cenário de compradores continua altamente concentrado. Microsoft, Google, Stripe e Frontier foram responsáveis por 80% das compras, enquanto o número de compradores únicos aumentou em apenas 7%.

De forma alarmante, os compradores de primeira viagem caíram 18%, levantando preocupações sobre se a demanda pode acompanhar o aumento da oferta. Apenas 36% dos fornecedores de CDR fizeram vendas, sugerindo possível excesso de oferta se novos compradores não entrarem no mercado.

Isso sinaliza um clima de investimento mais cauteloso, provavelmente vinculado a prazos de entrega lentos e concentração de compradores. Para as empresas de biochar, o caminho a seguir requer a expansão da base de compradores, a garantia de contratos de longo prazo e a defesa de políticas de apoio. Se a demanda estagnar, a consolidação do mercado pode ocorrer. No entanto, com sua comprovada escalabilidade e confiabilidade, o biochar continua sendo um pioneiro na entrega de remoção de carbono real e permanente.





NOVA PLATAFORMA IMPULSIONA FINANCIAMENTO PARA STARTUPS DE BIOCHAR



A BiocharFunding.com lançou uma plataforma inovadora para abordar os desafios de financiamento enfrentados por startups de biochar. Com a crescente demanda por biochar e créditos de remoção de carbono, como os CORCs da Puro Earth, essas empresas em estágio inicial muitas vezes lutam para garantir capital para projetos piloto e escalar a produção.

Esta plataforma conecta startups com investidores de capital, financiadores climáticos e compradores corporativos para facilitar seu crescimento e impacto no mercado de créditos de carbono.

Apesar da alta demanda por biochar e seu potencial para sequestro de carbono e saúde do solo, startups enfrentam barreiras significativas para obter financiamento pré-emente. BiocharFunding.com preenche essa lacuna ao oferecer soluções de financiamento personalizadas para fabricantes de biochar, incluindo:

- Investimentos de capital para impulsionar as operações.
- Empréstimos e financiamento de projetos para dar suporte a equipamentos e custos de expansão.
- Acordos de Off-Take , onde compradores corporativos pré-compram créditos.
- Acordos de Transmissão de Carbono , fornecendo financiamento contínuo vinculado à produção futura de créditos.

O CEO Paul Sheals enfatizou que a plataforma visa capacitar novos fabricantes de biochar, permitindo que eles escalem as operações e contribuam para o crescente mercado de créditos spot de biochar.

Essa abordagem não apenas apoia startups, mas também oferece aos investidores e compradores corporativos oportunidades de se envolver em projetos positivos para o clima e acessar créditos de carbono de alta qualidade. Biochar Funding é uma plataforma inovadora dedicada a preencher a lacuna de financiamento para startups de biochar. Conectamos investidores conscientes do clima, compradores corporativos e fabricantes de biochar em estágio inicial para impulsionar o crescimento sustentável e atender à crescente demanda por soluções de remoção de carbono

Na Biochar Funding, estamos comprometidos em capacitar startups de biochar conectando-as com fontes essenciais de financiamento.

O mercado de biochar está crescendo, com créditos de carbono como os CORCs da Puro Earth em alta demanda.

No entanto, muitos fabricantes de biochar lutam para acessar o financiamento inicial necessário para lançar projetos piloto e escalar a produção.

Nossa missão é resolver esse desafio criando um mercado central para investidores, financiadores e compradores corporativos para apoiar o crescimento do biochar e o impacto climático.

O biochar é um material sequestrador de carbono ecológico feito de matéria orgânica por meio de pirólise.

Cada tonelada de biochar captura uma média de 2,5 toneladas de CO₂, tornando-o uma das ferramentas mais eficazes para remoção de carbono a longo prazo.

Com o mercado de biochar projetado para atingir US\$ 3,3 bilhões até 2025, agora é a hora de investir nessa indústria impactante.

2,5 toneladas de CO₂ sequestradas por tonelada de biochar produzida.

Valor de mercado projetado de US\$ 3,3 bilhões até 2025.

Remoção de carbono a longo prazo com benefícios tangíveis à saúde da terra.



POTENCIAL DO BIOCHAR DA AUSTRÁLIA



O relatório da Comissão de Produtividade sobre Economia Circular da Austrália destaca o papel do biochar na gestão de resíduos orgânicos, saúde do solo e sequestro de carbono. Apesar dos benefícios, a produção continua baixa devido a barreiras regulatórias e econômicas.

Reformas de políticas, incluindo reconhecimento de créditos de carbono e consistência regulatória, são necessárias para dimensionar o impacto do biochar na agricultura sustentável e na redução de resíduos.

O impulso da Austrália em direção a uma economia circular apresenta oportunidades significativas para a valorização de resíduos orgânicos, e o biochar é um ator-chave nessa transição.

Um relatório provisório recente da Comissão de Produtividade, “Australia's Circular Economy: Unlocking the Opportunities” explora o papel do biochar na gestão de resíduos orgânicos e destaca tanto seu potencial quanto os desafios que ele enfrenta.

O relatório, preparado pela Productivity Commission, examina caminhos para aumentar a circularidade na economia da Austrália. Ele visa identificar barreiras, avaliar o potencial de mercado e explorar intervenções políticas para gestão sustentável de resíduos. Um foco principal é a transformação de resíduos orgânicos em produtos de valor agregado, como biochar, que pode melhorar a saúde do solo e contribuir para o sequestro de carbono.

O Papel do biochar nas iniciativas de economia circular

O biochar é produzido por meio da pirólise ou gaseificação de resíduos orgânicos, incluindo resíduos agrícolas, resíduos de colheitas, esterco animal e digestato de digestão anaeróbica.

Seus benefícios incluem melhorar a fertilidade do solo, atuar como um sumidouro de carbono e reduzir a dependência de fertilizantes químicos.

O relatório observa que a substituição de fertilizantes químicos por biochar tem benefícios ambientais semelhantes ao uso de composto orgânico.

Apesar de sua longa história de uso por comunidades aborígenes e das ilhas do Estreito de Torres para melhoria do solo, a produção atual de biochar da Austrália continua baixa — estimada entre 10.000 e 20.000 toneladas anuais em 2020. Isso está significativamente atrás da América do Norte, que produz mais de 150.000 toneladas por ano.

Desafios e considerações políticas

Embora o biochar tenha claras vantagens ambientais e agrícolas, sua produção na Austrália é limitada por barreiras regulatórias e econômicas. O relatório destaca que:

A produção de biochar está sujeita a regulamentações ambientais complexas que limitam sua ampla adoção.

Ele ainda não é reconhecido pelo esquema da Unidade de Crédito de Carbono Australiana (ACCU), o que dificulta que os produtores monetizem seus benefícios de sequestro de carbono.

A expansão da produção entre estados é dificultada por estruturas regulatórias inconsistentes.

Esses desafios sugerem que reformas políticas são necessárias para facilitar o crescimento da indústria do biochar. Abordar inconsistências regulatórias e incorporar o biochar em estruturas de crédito de carbono poderia desbloquear seu potencial total na economia circular da Austrália.

Olhando para a frente – Futuro Biochar na Austrália

Com o crescente interesse em agricultura sustentável e redução de resíduos, o biochar apresenta uma oportunidade de melhorar a saúde do solo enquanto mitiga as emissões de carbono.

No entanto, superar obstáculos regulatórios e aumentar a capacidade de produção será crucial para concretizar seus benefícios. As descobertas deste relatório provisório fornecem uma base para formuladores de políticas e partes interessadas da indústria explorarem caminhos para escalonar a produção de biochar na Austrália.





Da biomassa residual ao combustível verde: catalisadores à base de biochar para a produção de hidrogênio

Karoll M. Rubiano 1, Asim Jilani 1,2 e Hussameldin Ibrahim 1,*

1 Instituto de Pesquisa em Tecnologias de Energia Limpa (CETRI), Engenharia de Sistemas de Processos, Faculdade de Engenharia e Ciências Aplicadas, Universidade de Regina, 3737 Wascana Parkway, Regina, SK S4S 0A2, Canadá

2 Centro de Nanotecnologia, Universidade Rei Abdulaziz, Jeddah 21589, Arábia Saudita

Resumo

Com a crescente demanda por energia devido aos efeitos de eventos climáticos extremos nos últimos anos, a necessidade de expandir o acesso a energias renováveis, como o hidrogênio verde, tornou-se uma prioridade na pesquisa atual. No entanto, um dos principais desafios para a produção de hidrogênio é o elevado custo dos catalisadores, devido ao consumo e à escassez de metais raros. Para reforçar a sustentabilidade, o biochar, um material rico em carbono, emergiu com enorme potencial. Suas propriedades, como alta área superficial e abundância de grupos funcionais, facilitam a adsorção do catalisador e a dispersão dos sítios ativos. Além disso, o conteúdo mineral e a capacidade de ajuste da química da superfície permitem a ativação e a impregnação com metais, melhorando a produção de hidrogênio.

Considerando essas características, este artigo destacará todo o potencial do biochar como catalisador e suporte catalítico, os avanços atuais que identificam o biochar como catalisador na produção de hidrogênio e as principais características que o tornam adequado para essas aplicações. Por fim, os desafios e limitações remanescentes são descritos, fornecendo uma perspectiva sobre oportunidades futuras e direções de pesquisa.

Palavras-chave: biochar ; catalisador ; hidrogênio verde ; propriedades do biochar

1. Introdução

1.1. A necessidade do hidrogênio verde na transição para energia limpa

Em 2024, a demanda global de energia cresceu 2,2%, em comparação com o crescimento constante de 1,3% ao ano observado desde 2013. De acordo com o Relatório Global de Energia 2025 da AIE (Agência Internacional de Energia), cerca de metade do aumento no consumo de energia é atribuível aos efeitos das condições climáticas extremas no verão, quando houve alta demanda por refrigeração e ventos fracos.

Para suprir essa demanda energética, o carvão e o gás natural aumentaram sua produção, o que levou a um nível recorde de emissões de 37,8 Gt de CO₂ e a um aumento de 3 ppm na concentração atmosférica. Apesar do aumento nas emissões de carbono, as energias limpas fizeram a diferença. Elas agora evitam cerca de 2,6 Gt de emissões anuais; estima-se que, sem elas, as emissões de carbono poderiam ter sido três vezes maiores nos últimos anos [1].

O hidrogênio verde é um combustível limpo que desempenha um papel fundamental na transição energética. Atualmente, é visto como a solução potencial para os desafios duplos das demandas energéticas de uma população crescente e dos problemas ambientais causados pela dependência de sistemas de energia não renováveis.

A produção e o uso do hidrogênio verde apresentam diversas vantagens: pode ser gerado com zero emissões diretas de carbono e depende de recursos abundantes e renováveis. Além disso, possui alta densidade energética, tornando-o eficiente em diversos setores, como geração de calor e energia, e como matéria-prima para a indústria e o transporte [2].

Além disso, o hidrogênio verde tem o potencial de se alinhar a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pelas Nações Unidas, visando alcançar um futuro sustentável.

Para além do impacto energético e ambiental imediato que gera, ele tem o potencial de abordar problemas socioeconômicos incluídos nos ODS, como crescimento econômico e geração de empregos (ODS 8), desenvolvimento de infraestrutura (ODS 9) e cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11).

Isso demonstra que se trata de uma tecnologia que pode ser um grande motor para a inovação [3]. É imprescindível acelerar a economia do hidrogênio para superar seus desafios atuais, como armazenamento, produção dispendiosa, uso de elementos raros, intermitência das fontes renováveis e falta de infraestrutura.

Portanto, deve haver um grande investimento no desenvolvimento da tecnologia e na integração de sistemas, juntamente com marcos políticos, para que todas as populações possam se beneficiar do sucesso desejado [4].

1.2. Resíduos de biomassa: uma fonte abundante e renovável

Para alcançar a sustentabilidade circular, a inclusão de outros setores econômicos é necessária, particularmente aqueles relacionados à gestão de resíduos e à recuperação de recursos.

Geralmente, os resíduos de biomassa resultam em aterros sanitários, lixões a céu aberto e corpos d'água. Como resultado, a degradação e a contaminação do solo aumentam os riscos tanto para os seres humanos quanto para o meio ambiente. Com a urgência de mitigar os impactos ambientais em diversas indústrias, os resíduos de biomassa têm sido cada vez como um recurso valioso e sustentável nessa transição para economias de baixo carbono.

Trata-se de um material amplamente acessível e considerado neutro em carbono quando gerenciado adequadamente, o que o torna uma matéria-prima atraente para aplicações energéticas.

A conversão termoquímica da biomassa permite a produção de gás de síntese rico em hidrogênio e biochar [5].

A biomassa é uma matriz orgânica obtida de plantas e animais, e o método baseado na origem é a melhor forma de identificar as fontes de biomassa.

Existem cinco categorias: resíduos agrícolas, resíduos de madeira, resíduos alimentares, resíduos sólidos urbanos e lodo de esgoto [6].

Devido à sua composição complexa, que inclui celulose, hemicelulose, lignina, proteínas, lipídios e materiais inorgânicos, especialmente encontrados em materiais derivados de resíduos agrícolas e de madeira, eles têm um potencial significativo para conversão em produtos de valor agregado. Por exemplo, a biomassa pode ser fermentada para produzir bioetanol ou produtos bioquímicos e açúcares fermentáveis, ou ser utilizada em processos termoquímicos para produzir biochar ou biocombustíveis [7]; biomassa alternativa, como resíduos médicos, produz biochar de alta qualidade, oferecendo uma rota alternativa para a recuperação desses resíduos [8].

1.3. Emergência do biochar como catalisador sustentável

O biochar é um material à base de carbono que pode ser produzido a partir da pirólise da biomassa, em condições de baixo ou nenhum oxigênio, a temperaturas de 350 a 1000 °C [9].

É considerado um catalisador econômico e viável para a produção de biocombustíveis; os grupos funcionais que adsorvem metais aumentam sua aplicação no desenvolvimento de catalisadores biochar-metal, como mostrado na Figura 1. Além disso, é adaptável a usos específicos, alterando variáveis como matéria-prima, condições de pirólise e modificações físico-químicas que melhoram seu desempenho [10].

Atualmente, mais de 90% dos processos químicos requerem um catalisador para melhorar o rendimento e a seletividade. Os mais comumente usados são derivados de metais de transição, como ródio, paládio, platina, rutênio, irídio, ouro, prata e ósmio, entre outros. O problema com esses materiais é que são caros e escassos, e a maioria das técnicas de mineração não é ambientalmente amigável. Todos esses problemas geram flutuações no fornecimento, reduzindo sua acessibilidade [11].

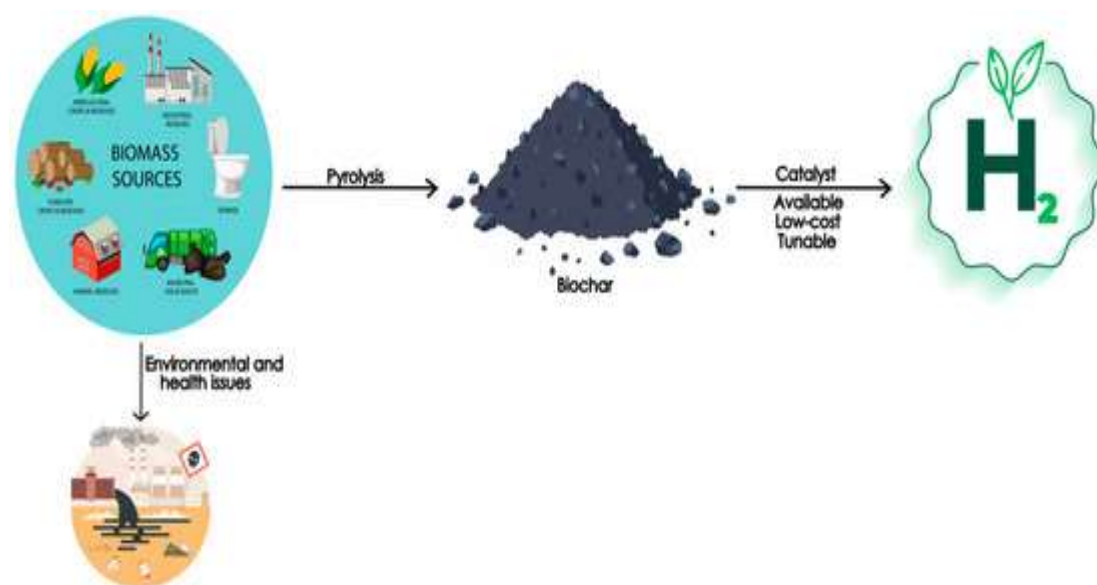


Figura 1. Biochar como catalisador sustentável que agrega valor aos resíduos de biomassa.

Em termos de produção de hidrogênio verde, metais e minerais são fundamentais na construção de equipamentos como células de combustível e catalisadores, mas espera-se que a demanda ultrapasse a disponibilidade desses materiais. Para melhorar a sustentabilidade do catalisador, é necessário que aprimoremos a pesquisa de materiais potenciais como polímeros, ligas e materiais de carbono [12].

1.4. Objetivos e Estrutura da Revisão

Atualmente, o biochar é um adsorvente que tem demonstrado excelente desempenho na remediação de água no solo, e a maioria dos estudos apresentados anualmente concentra-se nele. No entanto, o biochar é um material promissor na área de catálise, especialmente em aplicações de hidrogênio. Por exemplo, no campo da fotólise da água, o biochar com modificações superficiais metálicas proporcionou estabilidade e o bandgap necessário para alcançar uma reação aprimorada, como apontado por Jilani et al. [13]. Estudos sobre as aplicações atuais do biochar na produção de hidrogênio estão disponíveis, como constatado por Mishra et al. [14]. Contudo, o biochar como catalisador encontra-se em estágios iniciais de desenvolvimento na área de pesquisa. A falta de padronização em sua produção afeta a escalabilidade e a reprodutibilidade, reduzindo a possibilidade de levar esse material a um nível de maturidade industrial.

Esta revisão visa destacar o biochar como um catalisador para conduzir as tecnologias de hidrogênio a um caminho sustentável.

A presente revisão fornece uma estrutura unificada e crítica de Estrutura-Propriedade-Função-Desempenho (SPP) para analisar os múltiplos papéis do biochar. Realizamos uma classificação e comparação desses papéis – como catalisador, suporte metálico, adsorvente, transportador de elétrons e mediador microbiano – e vinculamos explicitamente essas características a mecanismos específicos de produção de hidrogênio (termoquímico, eletroquímico, fotocatalítico e biológico).

Além disso, abordamos as limitações de escalabilidade, os desafios de durabilidade e a viabilidade industrial. Com as descobertas, é possível oferecer diretrizes de projeto e identificar lacunas de pesquisa prioritárias para orientar a área além de relatos incrementais, rumo à maturação tecnológica.

Para a elaboração deste artigo de revisão, a pesquisa bibliográfica abrangeu publicações de 2020 até o presente, refletindo a rápida evolução da pesquisa sobre hidrogênio baseado em biochar nos últimos cinco anos. Artigos revisados por pares foram identificados principalmente por meio de importantes bases de dados científicas, incluindo ScienceDirect, Web of Science e Google Scholar.

A estratégia de busca empregou combinações de palavras-chave como “biochar”, “produção de hidrogênio”, “catalisador”, “suporte de catalisador”, “propriedades de superfície” e “desempenho”, utilizando operadores booleanos (AND e OR) para refinar os resultados da pesquisa e aumentar a relevância. A seleção dos artigos foi realizada em diferentes etapas, utilizando a plataforma online CADIMA, com a triagem de títulos e resumos de acordo com o escopo da revisão.

Em seguida, os artigos completos foram avaliados quanto aos objetivos, metodologia e resultados relatados. Apenas os estudos que forneceram detalhes metodológicos e métricas de desempenho foram mantidos para análise. Finalmente, as principais informações dos artigos selecionados foram sintetizadas para identificar tendências e relações estrutura-desempenho, considerando a heterogeneidade das condições experimentais entre os estudos.

2. Rotas de Produção de Hidrogênio: Uma Visão Geral. O hidrogênio é uma parte crucial da transição energética. Seu potencial como vetor energético e a flexibilidade de sua produção a partir de fontes renováveis e não renováveis o tornam uma opção atraente para o desenvolvimento de energia limpa. A variedade de fontes levou à pesquisa de diversas tecnologias que oferecem uma gama de opções para a criação de uma rede energética consistente. Para identificar a fonte e a tecnologia aplicada, foi criado um sistema de cores.

O hidrogênio derivado do gás natural é cinza, o azul foi associado à captura de carbono e o turquesa à pirólise. É considerado verde quando as matérias-primas são renováveis e quando a energia renovável é aplicada à eletrólise [15 , 16].

A Figura 2 apresenta uma visão geral.

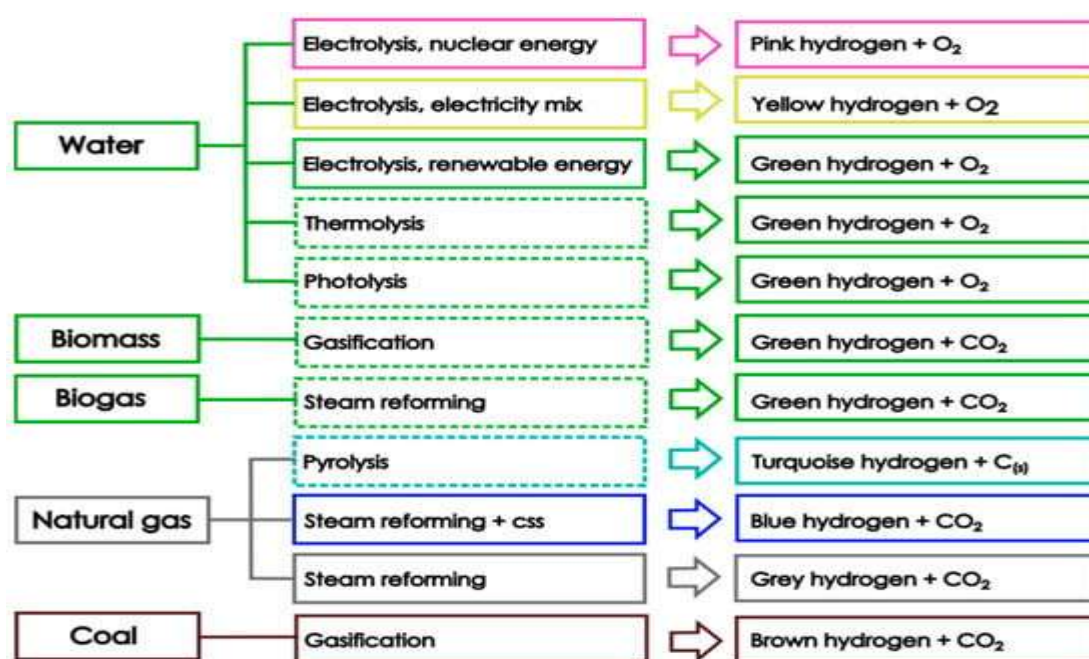


Figura 2. Visão geral das possíveis vias de produção de hidrogênio usando várias opções de tecnologia e fontes de eletricidade. As caixas tracejadas indicam tecnologias que ainda não estão disponíveis em escala industrial. Modificado com permissão de [17].

2.1. Rotas Termoquímicas: Pirólise, Gaseificação e Reforma

2.1.1. Pirólise. A pirólise é um processo termoquímico que envolve a decomposição térmica do metano, na ausência de oxigênio. Ela tem sido proposta como um método alternativo para a produção de hidrogênio devido à sua capacidade de gerar diretamente hidrogênio e carbono sólido sem a formação de CO_2 durante a própria reação.

Esse método serve como uma ponte potencial entre os combustíveis convencionais à base de carbono e as tecnologias de energia renovável. O processo utiliza reações endotérmicas para produzir hidrogênio gasoso e carbono sólido como subproduto, que pode ser utilizado como matéria-prima, contribuindo a curto ou longo prazo para o estoque de dióxido de carbono. No geral, o processo evita a geração direta de emissões de gases de efeito estufa.

A pirólise do metano normalmente requer altas temperaturas de operação, em torno de $1200\text{ }^\circ\text{C}$, para superar a barreira de energia de ativação da dissociação da ligação CH. Variáveis como a pressão do metano e o catalisador utilizado têm um grande impacto no rendimento da reação. [18].

Diferentes configurações de reatores para a decomposição do metano foram estudadas, como mostrado na Figura 3. Além de tecnologias que incluem a pirólise assistida por plasma, também foram estudados reatores baseados em metal fundido/fundido e pirólise catalítica. Catalisadores são frequentemente empregados para reduzir a temperatura necessária e melhorar o rendimento de hidrogênio, visando maior viabilidade econômica.

Catalisadores à base de carbono apresentam grande estabilidade em altas temperaturas (800–1000 °C); metais de transição, como níquel e ferro, são os mais comuns, e modificações em suas superfícies melhoram a atividade e a estabilidade.

Ligas metálicas fundidas e sais fundidos demonstraram o melhor potencial, alcançando alto rendimento em temperaturas mais baixas [19].

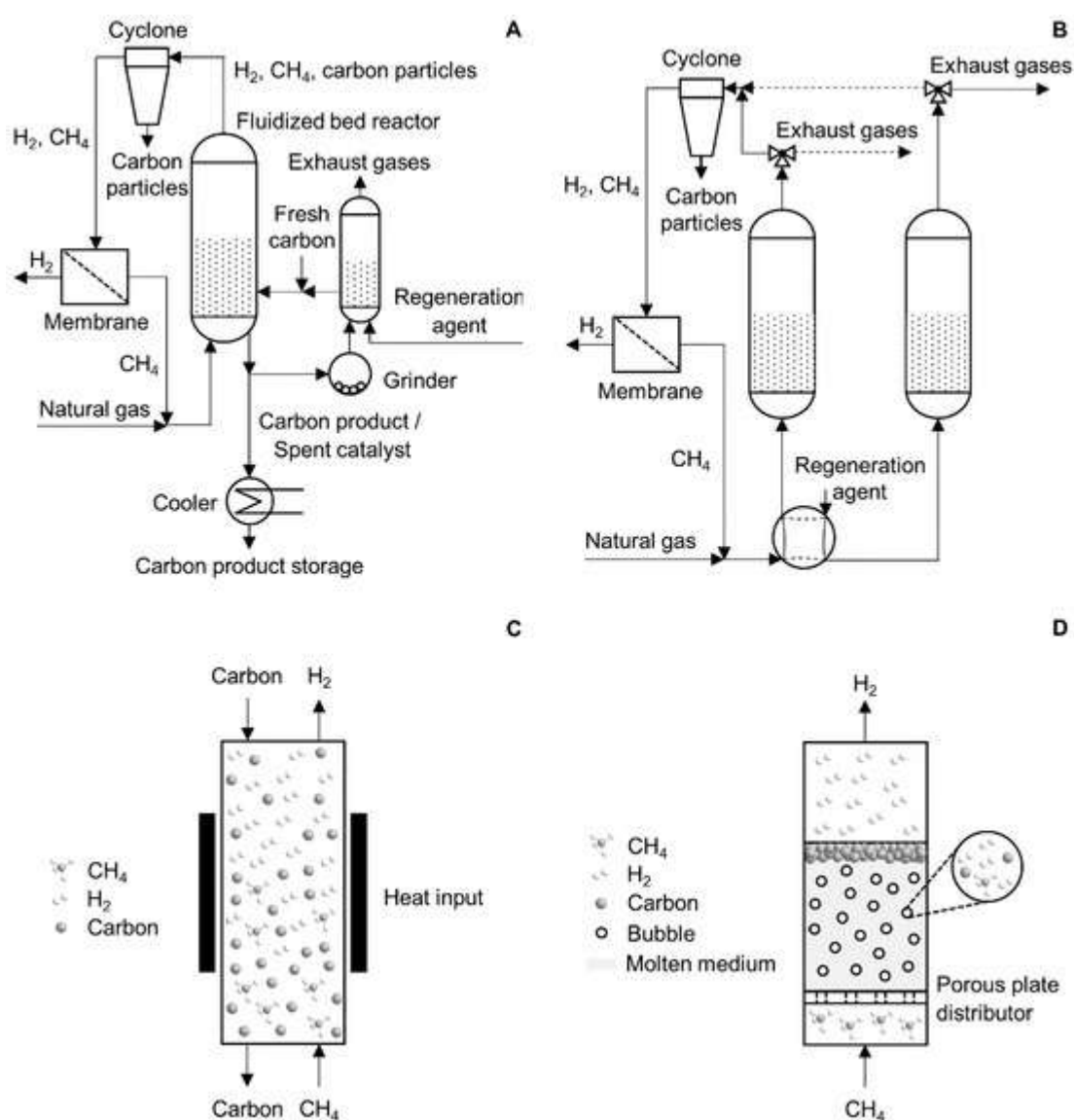


Figura 3. Configurações potenciais de reatores para a implementação industrial da pirólise do metano. (A) Reator de leito fluidizado com unidade de regeneração do catalisador. (B) Reatores paralelos operando em modo cíclico de reação-regeneração. (C) Reator de leito móvel. (D) Reator de coluna de bolhas líquidas. Reproduzido com permissão de [20].

Além disso, embora o processo de pirólise apresente baixas ou quase zero emissões, sua matéria-prima e seus possíveis subprodutos podem contribuir significativamente para o balanço total de emissões de gases de efeito estufa e reduzir a vantagem ambiental líquida do processo.

Uma avaliação abrangente do ciclo de vida é realizada, incluindo a fonte de metano, as taxas de vazamento e o consumo de energia para operação em alta temperatura, sendo o manejo a longo prazo do carbono sólido essencial para avaliar com precisão sua vantagem ambiental.

2.1.2. Reforma

A reforma a vapor do gás (SMR, na sigla em inglês) produz hidrogênio cinza a partir do metano extraído do gás natural. Essa tecnologia é a mais consolidada no mercado; cerca de 75% da produção global pertence à SMR.

Em geral, o primeiro processo é a dessulfurização para evitar a desativação do catalisador; em seguida, o hidrogênio é enviado para a unidade de reforma catalítica.

Essa reação é altamente endotérmica; a temperatura ideal para otimizar a conversão gira em torno de 800–900 °C. Além disso, o catalisador mais comum é o níquel metálico, com suportes de magnésia, aluminossilicatos ou óxido de alumínio. Posteriormente, o monóxido de carbono remanescente sofre a reação denominada deslocamento do gás de água.

Finalmente, o hidrogênio é purificado com um sistema de adsorção por oscilação de pressão (PSA), que é uma tecnologia líder nesta rota de produção. Normalmente, este contém absorventes sólidos, carvão ativado, peneiras moleculares, alumina, zeólita 5A e gel de sílica. As impurezas são absorvidas a baixa pressão. A etapa de separação e purificação representa 50–80% do custo total de produção, sendo utilizada por apresentar baixo custo de equipamento e poder fornecer hidrogênio de alta pureza, em torno de 99,5–99,999% [21].

Embora seja a tecnologia mais utilizada, as elevadas emissões de poluentes são o motivo para a busca de outras tecnologias e matérias-primas. Na Figura 4 , há uma visão geral de todas as cores de hidrogênio relacionadas à reforma. Uma das alternativas para reduzir o impacto ambiental é utilizar metano proveniente da digestão anaeróbica de biomassa como fonte [22] ou a reforma a vapor de metanol, etanol, ácido acético, acetona e bio-óleo, que tem se mostrado eficaz em escala laboratorial [23]. Em relação ao impacto das emissões, a captura e o armazenamento de carbono (CCAS) são uma opção viável que, atualmente, é considerada uma tecnologia madura em termos dos componentes individuais de captura. Ela tem sido implementada em grandes e médias indústrias em todo o mundo.

Mesmo que eleve o custo do hidrogênio, é considerada uma opção ótima devido à sua integração com instalações de hidrogênio já construídas [24].

No entanto, seu desenvolvimento em larga escala permanece limitado pelos altos custos de capital e operacionais, pelas penalidades energéticas e por preocupações não resolvidas em relação ao transporte de CO₂ e aos riscos de vazamento.

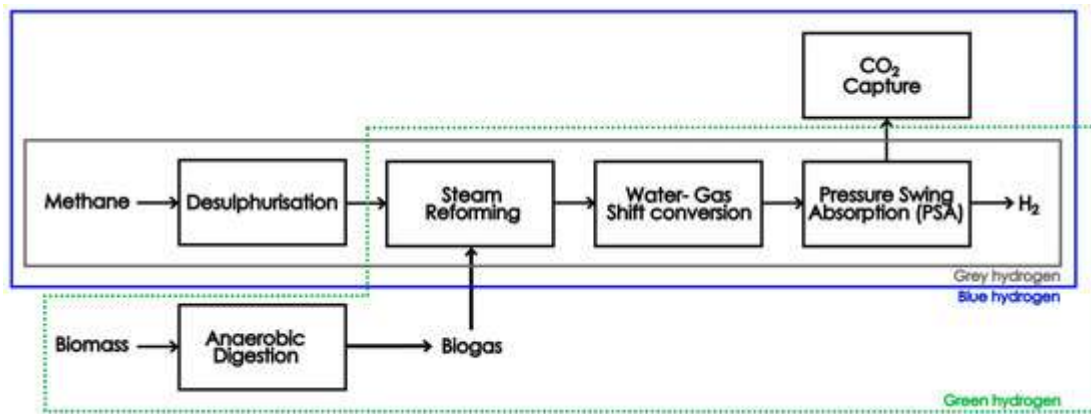


Figura 4. Diferentes vias para a reforma a vapor. A caixa tracejada não está disponível em escala industrial.

2.1.3. Gaseificação

Mais conhecido como hidrogênio marrom, é o processo de produção de hidrogênio usando gás sintetizado derivado do carvão. Em geral, o processo ocorre em altas temperaturas, 800–1300 °C, e alta pressão, 30–70 Bar. Este processo é menos eficiente do que a reforma a vapor do metano (SMR), com uma conversão de 55%, devido à menor relação H/C na matéria-prima de carvão [25].

A pirólise do carvão requer vapor e oxigênio. Estes são extraídos do ar para serem fornecidos ao gaseificador; a extração pode ser feita por separação por membrana, técnica criogênica ou absorção por oscilação de pressão.

Após a pirólise, o carvão é transformado em gás de síntese que segue para uma unidade de resfriamento. Em seguida, inicia-se a reação de deslocamento do gás de água para melhorar a produção de hidrogênio e, finalmente, o gás passa pelo processo de purificação por absorção por oscilação de pressão para garantir alta pureza [26].

Em termos de reforma a vapor do metano (SMR), esse processo pode ser integrado ao armazenamento de captura de carbono de forma mais eficiente do que a combustão direta do carvão, pois o dióxido de carbono pode ser separado em uma proporção melhor. Na Figura 5 , há uma representação do processo:

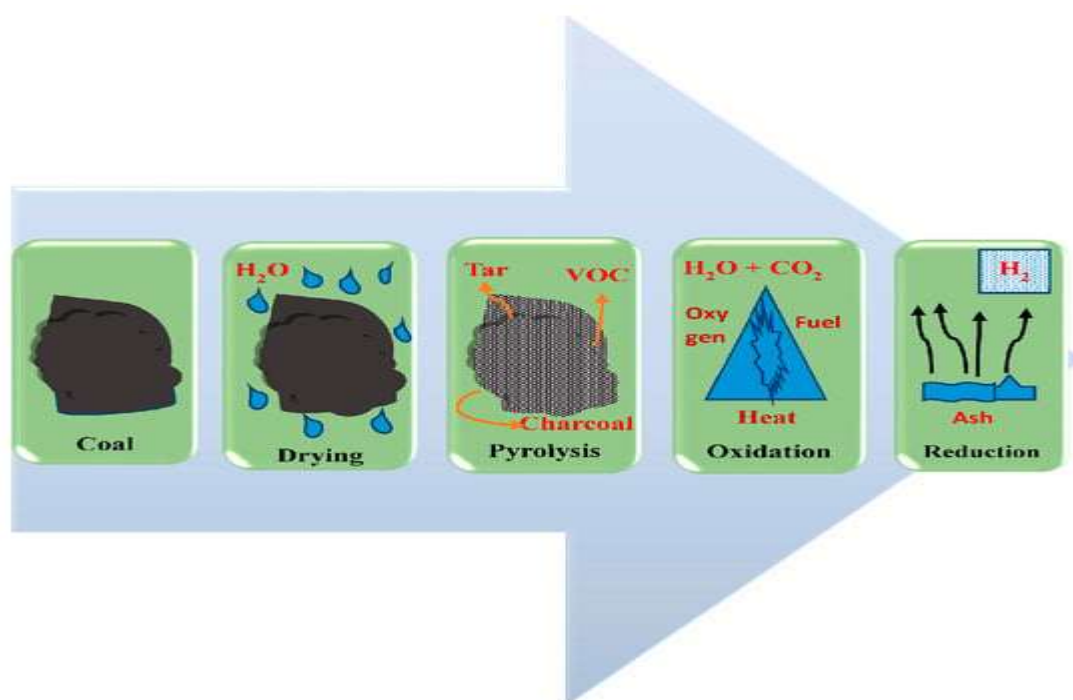


Figura 5. Processos de gaseificação de carvão para produção de hidrogênio. Reproduzido com permissão de [27].

Outra opção para a gaseificação é substituir o uso de carvão por biomassa; esses materiais, por meio de pirólise, podem ser transformados em gás de síntese e causar extração de hidrogênio, como explicado anteriormente. É uma solução sustentável para deixar de depender de combustíveis fósseis e proporcionar um tratamento adequado dos resíduos de biomassa [28].

Atualmente, as rotas termoquímicas para a produção de hidrogênio são as mais promissoras. A maturidade dos processos e a disponibilidade em larga escala industrial tornam o hidrogênio acessível. Infelizmente, a dependência de fontes de hidrocarbonetos não é sustentável a longo prazo, mas sua contribuição para a matriz energética é inegável. Por isso, é imprescindível manter a pesquisa em matérias-primas alternativas, processos de produção eficientes e captura de carbono para aprimorar a sustentabilidade desses processos.

2.2. Rotas Eletroquímicas e Biológicas

2.2.1. Eletroquímica. A eletrólise é o processo de utilização de energia elétrica para impulsionar uma reação química não espontânea. Dependendo da fonte de energia, é atribuída uma cor. A eletricidade da rede é identificada pela cor amarela, a energia nuclear pela cor rosa e, quando a fonte é energia renovável, solar ou eólica, é reconhecida como hidrogênio verde. A energia aplicada decompõe a água. Este processo compreende duas reações de meia-célula, a reação de evolução de hidrogênio (HER) que ocorre no cátodo, e a reação de redução de evolução de oxigênio (OER) que ocorre no ânodo.

Atualmente, existem quatro tipos principais de eletrolisadores: Água Alcalina (AWE), Óxido Sólido (SOE), Membrana de Troca Aniônica Alcalina (AEM) e Membrana de Troca de Prótons (PEM) [30].

2.2.2. Fermentação Escura

Este é um processo de fermentação bioquímica que ocorre na ausência de luz e oxigênio, utilizando anaeróbios estritos que produzem H_2 .

As bactérias mais comuns são do gênero *Clostridium*, mas *Enterobacter* sp. e *Bacillus* sp. também são utilizadas.

Em relação às condições de fermentação, a fonte de carbono pura, como a glicose, proporciona os melhores resultados, porém não é economicamente viável; por isso, os resíduos de biomassa são a fonte mais estudada [35].

Trata-se de um processo robusto e estável que requer o controle de variáveis como pH, temperatura, tempo de retenção e pressão para evitar a inibição bacteriana. É um processo com grande potencial [36].

Contudo, ainda se encontra em estágios iniciais de desenvolvimento e apresenta um rendimento de hidrogênio baixo e variável; economicamente, requer um alto custo de investimento no projeto do reator e no tratamento dos subprodutos e na separação dos gases [37].

2.3. Papel do catalisador na melhoria do rendimento e da seletividade do hidrogênio

A maior demanda por tecnologias limpas para produzir hidrogênio levou a uma grande expansão no desenvolvimento de catalisadores. Esses materiais ajudam o processo geral a ser mais eficiente e econômico, tendo grande influência na cinética, seletividade e estabilidade da reação [38].

Uma ampla gama de materiais tem sido estudada para aplicações em hidrogênio: materiais à base de metais nobres são usados na hidrólise de borano de amônia, metais não nobres são aplicados principalmente na reação de evolução de hidrogênio (HER), e metais e óxidos metálicos em fotocatalise e na reação de evolução de oxigênio (OER), suportes de óxido são aplicados na reforma a vapor do metano, e materiais à base de carbono são amplamente aplicados eletroquimicamente em células a combustível e estão sendo estudados como suporte para o catalisador, visando aumentar a estabilidade e a atividade [39].

Nesse contexto, o projeto avançado de catalisadores torna-se um gargalo crítico, diretamente ligado à relevância dos materiais à base de biochar discutidos nesta revisão. O biochar oferece um caminho potencial para reduzir a carga de metais nobres, melhorar a dispersão do catalisador e aumentar a durabilidade, ao mesmo tempo que aborda as questões de escassez de materiais associadas às tecnologias de hidrogênio verde.

Em última análise, o projeto de catalisadores torna-se uma abordagem estratégica para superar as principais barreiras econômicas e relacionadas a materiais na produção sustentável de hidrogênio.

2.4. Desafios ambientais e econômicos dos métodos convencionais

Embora se afirme que o hidrogênio é um vetor energético limpo, é importante ressaltar que a maior parte da produção global atual ainda provém das rotas de hidrogênio cinza e marrom. Essas rotas predominam principalmente por serem tecnologias maduras que permitem o menor custo do mercado, conferindo uma grande vantagem em relação a outras rotas de produção. No entanto, a pegada de carbono é alta, a matéria-prima depende do gás natural e as emissões são estimadas em 9–12 kg de CO₂ por quilograma de hidrogênio produzido.

Como mencionado anteriormente, o hidrogênio azul é a alternativa para reduzir essas emissões; infelizmente, trata-se de um processo com alto consumo energético, que deve aumentar entre 10 e 20%, o que, dependendo da fonte, pode ampliar a pegada de carbono geral do processo.

Além disso, o projeto e a integração aumentam os custos fixos e operacionais, representando um desafio [40].

Por outro lado, o hidrogênio verde oferece a menor pegada ambiental, com uma matéria-prima limpa, tendo apenas oxigênio como subproduto e, mesmo sendo um processo de alta energia. Esta provém de fontes de energia renováveis. A principal limitação continua sendo o alto custo de capital da construção devido ao consumo de metais raros [41].

3. Catalisadores para a Produção de Hidrogênio

Para implementar uma pesquisa em energia sustentável, a tecnologia de catalisadores é um ponto crucial.

O aprimoramento dessas moléculas permitirá que as tecnologias de hidrogênio se tornem acessíveis e escaláveis, alcançando o resultado ambiental desejado. As tendências mais recentes são aplicadas à produção inovadora de hidrogênio que envolve a eletrólise da água; nanomateriais têm demonstrado alto desempenho em termos de atividade e estabilidade. Óxidos metálicos e catalisadores à base de carbono são utilizados devido às dificuldades econômicas e de disponibilidade que os metais nobres podem apresentar. Como apontam Kumar et al., inovações foram feitas, como catalisadores de átomo único, catalisadores bimetálicos, nanoestruturas e MOFs; no entanto, desafios relacionados à síntese complexa e à corrosão persistem [42].

3.1. Catalisadores à base de metal

Metais de transição raros, como Pt, Pd, Ru, Rh, Ir e Au, são catalisadores de destaque devido à sua estrutura eletrônica. Entre suas vantagens estão a redução de reações secundárias, a alta resistência à oxidação e a capacidade de operar em condições adversas.

Uma das principais desvantagens é a baixa disponibilidade e o alto custo, o que torna imprescindível maximizar a atividade catalítica por unidade de massa.

Neste contexto, uma das estratégias para atingir este objetivo é manipular o tamanho dos metais. Em termos de redução do tamanho das partículas, os níveis de energia são modificados, influenciando diretamente o desempenho catalítico e a interação com os seus suportes, como mostrado na Figura 6.

Portanto, os catalisadores de átomo único de metal nobre (SACs) têm atraído atenção no desenvolvimento destes materiais, melhorando a densidade de sítios ativos, minimizando o uso de metal e oferecendo oportunidades para aumentar a atividade com os suportes [43].

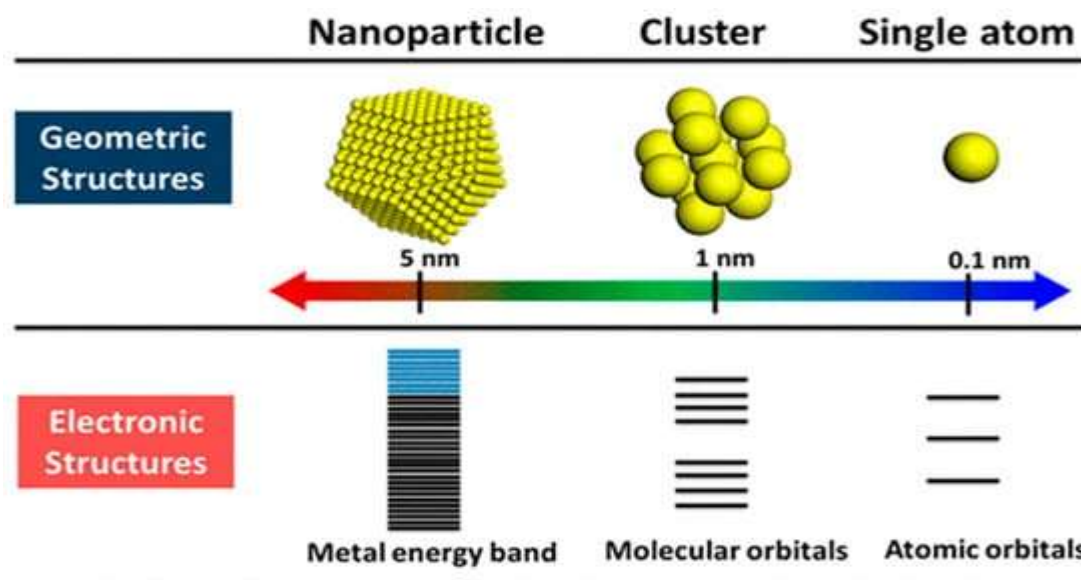


Figura 6. Estruturas geométricas e eletrônicas de átomos individuais, clusters e nanopartículas. Reproduzido com permissão de [43].

Por exemplo, átomos individuais de Pt e nanoclusters suportados em estruturas de carbono dopadas com N demonstraram sobrepotenciais substancialmente reduzidos em comparação com catalisadores comerciais de Pt/C [44].

Apesar desses avanços, os sistemas de metais nobres permanecem economicamente restritivos e frequentemente dependem de rotas de síntese complexas. Como resultado, metais não nobres, como Ni, Co, Fe, Mg, Ca, Al e outros metais de transição, estão sendo cada vez mais explorados. Eles possuem propriedades semelhantes às dos metais nobres em sua configuração eletrônica única, que permite a formação de produtos intermediários.

Consequentemente, são bons catalisadores, porém mais abundantes e com custo reduzido. Em termos de eletrólise, observa-se uma tendência no desenvolvimento de fosfetos [45], sulfetos [46] e dicalcogenetos [47] de metais de transição. As abordagens propostas envolvem atividade e estabilidade sob corrente industrial, melhorando a capacidade de transporte de elétrons e, além disso, alcançando uma adsorção de hidrogênio otimizada por meio do ajuste da estrutura eletrônica com engenharia de defeitos, dopagem com heteroátomos, heteroestruturas e engenharia de deformação.

Por exemplo, Gao et al. revisaram a interação de catalisadores de átomo único de metais não nobres suportados em carbono.

Eles descobriram que, apesar das grandes conquistas ao longo dos anos, essa tecnologia é limitada devido à aglomeração do metal, às mudanças na estrutura na presença de um eletrólito e às rotas de produção tóxicas [48]. Essas limitações ressaltam a importância de materiais de suporte que possam melhorar a dispersão do metal, mitigar a desativação e melhorar o transporte de elétrons.

3.2. Catalisadores de Óxido Metálico

Este é um amplo grupo de catalisadores que envolve óxidos simples e complexos. Entre eles, encontram-se sílica, alumina, zeólitas, polioxometalatos (POMs), fosfatos, perovskitas e hexa-aluminatos. Em geral, eles apresentam diferentes tipos de defeitos e vacâncias que são essenciais para a catálise.

Para a produção de hidrogênio, os óxidos metálicos são utilizados principalmente em eletrólise e fotoeletrolise devido às propriedades semicondutoras que exibem [42]. Hidayatullah et al. fornecem uma revisão abrangente dos óxidos simples (por exemplo, TiO_2 , MnO_2 e Al_2O_3) utilizados na fotólise da água (PEC); esta é uma tecnologia promissora devido ao baixo custo, à não toxicidade e à geração de pares elétron-lacuna para aumentar a produção de hidrogênio. Para superar as limitações, como a absorção de luz e a rápida recombinação de elétrons, a engenharia morfológica, a dopagem e o projeto de heteroestruturas foram estudados [49], como pode ser mostrado na Figura 7 .

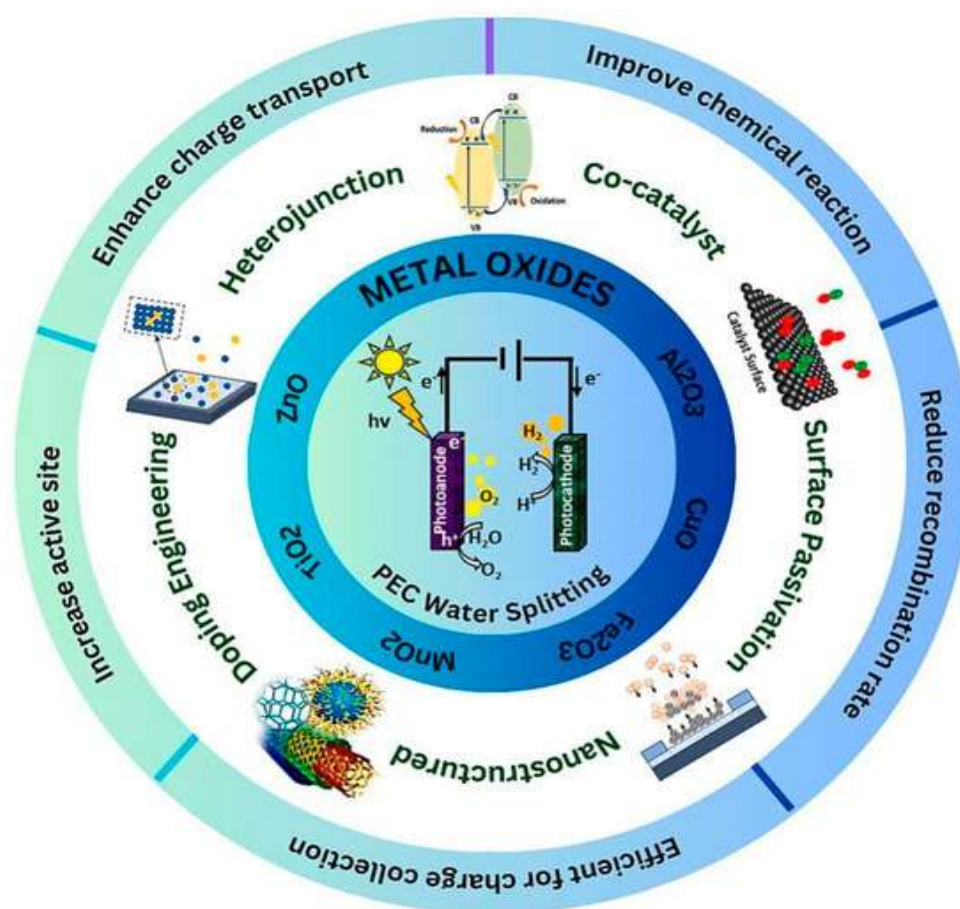


Figura 7. Papel dos óxidos metálicos e modificações para seu uso em sistemas de divisão fotoeletroquímica da água. Reproduzido com permissão de [49].

Por exemplo, a perovskita é um material atraente para aplicações de hidrogênio. A principal característica é o controle sobre as posições das bordas de banda e os mecanismos catalíticos em nível atômico, que estão associados a uma melhoria na reação de OER [50].

Ameen et al. enfatizam que os polioxometalatos têm o potencial de desempenhar um papel fundamental nas otimizações de sua tecnologia de hidrogênio, mas é importante superar limitações como grandes gaps de banda e baixa mobilidade de carga, além do fato de apresentarem instabilidade sob certas condições [51].

Essas limitações ressaltam a importância de materiais de suporte que possam melhorar a dispersão do metal, mitigar a desativação e aprimorar o transporte de elétrons.

3.3. Catalisadores à base de carbono

Os materiais à base de carbono ganharam reconhecimento devido à sua elevada área de superfície, condutividade térmica melhorada e propriedades elétricas, mecânicas e ópticas [52].

Estas características tornam-nos interessantes para serem estudados como materiais de suporte de estrutura e co-catalisadores em nanopartículas de metal ou óxido de metal [53].

O grafeno é um alótropo de carbono organizado em forma hexagonal, como mostrado na Figura 8.

Possui diversos derivados, como GO, rGO, GNR, GONRs e fluorografeno, entre outros; estes exibem boas propriedades eletrônicas, como alta mobilidade eletrônica, condutividade térmica e condutividade elétrica [54].

Por exemplo, camadas finas de óxido de grafeno reduzido (rGO) proporcionaram alta condutividade e transferência de elétrons mais rápida, evitaram sítios de corrosão e, mais importante, facilitaram a adsorção/desorção de hidrogênio em um catalisador W/WO₂-rGO/NF. Isso levou à redução da sobretensão, exibindo melhor desempenho e resistência do que Pt na evolução de hidrogênio (HER) [55].

Outra abordagem com uma configuração de eletrocatalisador de nanoesferas de carbono com fosfeto de níquel e cobalto sobre substrato de grafeno codopado com N e S foi adotada por Zhang et al. Eles descobriram que o material ativo usava toda a estrutura de carbono como um suporte, melhorando o desempenho, exigindo apenas 144 mV como sobrepotencial, enquanto tinha uma densidade de corrente maior [56].

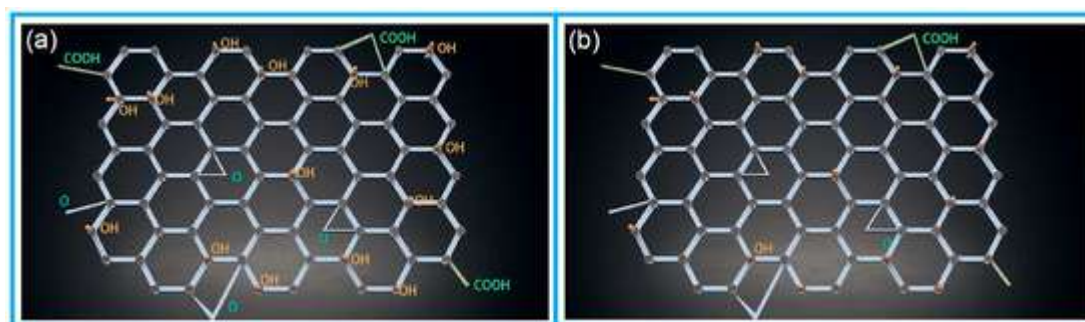


Figura 8. Esquema típico das estruturas moleculares de (a) GO e (b) rGO. Reproduzido com permissão de [54].

Os nanotubos de carbono podem ser explicados como uma folha de grafeno enrolada. Sua classificação baseia-se na forma física, como comprimento (longo ou curto), no número de camadas em sua superfície ou na configuração cristalográfica desenvolvida.

Estruturas catalíticas baseadas em nanotubos de carbono podem proporcionar uma melhoria na difusão de massa e no transporte de elétrons; essas propriedades foram utilizadas para desenvolver catalisadores bifuncionais para reações de HER/OER em meio alcalino. Xue et al. descobriram que os CNTs aumentaram o número de sítios ativos expostos e proporcionaram uma estabilidade de longo prazo de 350 h para o catalisador NiSe@CNTs, resultando em um desempenho excepcional para ambas as reações [57]. Resultados semelhantes foram publicados por Cai et al. para Co₂P/Co₄N encapsulado por CNTs. Os nanocompósitos apresentaram melhor resistência à corrosão eletroquímica [58].

Por outro lado, o nitreto de carbono na forma alotrópica de gC₃N₄ é um material estável, de baixo custo e alta disponibilidade. Recentemente, ganhou popularidade como catalisador devido à sua banda proibida ajustável (2,7 eV), útil para aplicações fotoquímicas [59]. No entanto, apresenta limitações como baixa área superficial, rápida recombinação de elétrons e custos elevados quando produzido em larga escala. Wei et al. abordaram essas dificuldades dopando nanofolhas de gC₃N₄ com potássio; o catalisador obtido, AKCN, apresentou melhor mobilidade e utilização da luz, além de maior área superficial e banda proibida mais estreita, conforme ilustrado na Figura 9.

Todos esses fatores levaram a um aumento na produção de hidrogênio para $575 \mu\text{mol h}^{-1} \text{g}^{-1}$ [60] .

Em relação aos altos custos em larga escala, Wang et al. propuseram um método de transbordamento bem-sucedido para evitar aglomeração severa e conferir ao gC_3N_4 um formato de folha . Isso melhorou o desempenho na produção de hidrogênio para $1672 \mu\text{mol h}^{-1} \text{g}^{-1}$, fornecendo novas informações sobre a escalabilidade de materiais de nitreto de carbono [61] .

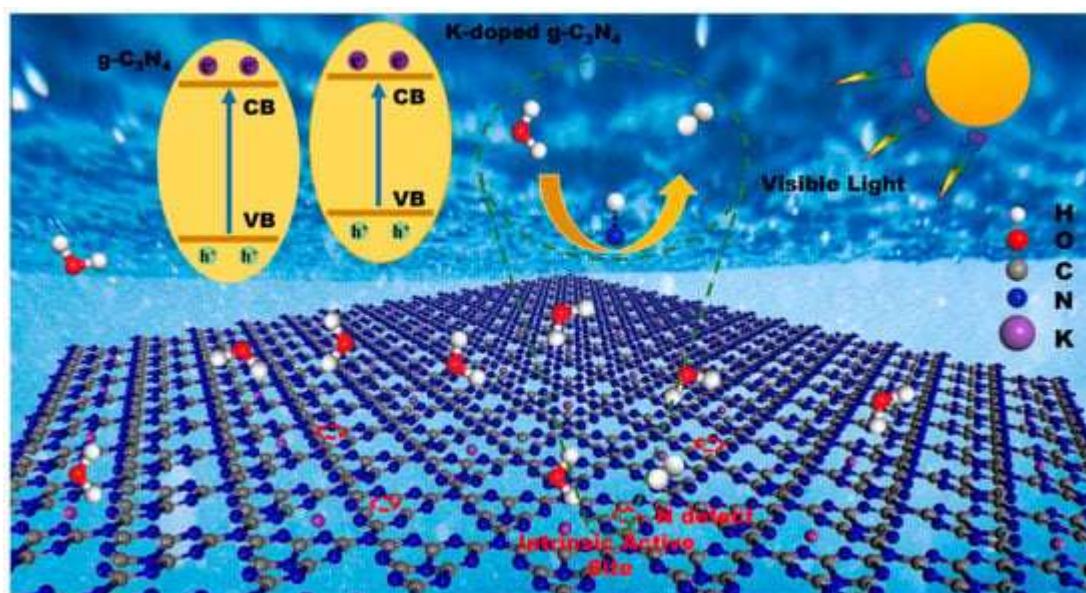


Figura 9. Mecanismo fotocatalítico esquemático para o AKCN sob irradiação de luz visível. Reproduzido com permissão de [60] .

Finalmente, o biochar é um material que tem demonstrado boas propriedades para aplicação em sistemas catalíticos e tem sido testado para aplicações em hidrogênio. Em comparação com os alótropos de carbono mencionados, características como maior área superficial, condutividade, materiais inorgânicos e uma estrutura que possui grupos funcionais e estrutura de carbono aromático o tornam digno de pesquisa [62] .

Essa estrutura de carbono tem se mostrado um catalisador eficaz em diversas vias de produção de hidrogênio; sua pesquisa tem utilizado biochar simples, dopagem com diversos metais e heterojunções. As principais vias de hidrogênio são a fermentação escura [63], a eletrólise da água [64], a fotocatalise [65] e a pirólise do metano [66]. Ao longo dos últimos anos, o uso de biochar demonstrou um aumento na produção de hidrogênio, na estabilidade do catalisador e em materiais com custo competitivo para a produção de energia sustentável.

4. Biochar: Características, Preparação e Funcionalização

A definição formal de biochar dada pela International Biochar Initiative (IBI) é “um material sólido obtido a partir da conversão termoquímica da biomassa em um ambiente com oxigênio limitado” [67]. Expandindo sua estrutura e composição, temos um material orgânico rico em carbono e contendo outros elementos como hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e elementos inorgânicos (P, Ca, Al, K e Si). Esses elementos estão organizados aleatoriamente em grupos de estruturas alquílicas e aromáticas, criando uma fase amorfa e cristalina na forma de folhas poliaromáticas condensadas.

A produção de biochar é definida por dois fatores principais: a biomassa utilizada como matéria-prima e as condições termoquímicas. A seleção dessas duas variáveis terá um grande impacto na qualidade e no desempenho do biochar.

Primeiramente, a matéria-prima é escolhida dentre diversas fontes de biomassa, como resíduos agrícolas e florestais, resíduos animais, lodo de esgoto e resíduos sólidos urbanos.

Considerando seu potencial para a produção de biochar, é importante compreender a composição de cada tipo de matéria-prima. Na caracterização química dos resíduos agrícolas e florestais, os principais componentes são celulose, hemicelulose e lignina, responsáveis por fornecer o carbono abundante no biochar.

Por outro lado, as demais fontes de biomassa têm sua fonte de carbono proveniente de proteínas. Todas as fontes podem conter lipídios e substâncias inorgânicas que contribuem para as características finais do biochar [68].

Agora, para a conversão termoquímica da biomassa, toda a matéria-prima tem grande influência em seu comportamento.

A cinética e a conversão desses componentes em biochar têm sido estudadas ao longo dos anos para compreender e desenvolver essas tecnologias; a Figura 10 mostra as reações em torno dessa transformação.

A pirólise convencional via aquecimento elétrico em taxas lenta, rápida e instantânea tem sido usada por muitos anos para produzir biochar, bio-óleo e gás de pirólise; no entanto, novas tecnologias têm sido propostas para melhorar as características físicas do biochar, como a área superficial, os grupos funcionais e o teor de carbono.

Entre essas tecnologias estão a pirólise assistida por micro-ondas, a pirólise assistida por vapor e a pirólise assistida por energia solar, a pirólise úmida, a copirólise e a pirólise catalítica, que alcançaram poros mais profundos e estreitos, aumentando a área superficial e os grupos funcionais na superfície do biochar [69 , 70].

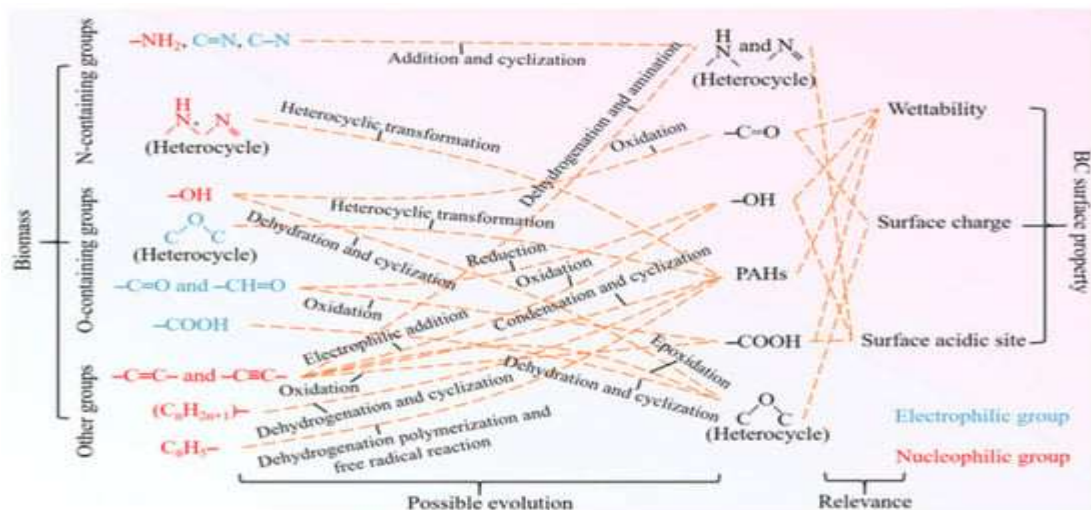


Figura 10. Visão geral das reações no biochar e seus resultados em suas características [71].

4.1. Influência da matéria-prima e das condições de pirólise nas propriedades físico-químicas e características estruturais

4.1.1. Análise Elementar e Teor de Cinzas

As altas temperaturas na pirólise causam a degradação do material orgânico.

Observou-se que temperaturas mais elevadas favorecem a desidratação e a desoxigenação, intensificando a eliminação de oxigênio e hidrogênio, o que leva ao acúmulo de carbono e à formação de uma estrutura aromática.

A redução nas razões O/C, H/C e N/C indica uma redução nos grupos funcionais da superfície, diminuindo a reatividade do biochar [72].

Esse aumento na estrutura aromática melhora as características hidrofóbicas, visto que os grupos aromáticos são apolares e há uma carência de grupos superficiais que atraiam água. No entanto, Mao et al. descobriram que o teor total de carbono orgânico não era o principal fator que contribuía para a hidrofobicidade do biochar; esta estava significativamente correlacionada aos grupos carboxílicos e às características da superfície do biochar, que dependiam principalmente da temperatura [73].

A influência da matéria-prima pode ser refletida no teor de nitrogênio; uma alta relação C/N na biomassa leva a uma alta relação C/N no biochar. Além disso, tem influência direta no teor de cinzas. Observou-se que, para o biochar florestal, o teor de cinzas é baixo em comparação com resíduos agrícolas e biomassa de esterco devido à ausência desses átomos na composição original.

4.1.2. Grupos Funcionais de Superfície

Observou-se que, entre 350–650 °C, formam-se grupos funcionais de superfície como carboxila, lactona, lactol, quinina, cromeno, anidrido, éter, pirona, piridina e piriol. A 300 °C, as diferenças entre os grupos de superfície no biochar são altamente distintas, mas, com o aumento da temperatura, o número de grupos ácidos é reduzido e há um aumento nos grupos funcionais básicos [75].

Para a matéria-prima, o biochar derivado de resíduos florestais e agrícolas apresenta um comportamento de diminuição dos grupos funcionais superficiais com o aumento da temperatura. No entanto, matérias-primas com maior teor de lignina têm a capacidade de reter mais grupos funcionais a uma temperatura moderada (500 °C) do que a uma temperatura mais elevada, onde a maioria dos grupos é perdida [76]. O efeito da temperatura e da matéria-prima agrícola foi demonstrado por Muzyka et al. Na Figura 11 , encontra-se a Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) para biomassa de palha de trigo bruta e biochar obtido a 500 e 700 °C. Nos números de onda (1400–1500 cm^{-1}) correspondentes aos grupos CH_2 e CH_3 , e nos números de onda (3200–3700 cm^{-1}) correspondentes aos grupos hidroxila ligados por pontes de hidrogênio, observou-se uma queda significativa com o aumento da temperatura para 700 °C. Entretanto, um aumento nas estruturas aromáticas (1580 cm^{-1}) foi observado com o aumento da temperatura [77].

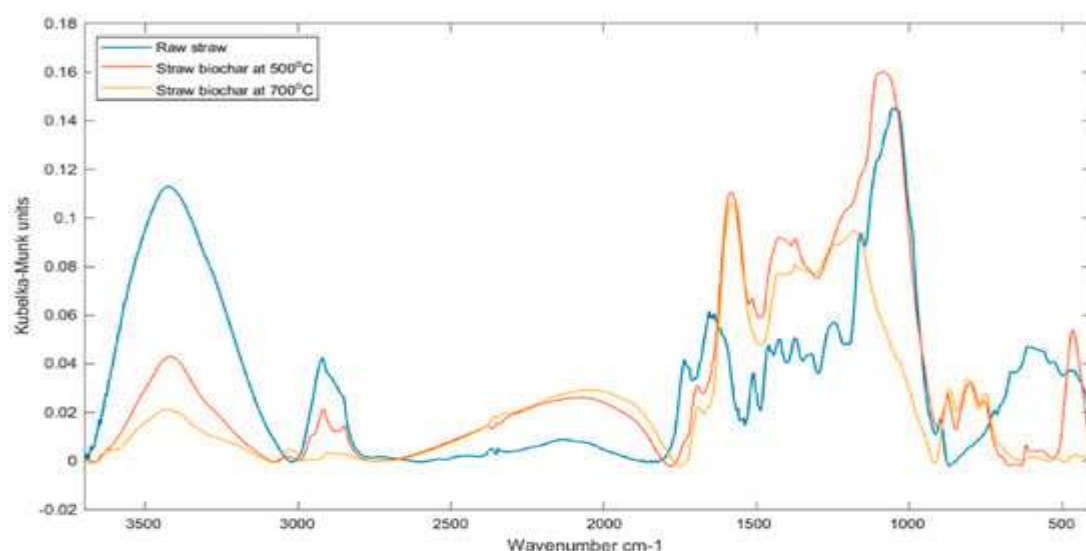


Figura 11. Bandas de adsorção para biomassa de palha de trigo bruta e biochar de pirólise a 500 e 700 °C. Reproduzido com permissão de [77].

4.1.3. Distribuição da área superficial e do tamanho dos poros

Em geral, a área superficial específica do biochar aumenta com a temperatura; isso foi observado em diversos estudos. Esse efeito é atribuído à decomposição térmica dos componentes orgânicos, como refletido na Figura 2 , onde a estrutura de carbono é ampliada sem obstruções. Um tempo de residência mais curto e uma temperatura elevada liberam uma grande quantidade de matéria orgânica dos poros formados; isso resulta no desenvolvimento e expansão de estruturas de poros menores, aumentando a área superficial geral [78]. A estrutura porosa do biochar apresenta três distribuições principais: microporos, que são espaços de aprisionamento para substâncias adsorvidas; mesoporos, que também atuam como espaços de aprisionamento; e macroporos, que permitem a difusão de substâncias. A formação dos poros é fortemente influenciada pelas condições de pirólise; uma taxa de aquecimento rápida promove a evaporação e o rápido movimento de macromoléculas, deixando espaços para microporos e mesoporos mais profundos [71].

Jalali et al. e Ferraro et al. estudaram as propriedades de diversas matérias-primas de biomassa e descobriram que o biochar derivado de esterco e lodos é produzido com uma área superficial menor e uma estrutura porosa pouco definida [79], devido a fenômenos como deformação, fissuração estrutural, bloqueio de microporos e falta de lignina.

Que está associada ao aumento da área superficial e da porosidade [78]. Isso explica por que o biochar de cascas de nozes e de madeira macia e dura é geralmente a biomassa mais popular para avaliar suas propriedades e uso.

Além disso, uma das principais conclusões é que a matéria-prima de madeira leva a uma alta área superficial e volume de poros, devido ao processo de volatilização de gás/água e à perda de compostos micromoleculares que geram vazios na matriz do biochar.

4.2. Modificação de superfície e deposição de metais em biochar

O biochar é um adsorvente; suas principais características, como grupos funcionais de superfície, área superficial e volume de poros, o tornam um bom candidato para tratamento de água, catálise e armazenamento de energia, entre outros. O controle de variáveis tradicionais não é muito eficaz e diferentes modificações no biochar têm sido estudadas. A ativação e a modificação da superfície do biochar são técnicas que visam ajustar certas propriedades físico-químicas do biochar para aumentar sua atividade. No entanto, existe uma relação inversa entre a área superficial e o volume de poros com o aumento das novas atividades do biochar modificado [80].

A ativação física do biochar é um processo que utiliza vapor ou dióxido de carbono em altas temperaturas. Os resultados gerais são uma elevada área superficial devido ao desenvolvimento de poros.

Bélanger et al. usaram esta técnica para avaliar a influência da ativação física no biochar à base de amido como enchimento em borracha. Eles descobriram que a ativação teve um grande impacto nas propriedades físico-químicas do biochar: a porosidade, o teor de carbono e o teor de cinzas.

A ativação com vapor produziu biochar com menor teor de carbono e maior teor de oxigênio do que os outros métodos, e a ativação com dióxido de carbono pode produzir biochar com maior teor de cinzas [81].

A ativação química é um processo que influencia diretamente a área superficial e a estrutura dos poros do biochar final. As substâncias utilizadas para realizar essa ativação são tipicamente ácidos, bases fortes e cloretos; no entanto, o KOH tem demonstrado ótimo desempenho em comparação com outras substâncias e métodos. Sun et al. estudaram os efeitos da matéria-prima e da ativação no desempenho de supercapacitores. Neste estudo, foram utilizadas diferentes matérias-primas com alto teor de lignocelulose e métodos de ativação (vapor, dióxido de carbono e KOH). Eles encontraram um aumento significativo na área superficial BET das amostras de biochar, sendo o KOH aquele que apresentou um aumento de área superficial superior a 85% em comparação com o biochar original. Isso resultou em um melhor desempenho na dupla camada e no desempenho pseudocapacitivo, reforçando a capacidade deste material sustentável [82]. Alcazar-Ruiz et al. avaliaram vapor, dióxido de carbono, KOH e H_3PO_4 com o objetivo de aumentar a captura por adsorção de CO_2 ; os resultados mostraram que o biochar de azeitona ativado com KOH tem um melhor desenvolvimento de microporos em baixas concentrações, permitindo que um maior volume de gás seja retido [83].

A dopagem é uma estratégia para carregar outros grupos funcionais no biochar. Dependendo dos átomos que se deseja carregar na superfície, a dopagem pode ocorrer em três cenários: dopagem com heteroátomos, dopagem com heteroátomos e metais e dopagem com átomos metálicos.

Na dopagem com heteroátomos, o estudo tem se concentrado na adição de átomos de nitrogênio, enxofre, fósforo e boro; esses átomos têm a capacidade de formar ligações estáveis, aumentar a condutividade, induzir sítios de defeito e aumentar a taxa de elétrons, tornando-os candidatos ideais para catalisadores sustentáveis [84]. Thanh Thuy et al. utilizaram biochar modificado com fósforo para a oxidação do álcool vanílico a vanilina; o catalisador apresentou um desempenho impressionante em comparação com outros catalisadores, atingindo conversão, rendimento e seletividade próximos a 100%, um fenômeno observado apenas em catalisadores metálicos. Os autores descobriram que a dopagem conferiu ao biochar grupos funcionais de fósforo, porosidade e alterações na estrutura eletrônica do catalisador, mostrando as vantagens deste material [85].

A incorporação de metais em biochar é uma técnica que vem ganhando popularidade no campo da adsorção e catálise. Os metais utilizam grupos funcionais de oxigênio para penetrar na superfície do biochar, criando um ponto de estabilidade; além disso, os metais podem modificar a eletronegatividade, criar propriedades redox únicas e aumentar a estabilidade em soluções ácidas ou básicas.

Gu et al. recriaram a estrutura porosa da hortênsia (flor) em um biochar dopado com MgO para a captura de metais pesados. A área superficial foi 2,27 vezes maior que a do biochar original; como resultado, o biochar modificado reduziu em quase 50% a concentração de Cd e Pb no solo. Esse desempenho é atribuído aos grupos funcionais (C=O) e (Mg-O), juntamente com um aumento na atração de elétrons [86].

A otimização do biochar como catalisador é um dos principais focos de pesquisa; a versatilidade do biochar bruto permite seu emprego em diversas reações, com modificações específicas pensadas para cada reagente. Na literatura, o biochar tem demonstrado ser um excelente material para alcançar fortes interações com metais.

Atualmente, o campo da catálise depende de biochar projetado e altamente funcional, com ativações de superfície específicas e o design de sítios ativos utilizando diferentes metais para aprimorar o desempenho catalítico, reduzir custos e o impacto ambiental, visando, finalmente, a sustentabilidade e a química verde desejada.

5. Catalisadores à base de biochar na produção de hidrogênio

5.1. Funções do Biochar em Sistemas de Produção de Hidrogênio

Atualmente, a pesquisa tem se concentrado no desenvolvimento de catalisadores e suportes catalíticos que ofereçam alta condutividade eletrônica, resistência à corrosão e uma grande área superficial para a realização da reação.

O biochar tem demonstrado potencializar a produção de hidrogênio por meio de múltiplas vias. No entanto, sua contribuição não é universal e depende fortemente da função que desempenha em um determinado sistema. Isso é ilustrado na Figura 12, que apresenta a correlação entre todos os fatores que influenciam a síntese do biochar e seu uso final.



Figura 12. Rotas de produção e modificação de biochar para aplicação de catalisador em hidrogênio. Reproduzido com permissão de [14].

5.1.1. Biochar como um verdadeiro catalisador

O biochar exibe atividade catalítica intrínseca sem a presença de fases ativas metálicas, de óxido metálico ou não metálicas. Nesses casos, a formação de hidrogênio ocorre diretamente na superfície do biochar e é atribuída aos grupos funcionais de oxigênio na superfície.

Que promovem as reações envolvidas. Para a reforma a vapor de ácido acético, etanol e acetona, o biochar apresentou alta atividade em espécies C=C e COC utilizando grupos contendo oxigênio, promovendo as reações de desoxigenação e desidrogenação [87].

Eom et al. comprovaram a atividade catalítica do biochar sem dopagem; eles utilizaram pellets de madeira de biochar em gás liquefeito de petróleo (GLP). Como resultado, a concentração de hidrogênio aumentou com a presença de biochar e a vazão de gás. Devido à atividade catalítica, o biochar experimentou alterações em seus grupos funcionais de oxigênio na superfície, participando ativamente da reação, embora tenha demonstrado um desempenho estável ao longo do tempo em comparação com outros catalisadores à base de carbono [88].

Apesar dessas observações, o biochar atuando como catalisador único geralmente apresenta atividade inferior à do biochar impregnado e permanece altamente específico para determinada via catalítica. Observou-se que os grupos funcionais da superfície são progressivamente perdidos sob operação em alta temperatura, levando a uma desativação mais rápida, o que limita a aplicação do biochar puro na catálise de hidrogênio.

5.1.2. Biochar como suporte catalítico

Como catalisador de suporte, o biochar demonstrou características de estabilização e dispersão de nanopartículas, sendo eletricamente condutor [89].

A dopagem com heteroátomos de nitrogênio aumenta a condutividade elétrica e a hidrofiliabilidade, facilitando as cargas eletrônicas e, conseqüentemente, a produção de hidrogênio [90]. Além dessas vantagens, o biochar utiliza os grupos funcionais de oxigênio e os átomos de nitrogênio para induzir sítios ativos para as reações.

Ademais, a alta organização da matriz do biochar promove espaço suficiente para a dopagem com metais e facilita a transferência de massa ao longo da superfície [89]. Contudo, a dopagem excessiva ou a carga metálica podem levar ao bloqueio dos poros e à perda da integridade estrutural. Isso ressalta a importância da otimização das estratégias de carregamento e da modificação, em vez da busca pela incorporação máxima.

5.1.3. Biochar como adsorvente e meio de adsorção aprimorada

O biochar oferece uma vantagem indireta para a produção de hidrogênio por meio de suas propriedades adsorptivas. Em alguns estudos, comprovou-se que, em sistemas termoquímicos, o biochar pode adsorver intermediários, compostos de alcatrão, dióxido de carbono e espécies de carbono sólido. Eom et al. descobriram que, além de sua atividade catalítica, o biochar tinha a capacidade de absorver cerca de 35–60% do carbono produzido no gás liquefeito de petróleo (GLP). Isso propõe uma solução para o principal problema do hidrogênio de origem turquesa, que é o gerenciamento de resíduos sólidos de carbono [88].

Essa multifuncionalidade é vantajosa, mas introduz outros desafios relacionados à saturação do adsorvente, regeneração e estabilidade estrutural a longo prazo, podendo acelerar a desativação do catalisador pelo bloqueio de sítios ativos. Em conclusão, embora a adsorção aumente o rendimento de hidrogênio a curto prazo, ela acarreta sistemas de desativação, portanto, deve ser considerada um papel secundário, de suporte, e não catalítico.

5.1.4. Biochar como transportador de elétrons e mediador redox

O papel do biochar como suporte tem sido estudado para a fotocatalise. Foi comprovado que o biochar pode aumentar a produção fotocatalítica e funciona principalmente como um transportador de elétrons ou mediador redox, dadas as suas propriedades eletroquímicas. Ele tem a função de receber os fotoelétrons gerados e inibir a recombinação rápida; isso leva a uma ampla faixa de absorção de luz e à redução do gap de energia, resultando em uma melhor produção de hidrogênio [91]. Essa função depende fortemente da condutividade do biochar, do grau de grafitização e do pré-tratamento. O biochar em si não é o sítio ativo primário para a evolução de hidrogênio, mas atua como uma ponte condutora que melhora o desempenho dos materiais catalíticos acoplados.

5.1.5. Biochar como mediador microbiano e redox em sistemas biológicos

Particularmente na fermentação escura, o biochar funciona como um mediador microbiano e redox, em vez de um catalisador químico. O biochar aumenta o rendimento de hidrogênio por meio das condições de crescimento microbiano, tamponando o pH e facilitando a taxa metabólica do hidrogênio. Bu et al. descobriram que o biochar promoveu a colonização seletiva de bactérias funcionais e melhorou a eficiência da transferência de elétrons do sistema de fermentação [92]. Resultados semelhantes foram encontrados por Yang et al., onde o biochar modificado com Fe aumentou a abundância do microrganismo alvo e reforçou a atividade de enzimas-chave no processo de produção de hidrogênio [93].

No entanto, é importante reforçar que o biochar depende do sistema e que a produção de hidrogênio é influenciada principalmente por processos biológicos, e não por reações catalíticas de superfície.

Uma classificação das funções que o biochar pode desempenhar na produção de hidrogênio e destaca a forte dependência dessas funções em relação aos requisitos específicos de cada via reacional. Fica evidente que o biochar não exibe um comportamento catalítico universal, mas contribui por meio de diferentes mecanismos, dependendo do ambiente reacional e da rota de produção de hidrogênio.

Embora exista atividade catalítica intrínseca em reações específicas, o valor do biochar reside em sua multifuncionalidade. Compreender essas funções é fundamental para o projeto racional de catalisadores, a reprodutibilidade e a escalabilidade.

5.2. Efeitos sinérgicos com nanopartículas metálicas. Dada a estrutura do biochar, este tem influência direta na estrutura eletrônica e no desempenho catalítico das nanopartículas dopadas que se encontram na superfície do catalisador final. Além de servir como suporte físico, o biochar participa ativamente nas interações metal-suporte, oferecendo uma forte capacidade e atividade antioxidante; este efeito é alcançado através do estado de redução do metal, formando uma camada de metal oxidado na superfície, mantendo o catalisador ativo por mais tempo, aumentando sua vida útil e atividade [94].

Foi demonstrado que a dopagem com um único metal no biochar modifica significativamente a matriz porosa, onde elementos como Ni, Fe e Zn são ancorados e incorporados na estrutura de carbono, aumentando os mesoporos, o que leva a um aumento geral na área superficial, criando mais pontos ativos nas reações.

Em contraste, um metal alcalino como o Ca foi relatado como redutor da quantidade de volumes de mesoporos e macroporos, causando uma diminuição nos sítios ativos para o desempenho [95 , 96].

Para catalisadores bimetálicos, os efeitos sinérgicos podem surgir não apenas das interações metal-metal, mas também de sua incorporação sequencial na matriz de biochar; Liu et al. descobriram que a ordem de dopagem altera a atividade catalítica do composto geral.

A adição inicial de Fe aumenta as estruturas mesoporosas no biochar, enquanto a adição de K promove um maior grau de grafitação no biochar, aumentando as interações π - π . Sua interação promoveu vacâncias de oxigênio que podem adsorver grupos OH, aumentando a atividade do catalisador [97]. Outro efeito foi relatado por Di Stasi et al.: a adição de Co no catalisador Ni-biochar leva a novos sítios básicos fortes, uma característica que reduz a probabilidade de envenenamento por deposição de coque na superfície [98].

Átomos não metálicos desempenham um papel fundamental na interação entre o biochar e os átomos metálicos, influenciando os ambientes de coordenação, a condutividade eletrônica e a estabilidade dos sítios ativos.

Ying et al. observaram que a abundância de heteroátomos de nitrogênio e fósforo na superfície do biochar favorece a ligação de íons metálicos e carbono para formar compostos metálicos. Da mesma forma, a introdução de átomos de ferro fortaleceu a ligação entre o níquel e o fósforo. Essa forte interação leva a um aumento na condutividade elétrica, nos grupos ativos e na permeação de eletrólitos na reação de evolução de oxigênio (OER) [99]. Apesar desses benefícios, também foi constatado que uma quantidade excessiva de metal ou heteroátomo pode causar o bloqueio dos poros, levando a uma desativação mais rápida [66].

O desempenho catalítico do biochar modificado é um delicado equilíbrio entre a arquitetura dos poros, a estrutura eletrônica e as interações metal-suporte. Embora o biochar ofereça uma combinação de atividade catalítica e funcionalidade de suporte em diversas vias de produção de hidrogênio, um projeto racional de catalisador deve priorizar a dispersão controlada do metal e uma compreensão mecanística das interações para garantir alta atividade e estabilidade sustentada.

5.3. Aplicações em reforma a vapor, pirólise, gaseificação e fotocatalise

Nesta fase de pesquisa, o biochar ainda apresenta um parâmetro complexo, no qual a seleção da matéria-prima, as condições de pirólise, os métodos de ativação e as estratégias de pós-modificação impactam coletivamente o comportamento catalítico. Para explorar plenamente o potencial do biochar, é necessário obter uma compreensão sistemática dessas variáveis independentes, em vez de demonstrações isoladas de desempenho.

Tendências importantes emergem do uso de biochar na produção de hidrogênio. Primeiramente, o biochar puro exibe atividade catalítica intrínseca, mas carece de atividade robusta para realizar a reação de hidrogênio devido às demandas energéticas necessárias. Consequentemente, o principal uso do biochar se concentra em sua função como suporte; a dopagem com metais aumenta a atividade catalítica devido às interações sinérgicas entre os dois materiais. Como resultado, o desenvolvimento e o projeto de engenharia do catalisador tornam-se uma das variáveis mais importantes para alcançar um desempenho dos catalisadores convencionais disponíveis no mercado.

A seleção da matéria-prima, as condições de pirólise, os métodos de ativação e as estratégias de pós-modificação influenciam coletivamente seu comportamento. É importante lembrar que esses parâmetros não afetam todas as vias de produção de hidrogênio da mesma forma, conforme discutido na Tabela 2 , o que reforça a necessidade de uma interpretação específica para cada via, em vez de demonstrações de desempenho isoladas.

As rotas termoquímicas para a produção de hidrogênio, que incluem reforma a vapor, pirólise e gaseificação, são processos que, em princípio, utilizam material de hidrocarboneto para realizar a reação; no entanto, estudos recentes têm utilizado biogás e biomassa como matéria-prima para melhorar a sustentabilidade. Nesses ambientes, os requisitos para os catalisadores são estabilidade térmica e resistência à formação de coque. Em ambientes de alta temperatura, o biochar como suporte catalítico exibe um comportamento de adsorvente de intermediários de reação, CO_2 ou espécies de carbono sólido, tornando-se uma reação aprimorada por sorção.

Embora essa multifuncionalidade seja conceitualmente vantajosa, ela também acarreta dificuldades em termos de durabilidade e estabilidade estrutural do catalisador [100].

Esse efeito foi refletido no estudo de Di Stasi et al., onde a reforma a vapor ocorreu apenas na superfície de nanopartículas metálicas e as principais causas de desativação do catalisador foram as altas taxas de deposição e os subprodutos pesados adsorvidos nos sítios catalíticos [98].

Isso representa um desafio para o uso de biochar como suporte catalítico; Embora possa melhorar a dispersão do metal e proporcionar capacidade de adsorção, não atenua os mecanismos fundamentais de desativação associados a essa rota de produção.

Na pirólise, Fang et al. estudaram a implementação de um ciclo onde o subproduto da pirólise da biomassa é o principal componente para sintetizar novos catalisadores e o hidrogênio é extraído da matéria volátil liberada pela reação [94].

No caso da gaseificação, a pesquisa tem se concentrado na obtenção de um gás de síntese rico em hidrogênio usando a mesma biomassa como precursor para a reação e o catalisador de biochar. Kong et al. compararam o desempenho de diversas biomassas: palha de trigo, *Chlorella pyrenoidosa*, lodo de esgoto e esterco bovino. A palha de trigo apresentou o melhor desempenho, com hidrogênio representando quase 50% do gás produzido, com um rendimento de 46,39 mmol/g e a menor formação de CO₂ [95].

No caso da eletrólise, a eletrólise da água assistida por biochar e a geração fotocatalítica de hidrogênio usando biochar são amplamente utilizadas; em contraste com as rotas termoquímicas, os mecanismos que regem a eletrólise são a cinética de transferência de elétrons, o transporte de carga e as interações eletrônicas interfaciais. Nesse caso, o biochar atua como um suporte condutor e mediador eletrônico. Entre as principais características está o aumento da eficiência de utilização do metal e do transporte de elétrons.

Para a fotocatalise, isso oferece melhor absorção de luz visível, menores gaps de banda, excelente difusão de carga e redução na rápida recombinação de partículas carregadas. Em geral, a produção de hidrogênio aumenta de três a cinco vezes com o uso de biochar; isso é alcançado por meio da melhoria na fotoestabilidade dos catalisadores [91 , 101].

Mesmo na fermentação escura, o biochar demonstra uma melhoria na produção de hidrogênio. Embora o mecanismo seja dominado pelo metabolismo microbiano em vez de reações catalíticas de superfície, o biochar é necessário para a mediação redox, tendo um impacto direto na seletividade dos microrganismos. Em um estudo conduzido por Zhao et al., houve um aumento de 2,533 vezes com o uso de biochar derivado de palha de arroz, atingindo um rendimento de 2,08 mol-H₂ / mol-xilose. O papel do biochar nessa interação foi a melhoria no crescimento bacteriano, a regulação do pH e a modulação das reações redox, além de aumentar a eletrocondutividade na mistura para degradar mais de 90% da xilose [102].

6. Principais fatores que afetam a produção catalítica de hidrogênio

6.1. Área Superficial, Porosidade e Grupos Funcionais

Nos estudos sobre o uso do biochar como catalisador, houve um maior entendimento das propriedades que afetam diretamente a produção de hidrogênio. A área superficial e a porosidade são cruciais para o desempenho catalítico do biochar.

Santos et al. descobriram que uma superfície meso-macroporosa pode influenciar o comportamento de catalisadores à base de biochar na reforma a vapor. Em seus resultados, o aumento na estrutura porosa leva a um aumento na produção de hidrogênio. Em estruturas de carvão microporosas, as moléculas de paládio ficam retidas e minimizam a interação com o reagente.

Como consequência, a principal atividade dentro do biochar ocorre nos sítios meso-macroporosos; estes aumentam a transferência de massa do interior para o sítio ativo do metal [104].

Além disso, na reforma a vapor da casca de arroz, a estrutura mesoporosa apresentou uma estrutura altamente ordenada que favoreceu o contato dos centros ativos durante as reações catalíticas [97].

Em contraste, Hu et al. descobriram que, para a eletrólise da água assistida por biochar, a melhoria nos microporos aprimorou a reação de oxidação porque os sítios ativos estão localizados nos microporos e as estruturas mesoporosas funcionam como canais para aumentar o transporte de íons durante a reação [105].

Em relação aos grupos funcionais de superfície, foi evidenciado que o biochar básico melhora o desempenho catalítico na pirólise do metano devido ao aumento dos grupos funcionais de oxigênio na superfície [66]. Um efeito semelhante é observado na reforma a vapor, onde grupos funcionais como -OH e C=O melhoram a reação de oxidação-redução [105].

Esses grupos também são muito importantes em eletroquímica; eles têm a capacidade de desprotonar em ambientes aquosos para induzir sítios carregados, e isso faz com que o biochar seja um melhor doador de elétrons para melhorar a reação geral [106].

6.2. Condições de reação: temperatura, pressão e tempo

Na produção termoquímica de hidrogênio, a temperatura é uma das variáveis mais importantes. Devido à natureza endotérmica da reação de decomposição do metano, o aumento da temperatura proporciona um melhor desempenho [66]. No caso da reforma a vapor do etanol, ocorre algo semelhante: o aumento da temperatura mostrou uma melhoria na reação de desidratação. No mesmo estudo, o aumento da pressão parcial do vapor teve um impacto negativo direto no rendimento de hidrogênio, diminuindo a quantidade. A quantidade de vapor causou uma melhoria na reação de deslocamento do gás de água (WGS), aumentando o rendimento de produtos à base de carbono; isso resultou em uma menor área superficial no catalisador para reações de desidratação e decomposição [107].

Yu et al. estudaram a otimização de variáveis na gaseificação de biomassa. Eles descobriram que a ordem de influência do rendimento de hidrogênio é Velocidade Espacial Horária Gasosa > Temperatura > Conteúdo de Vapor > Tempo.

Usando resíduos de ervas chinesas, eles descobriram que os parâmetros ótimos para realizar esta reação são 16.700 h^{-1} , $667 \text{ }^\circ\text{C}$, $14,5\% \text{ vol}$ e 92 min , respectivamente [103].

6.3. Composição da matéria-prima e pré-tratamento

Na literatura, diferentes matérias-primas e pré-tratamentos são aplicados ao biochar para obter características específicas que possam melhorar o desempenho da reação geral.

Parte do ajuste e da engenharia do biochar envolve a escolha de uma biomassa adequada, condições de pirólise e ativação física ou química, visto que cada decisão impactará a interação do biochar com o metal dopante e o reagente; as principais características estão listadas na Tabela 4 .

Taxas de aquecimento mais rápidas promovem um pico mais nítido e estreito, e as partículas são uniformes e monodispersas por natureza; isso cria um efeito de distribuição uniforme de partículas e, como consequência, estabilização da carga superficial, o que impede a aglomeração e, conseqüentemente, aumenta a condutividade elétrica.

Além disso, há um aumento na desprotonação de grupos funcionais de oxigênio na superfície em ambientes aquosos, induzindo cargas no biochar, desenvolvendo propriedades doadoras de elétrons. Essas propriedades são críticas para interações de superfície, pois catalisadores para superfícies ativas e eletrodos resultam em uma mobilidade de carga e difusão iônica aprimoradas [108].

Sun et al. avaliaram os efeitos do tratamento de eluição no desempenho do biochar puro derivado de misturas de celulose e lignina na eletrólise da água assistida por biochar. Três soluções de lavagem foram estudadas: KOH 1M, HCl 1M e água deionizada. Em geral, o tratamento reduziu o teor de cinzas e as substâncias solúveis dos poros.

Isso expôs grupos funcionais oxidáveis (C-OH e COOH) e a superfície que favoreceu a oxidação durante a eletrólise, facilitando a difusão de íons no ânodo-eletrólito e aumentando a transferência de elétrons.

No entanto, o melhor desempenho foi obtido com o tratamento com água deionizada: este removeu apenas o teor de cinzas e não alterou os grupos funcionais da superfície, como ocorreu com o tratamento químico, com o uso de grupos básicos desativados por ácido e grupos ácidos desativados por base, levando a uma menor cinética de reação e menor densidade de corrente [109].

Entretanto, mantendo o alto teor de cinzas do lodo de esgoto na produção fotocatalítica de hidrogênio, a recombinação de carga por meio de reações redox na matriz de biochar melhora seu desempenho geral [101].

Na fermentação escura, o teor de cinzas forneceu os nutrientes necessários no meio, aumentando a produção geral [110]. Técnicas como a dopagem com nitrogênio foram estudadas por Ying et al. Eles utilizaram biochar de agulhas de pinheiro dopado com nitrogênio para aumentar a atividade na reação de evolução de oxigênio.

Esse pré-tratamento causou um aumento no nitrogênio grafitico, o que leva a uma maior condutividade, molhabilidade e adsorção de intermediários na reação eletroquímica. Os heteroátomos de nitrogênio alteraram a estrutura eletrônica da matriz de carbono, levando a uma distribuição de carga, resultando em melhores resultados na eletrólise da água [99]. A dopagem com enxofre em flores de camélia para a divisão da água com hidrogênio foi estudada por Xia et al.; os átomos de enxofre foram induzidos na estrutura do biochar, gerando superfícies com maior transferência de carga do eletrólito para o eletrodo.

Comparado a materiais de carbono comerciais, apresentou melhor desempenho para as reações de HER e OER, mostrando potencial como eletrodo duplo para a produção de hidrogênio [111].

A composição da matéria-prima pode ter um grande impacto no desempenho do biochar. Para a eletrólise da água assistida por biochar, o biochar derivado de esterco bovino foi o que apresentou a maior relação C/O, o menor tamanho de partícula e o potencial zeta mais negativo; essas propriedades fazem com que esse biochar apresente um melhor desempenho na eficiência de oxidação.

O comportamento dos catalisadores sugere que um aumento na relação C/O melhora a cinética de transferência de prótons e elétrons [106].

6.4. Estabilidade do Catalisador e Potencial de Regeneração

Para ser considerado eficaz como catalisador, um material deve apresentar alta estabilidade ao longo do tempo para garantir uma longa vida útil; a regeneração permite restaurar o desempenho do catalisador.

Atualmente, alcançar ambas as funcionalidades ainda representa um desafio na indústria para catalisadores heterogêneos. O biochar como catalisador é um material que ainda está em estudo.

Estudos na literatura confirmam que o uso de biochar como suporte melhora a estabilidade geral do catalisador; no entanto, seu uso em métodos de conversão termoquímica tem evidenciado problemas de desativação devido à deposição de coque na superfície e à redução dos grupos funcionais superficiais.

Buentello-Montoya et al. encontraram uma correlação entre a estrutura porosa e a desativação do catalisador. Um biochar mesoporoso tem menor probabilidade de sofrer desativação do que um microporoso.

A deposição de coque pode ser gaseificada em altas temperaturas, permitindo a conservação da área superficial. No caso do biochar microporoso, os sítios ativos foram bloqueados, reduzindo a eficiência geral do processo [112].

A interação é mostrada na Figura 13 .

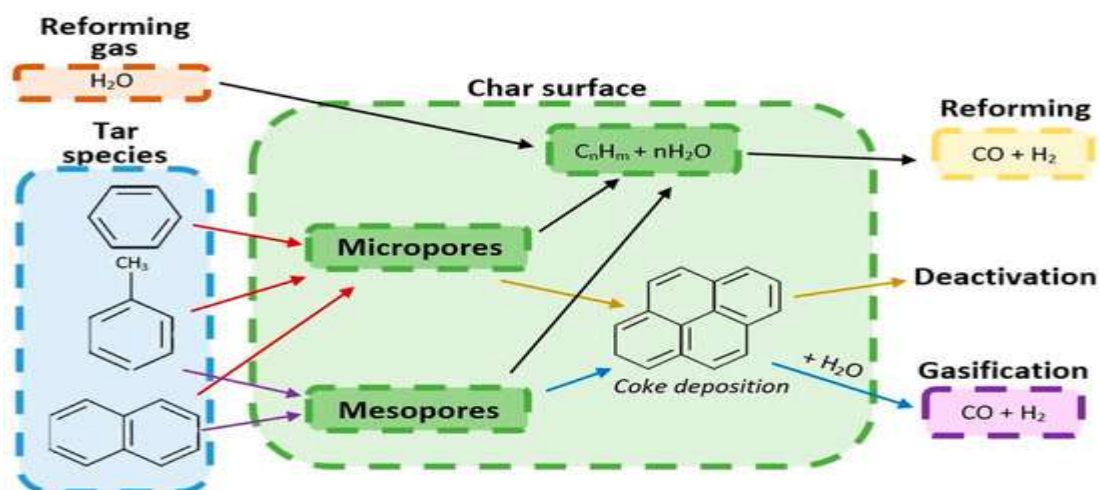


Figura 13. Mecanismo de desativação do biochar em relação à sua estrutura de poros na reforma do alcatrão [112].

Em outro estudo, utilizando Ni/Ca@KWBC (biochar de lodo de esgoto ativado com potássio) para pirólise de biomassa, a dispersão homogênea de metais na matriz de carbono foi fundamental para alcançar estabilidade a longo prazo. Eles utilizaram o catalisador por cinco ciclos e demonstraram boa reutilização e menor acúmulo. O Ni/Ca@KWBC (biochar de lodo de esgoto ativado com potássio) permaneceu intacto, com formação de anti-coque, e pôde ser restaurado com NaOH e vibração ultrassônica. A estabilidade aprimorada foi atribuída à reação alternada entre CaO e CaCO₃ no catalisador [113].

Para a eletrólise da água, Ertaş et al. encontraram uma estabilidade melhorada para o eletrodo Biochar/ZnCoNi; ele foi capaz de manter uma atividade estável por mais de 1000 ciclos e uma alta densidade de corrente por 12 h [114]. Para a fotocatalise, as camadas de biochar não são afetadas pela longa exposição à radiação luminosa [101].

Além disso, a interação sinérgica entre o biochar e as fases anatase e rutilo do TiO_2 gera um catalisador estável. Durante 30 h e 5 ciclos, a atividade permaneceu estável, demonstrando uma vida útil prolongada para o catalisador [115].

A estabilidade a longo prazo continua sendo um dos principais desafios para catalisadores à base de biochar. Como se pode observar, os estudos se concentram no desempenho a curto prazo, com uma avaliação limitada da durabilidade em ciclos operacionais prolongados.

O que demonstra um enorme potencial para estabilidade a longo prazo, ainda pouco explorado. Além disso, as estratégias de regeneração para biochar gasto são limitadas e sua viabilidade permanece incerta. É imprescindível compreender os mecanismos de desativação e desenvolver protocolos de regeneração eficazes para avaliar a viabilidade industrial.

6.5. Estrutura Conceitual para Biochar. Conforme explorado neste documento, o biochar não aumenta a produção de hidrogênio por meio de um único atributo. Sua eficácia decorre da forma como características estruturais intrínsecas se traduzem em propriedades físico-químicas que possibilitam funções catalíticas específicas para diferentes mecanismos de produção de hidrogênio.

A partir da estrutura, o biochar é definido pelo seu grau de aromaticidade, porosidade, grafitação, densidade de defeitos e minerais presentes, que são determinados pela seleção da matéria-prima e pelas condições de processamento termoquímico.

Todas as características incluídas na Tabela 4 afetam o comportamento do biochar. Estruturas altamente aromáticas promovem condutividade elétrica e estabilidade térmica, enquanto estruturas porosas e defeitos estruturais aumentam a exposição dos sítios ativos e a área superficial. Grupos funcionais superficiais e espécies inorgânicas introduzem centros redox-ativos.

Esses atributos governam as propriedades físico-químicas do biochar, visto que a dopagem com heteroátomos aumenta a mobilidade eletrônica, enquanto grupos funcionais oxigenados regulam a força de adsorção e o comportamento ácido-base.

A combinação dessas propriedades físico-químicas determina o papel catalítico funcional que o biochar pode assumir. Um biochar poroso e quimicamente ativo funciona como um estabilizador de metais, aumentando a dispersão das fases ativas e a área superficial para que a reação ocorra; ao mesmo tempo, ele pode capturar intermediários de reação, com precursores de coque aumentando o rendimento e a seletividade da reação.

Finalmente, as características de desempenho observadas, como taxas de produção de hidrogênio aumentadas, maior estabilidade, sobrepotencial reduzido ou seletividade aprimorada, são resultados emergentes desse acoplamento multinível, e não propriedades isoladas do material. A variabilidade no desempenho relatado entre os estudos pode, portanto, ser racionalizada na estrutura do biochar e na via específica — dependendo do papel que ele desempenha no sistema. O desempenho do biochar não pode ser generalizado para todos os sistemas.

Em vez disso, o projeto e a comparação racionais exigem um alinhamento explícito entre a estrutura do biochar, as propriedades físico-químicas desejadas, o papel catalítico pretendido e o mecanismo de produção de hidrogênio.

7. Desafios e limitações do biochar

7.1. Variabilidade na Qualidade e Composição do Biochar. Uma das principais limitações do uso de biochar é a variabilidade em suas propriedades físico-químicas. Cada decisão na produção impacta significativamente o desempenho do material. Como já foi discutido, a biomassa utilizada como matéria-prima, a temperatura de pirólise, a taxa de aquecimento e a ativação física ou química influenciam diretamente propriedades catalíticas essenciais, como área superficial, porosidade, grupos funcionais superficiais, heteroátomos, teor de cinzas e interação sinérgica com metais ou óxidos. Essa variabilidade dificulta comparações entre estudos e impede o estabelecimento de tendências de desempenho generalizadas, mesmo quando se utilizam rotas idênticas de produção de hidrogênio. Consequentemente, o desempenho do biochar permanece altamente específico para cada sistema, limitando o projeto preditivo e a escalabilidade.

7.2. Escalabilidade, Padronização e Reprodutibilidade. O biochar é um material promissor em escala laboratorial; seu desempenho em diferentes reações é impressionante, o que explica por que tem sido foco de pesquisa ao longo dos anos. No entanto, a transposição de sistemas baseados em biochar para a escala industrial ainda parece distante.

Pequenas variações na origem da matéria-prima ou nas condições de processamento podem resultar em desvios substanciais no comportamento catalítico. A falta de protocolos de produção padronizados e de métricas de qualidade para biochar de grau catalítico agrava ainda mais esse problema. Sem correlações claras entre as variáveis de produção e o desempenho funcional, é difícil garantir a reprodutibilidade e a consistência das propriedades do material em escala industrial.

7.3. Considerações Ambientais e de Ciclo de Vida

Para ser considerado uma verdadeira solução ambiental para a sustentabilidade, é necessário levar em conta todos os impactos ambientais que o uso do biochar acarreta. O ciclo de vida do biochar inclui etapas que exigem quantidades massivas de energia para a produção; a ativação e a dopagem utilizam produtos químicos que podem gerar efluentes tóxicos. Ao final de sua vida útil, não há um plano para o tratamento do material restante; devido à sua capacidade de autodecomposição, os materiais secundários representam uma ameaça ao meio ambiente. Além disso, a análise do ciclo de vida ainda é limitada e não permite quantificar o verdadeiro impacto na produção sustentável de hidrogênio.

8. Perspectivas e Oportunidades Futuras

8.1. Biochar modificado para aplicações específicas de hidrogênio. O futuro do biochar depende do desenvolvimento de catalisadores. Esse material possui um enorme potencial para ser adaptado às necessidades das reações.

Uma compreensão mais profunda dos padrões de comportamento do biochar pode permitir que ferramentas computacionais e métodos de simulação explorem diversos cenários para identificar configurações-chave nas superfícies biochar-metal. Isso resultará em compósitos de biochar com maior atividade e estabilidade.

8.2. Sistemas Híbridos e Integração com Tecnologias Renováveis

Uma das principais vantagens do biochar é a sua elevada compatibilidade com tecnologias renováveis. Sua compatibilidade com sistemas eletroquímicos, energia solar e o uso de biomassa já foi comprovada. O biochar oferece a oportunidade de desenvolver novas tecnologias de produção de hidrogênio com baixo impacto ambiental e redução de custos gerais para a geração de energia abundante e de baixo custo; isso aumentará a acessibilidade e nos permitirá alcançar a sociedade do hidrogênio que almejamos.

8.3. Políticas, Investimentos e Escala Industrial

O biochar carece de padronização em termos de catálise, qualidade, classificação de materiais, requisitos mínimos e propriedades; a implementação de regulamentações para o biochar pode ser o primeiro passo para apoiar sistemas circulares em nível industrial. É necessário implementar regulamentações para garantir segurança e qualidade, e reduzir os impactos ambientais na produção e no uso do biochar.

O investimento governamental em pesquisa, desenvolvimento e políticas públicas é essencial para fortalecer as tecnologias emergentes. A divulgação adequada de informações é fundamental para aumentar a aceitação de novas formas de produção de energia pela população, com políticas que visem a evolução da energia, mas que, ao mesmo tempo, protejam todas as diversas formas de vida que habitam nosso planeta. Abordar todas essas questões promoverá a transição energética mais rapidamente do que o esperado.

Apesar dos resultados promissores em escala laboratorial, a transposição de sistemas à base de biochar para reatores industriais permanece limitada. O biochar demonstrou compatibilidade com sistemas eletroquímicos. A pesquisa e o desenvolvimento possibilitaram o uso de óxidos metálicos para dopagem, que são acessíveis e de baixo custo, visando melhorar a atividade catalítica; contudo, seu desempenho sob densidades de corrente, temperaturas e condições eletrolíticas industriais permanece inexplorado. Outras variáveis, como estabilidade mecânica ou queda de pressão, raramente são abordadas. Compreender o biochar nessas condições nos permitirá testar compósitos de biochar em uma demonstração em nível de reator, comprovando a real capacidade industrial.

É importante destacar a necessidade de explorarmos a competitividade econômica. A produção de biochar envolve processos de pirólise com alto consumo de energia, e os processos de ativação requerem tratamentos químicos que elevam os custos.

A padronização da rota de produção poderia reduzir a complexidade do processo, mas ainda não existe um modelo adequado. Sem vias de produção escaláveis, de baixo consumo energético e ambientalmente sustentáveis, a competitividade industrial dos catalisadores à base de biochar permanece incerta.

8.4. Prioridades de Pesquisa e Roteiro de Inovação

Para alcançar todo o potencial do biochar em aplicações de hidrogênio, várias prioridades devem ser abordadas:

Lacunas críticas de conhecimento: É urgente que encontremos padrões de comportamento na produção de biochar e na catálise de hidrogênio. Isso é necessário para melhorar a atividade, a reprodutibilidade, a estabilidade e o projeto preditivo de catalisadores projetados.

Estabilidade e regeneração: Para a viabilidade industrial, é imprescindível compreender e melhorar a estabilidade do biochar, os ciclos de longo prazo, a deposição de coque, a desativação e a perda de grupos funcionais da superfície, juntamente com a previsão de como o biochar funcionaria em grande escala e se a regeneração é possível para alcançar o melhor desempenho.

Cadeia de suprimentos: Uma cadeia de suprimentos confiável para a biomassa atual.

Rotas de produção sustentáveis:

A pesquisa em pirólise de baixo consumo energético, redução de efluentes e rotas de produção química com baixa emissão de poluentes é necessária para explorar o potencial ecológico do biochar.

Integração em nível de sistema: A avaliação do desempenho catalítico do biochar em uma planta completa e em funcionamento é necessária; estudos técnico-econômicos, uma avaliação do ciclo de vida e a compatibilidade com as tecnologias de hidrogênio existentes são importantes para acelerar a consolidação do biochar na produção global de hidrogênio.

Contribuições dos autores

Conceitualização: HI e AJ; metodologia: AJ e KMR; investigação: HI, AJ e KMR; curadoria de dados: AJ e KMR; software: AJ e KMR; validação: AJ, HI e KMR; redação – rascunho original: KMR; redação – revisão e edição: HI; visualização: AJ e KMR; supervisão: HI e AJ; obtenção de financiamento: HI; recursos: HI; administração do projeto: HI. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento

Os autores agradecem o apoio concedido pelo Conselho de Pesquisa em Ciências Naturais e Engenharia do Canadá (NSERC Discovery Grant: RGPIN-2024-04760) e pela Fundação Canadense para Inovação (CFI JELF: 37758), obtido pelo Professor Hussameldin Ibrahim.

Declaração de Disponibilidade de Dados

Os dados serão disponibilizados mediante solicitação.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Universidade de Regina e ao Instituto de Pesquisa em Tecnologias de Energia Limpa (CETRI) por lhes concederem acesso às suas instalações de pesquisa.

Conflitos de interesse. Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Referências

- IEA—Agência Internacional de Energia. Revisão Global de Energia 2025 ; IEA—Agência Internacional de Energia: Paris, França, 2025. [Google Scholar]
- Mokrzycki, E.; Gawlik, L. O desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde: revisão. *Energies* 2024 , 17 , 3165. [Google Scholar] [CrossRef]
- Martínez de León, C.; Molina, P.; Ríos, C.; Brey, JJ. Impacto da produção de hidrogênio verde nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. *Int. J. Hydrogen Energy* 2025 , 142 , 642–653. [Google Scholar] [CrossRef]
- Brahim, T.; Jemni, A. Produção de hidrogênio verde: uma revisão de tecnologias, desafios e otimização de sistemas híbridos. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2026 , 225 , 116194. [Google Scholar] [CrossRef]
- Yan, F. Resíduos de biomassa agrícola e suas tecnologias de utilização de recursos: uma revisão. *Biomass Bioenergy* 2025 , 203 , 108291. [Google Scholar] [CrossRef]
- Wang, K.; Tester, JW Gestão Sustentável de Resíduos de Biomassa Inevitáveis. *Green Energy Resour.* 2023 , 1 , 100005. [Google Scholar] [CrossRef]
- Thamarai, P.; Kamalesh, R.; Shaji, A.; Saravanan, A.; Yaashikaa, PR; Vickram, AS Tecnologias avançadas de conversão para recuperação de recursos de resíduos de biomassa: aplicações e tendências emergentes. *Quimosfera* 2025 , 384 , 144515. [Google Scholar] [CrossRef]

Kumar, A.; Kumari, L.; Laghari, AA; Rong, H.; Jamro, IA; Sajnani, S.; Aborisade, MA; Rajput, G.; Oba, BT; Nkinahamira, F.; et al. Explorando o potencial integrado da pirólise e da torrefação úmida em baixa temperatura para a valorização de resíduos médicos típicos: uma abordagem multifacetada que utiliza TG-FTIR-MS online, 2D-COS, cinética isoconversional e mecanismos de reação. *Chem. Eng. J.* 2024 , 499 , 156464. [Google Scholar] [CrossRef]

Brocza, FM; Foster, SJ; Peacock, CL; Jones, JM. Síntese e aplicações de compósitos de óxido de manganês-biochar: uma revisão sistemática em catálise, capacitores e aplicações de sorção. *Biomass Bioenergy* 2024 , 184 , 107201. [Google Scholar] [CrossRef]

Singh, R.; Goyal, A.; Sinha, S. Global Insights into Biochar: Production, Sustainable Applications, and Market Dynamics. *Biomass Bioenergy* 2025 , 194 , 107663. [Google Scholar] [CrossRef]

Ludwig, JR; Schindler, CS Catalisador: Catálise Sustentável. *Chem* 2017 , 2 , 313–316. [Google Scholar] [CrossRef]

Abbas, A.; Cross, M.; Duan, X.; Jeschke, S.; Konarova, M.; Huber, GW; Lee, AF; Lovell, EC; Lim, JYC; Polyzos, A.; et al. Catálise na intersecção da química sustentável e de uma economia circular. *One Earth* 2024 , 7 , 738–741. [Google Scholar] [CrossRef]

Jilani, A.; Dustgeer, MR; Ansari, MO; Zaka, A.; Mansoor, MA; Melaibari, AA; Ibrahim, H. Biochar derivado da casca de laranja assistido por rGO@MoS₂ para degradação de ciprofloxacina e evolução de hidrogênio impulsionadas por luz visível. *J. Water Process Eng.* 2025 , 80 , 109086. [Google Scholar] [CrossRef]

Mishra, R.; Shu, C.-M.; Ong, HC; Gollakota, ARK; Kumar, S. Progresso e desenvolvimento do biochar como catalisador para a produção de hidrogênio. *J. Clean. Prod.* 2024 , 477 , 143853. [Google Scholar] [CrossRef]

Gholami, Z.; Gholami, F.; Šimek, J.; Svobodová, K.; Vakili, M. Produção de hidrogênio para um futuro descarbonizado: uma revisão das tecnologias de produção. *J. Ind. Eng. Química*. 2025 , 153 , 240–278. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Nemitallah, MA; Alnazha, AA; Ahmed, U.; El-Adawy, M.; Habib, MA. Revisão sobre a tecnoeconomia da produção de hidrogênio usando processos atuais e emergentes: estado atual e perspectivas. *Results Eng.* 2024 , 21 , 101890. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Ringsgwandl, LM; Schaffert, J.; Brucken, N.; Alvo, R.; Görner, K. Quadro legislativo atual para a produção de hidrogênio verde por usinas de eletrólise na Alemanha. *Energias* 2022 , 15 , 1786. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Song, J.; Park, S. Revisão da pirólise do metano para a produção de hidrogênio turquesa limpo. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2024 , 183 , 106727. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Boretti, A. Avanços na produção sustentável de hidrogênio turquesa via pirólise de metano em metais fundidos. *Clean. Chem. Eng.* 2025 , 11 , 100139. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Sánchez-Bastardo, N.; Schlögl, R.; Ruland, H. Pirólise de metano para produção de hidrogênio com emissão zero: uma tecnologia de transição potencial entre combustíveis fósseis e uma economia de hidrogênio renovável e sustentável. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2021 , 60 , 11855–11881. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Nakkeeran, K.; Victor, K. Hidrogênio cinza e azul: insights sobre tecnologias de produção e perspectivas sobre alternativas livres de CO₂. *Sustain . Energy Technol. Assess.* 2025 , 75 , 104222. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Sanna, A.; Openshaw, D.; Oghotomo, P.; Bagnato, G. Reforma a vapor do metano: estado da arte e novas tecnologias. *React. Chem. Eng.* 2025 , 10 , 1963–1977. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Baig, A.; Sonal. Reforma a vapor de metanol, etanol, ácido acético, acetona e bio-óleo para geração de hidrogênio: visão catalítica e mecanística. *Bioresour. Technol. Rep.* 2024 , 28 , 101980. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

AlHumaidan, FS; Absi Halabi, M.; Rana, MS; Vinoba, M. Hidrogênio Azul: Estado Atual e Tecnologias Futuras. *Energy Convers. Manag.* 2023 , 283 , 116840. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Osman, AI; Mehta, N.; Elgarahy, AM; Hefny, M.; Al-Hinai, A.; Al-Muhtaseb, AH; Rooney, DW. Produção, armazenamento, utilização e impactos ambientais do hidrogênio: uma revisão. *Environ. Chem. Lett.* 2022 , 20 , 153–188. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Dash, SK; Chakraborty, S.; Elangovan, D. Uma breve revisão dos métodos de produção de hidrogênio e seus desafios. *Energies* 2023 , 16 , 1141. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Giwa, SO; Taziwa, RT. Adoção da gaseificação avançada de carvão: uma panaceia para a redução da pegada de carbono e a transição para uma economia de hidrogênio na África do Sul. *Int. J. Hydrogen Energy* 2024 , 77 , 301–323. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Mehmood, H.; Akbar, H.; Nilsalab, P.; Gheewala, SH. Explorando o espectro: um exame ambiental das diversas cores do hidrogênio. *Energy Adv.* 2025 , 4 , 224–238. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Nasser, M.; Megahed, TF; Ookawara, S.; Hassan, H. Uma revisão de sistemas baseados em eletrólise da água para produção de hidrogênio usando sistemas de energia híbrida/solar/eólica. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022 , 29 , 86994–87018. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Elazab, MA; Elgohr, AT; Bassyouni, M.; Kabeel, AE; Attia, MEH; Elshaarawy, MK; Hamed, AK; Alzahrani, HAH

Hidrogênio Verde: Liberando o Potencial para a Geração de Energia Sustentável. *Results Eng.* 2025 , 27 , 106031. [Google Scholar] [CrossRef]

Dash, S.; K, AS; S, J.; D, VHW; D, E.; Surapraraju, SK; Natarajan, SK. Avanços na produção de hidrogênio verde por meio de eletrólise alcalina da água: uma revisão abrangente. *Int. J. Hydrogen Energy* 2024 , 83 , 614–629. [Google Scholar] [CrossRef]

Yoon, KJ; Lee, S.; Park, S.-Y.; Minh, NQ. Avanços na tecnologia de eletrólise de óxido sólido em alta temperatura para produção limpa de hidrogênio e produtos químicos: materiais, células, conjuntos, sistemas e economia. *Prog. Mater. Sci.* 2025 , 154 , 101520. [Google Scholar]

Li, C.; Baek, J.-B. A promessa da produção de hidrogênio a partir de eletrolisadores de membrana de troca aniônica alcalina. *Nano Energy* 2021 , 87 , 106162. [Google Scholar] [CrossRef]

Shiva Kumar, S.; Himabindu, V. Produção de hidrogênio por eletrólise de água PEM — Uma revisão. *Mater. Sci. Energy Technol.* 2019 , 2 , 442–454. [Google Scholar] [CrossRef]

Akhlaghi, N.; Najafpour-Darzi, G. Uma revisão abrangente sobre a produção biológica de hidrogênio. *Int. J. Hydrogen Energy* 2020 , 45 , 22492–22512. [Google Scholar] [CrossRef]

Lee, H.-S.; Xin, W.; Katakojwala, R.; Venkata Mohan, S.; Tabish, NMD. Células de eletrólise microbiana para a produção de biohidrogênio em fermentação escura — Uma revisão. *Bioresour. Technol.* 2022 , 363 , 127934. [Google Scholar] [CrossRef]

Puteri, MN; Gew, LT; Ong, HC; Ming, LC. Conversão de biomassa em biohidrogênio: análise abrangente de processos, implicações ambientais e econômicas. *Biomass Bioenergy* 2025 , 200 , 107943. [Google Scholar] [CrossRef]

Kumar, N.; Aepuru, R.; Lee, S.-Y.; Park, S.-J. Progressos recentes em catalisadores para produção sustentável de hidrogênio: uma revisão abrangente. *Coord. Chem. Rev.* 2026 , 547 , 217109. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Goren, AY; Temiz, M.; Erdemir, D.; Dincer, I. O papel de catalisadores eficazes na produção de hidrogênio: uma avaliação de desempenho. *Energy* 2025 , 315 , 134257. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Alizadeh, SM; Khalili, Y.; Ahmadi, M. Revisão abrangente da integração da captura e armazenamento de carbono na produção de hidrogênio: oportunidades, desafios e perspectivas futuras. *Energies* 2024 , 17 , 5330. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Chirosca, A.-M.; Rusu, E.; Minzu, V. Hidrogênio Verde — Métodos de Produção e Armazenamento: Estado Atual e Direções Futuras. *Energies* 2024 , 17 , 5820. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Kumar, N.; Aepuru, R.; Lee, S.-Y.; Park, S.-J. Avanços em catalisadores para produção de hidrogênio: uma revisão abrangente de materiais e mecanismos. *Nanomaterials* 2025 , 15 , 256. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Liu, L.; Corma, A. Catalisadores metálicos para catálise heterogênea: de átomos individuais a nanocúmulos e nanopartículas. *Chem. Rev.* 2018 , 118 , 4981–5079. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Zhao, H.; Zhang, X.; Yu, C.; Gao, W.; Chen, X.; Lan, H.; Xin, X.; Liu, K.; Ma, D. Átomos individuais de Pt altamente dispersos derivados de estruturas orgânicas covalentes colaboram com nanocúmulos de Pt como eletrocatalisador para a evolução de hidrogênio ácido. *Green Chem.* 2025 , 27 , 8569–8575. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Dong, H.; Jiang, J.; Xie, S.; Lin, C.; Wei, P.; Zhang, X.; Hu, P.; Iwuoha, EI; Peng, X. Fosfetos de metais de transição para evolução eficiente de hidrogênio:

síntese, regulação multiescala e perspectivas industriais. *Appl. Energy* 2025 , 400 , 126550. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Wang, T.; Li, J.; Xiao, L.; Gao, S.; Yu, J.; Liu, W.; Liu, Q.; Hu, G. Avanços recentes em eletrocatalisadores à base de sulfetos de metais de transição para as reações de evolução de oxigênio e hidrogênio. *Surf. Interfaces* 2025 , 70 , 106784. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Mehta, S.; Thakur, R.; Rani, S.; Nagaraja, BM; Mehla, S.; Kainthla, I. Avanços recentes em dicalcogenetos ternários de metais de transição para a reação de evolução eletrocatalítica de hidrogênio. *Int. J. Hydrogen Energy* 2024 , 82 , 1061–1080. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Gao, X.; Dai, Q.; Lu, X.; Kawi, S. Catalisadores de átomo único de metal não nobre suportados em carbono para reação de evolução de hidrogênio eletrocatalítica. *Int. J. Hydrogen Energy* 2023 , 48 , 17106–17136.

Hidayatullah, K.; Manopo, J.; Supu, I.; Hadju, A.; Ofiyen, C.; Mahardhika, MK; Darma, Y. Aprimoramento da reação de evolução de hidrogênio via fotólise da água: uma revisão sobre estratégias recentes de materiais fotoanódicos à base de óxidos metálicos. *Inorg. Chem. Commun.* 2025 , 179 , 114885. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Ao, T.; Jafry, AT; Abbas, N. Sustentabilidade e escalabilidade da divisão fotoeletroquímica e fotocatalítica da água usando materiais de perovskita para produção de hidrogênio. *Electrochem. Commun.* 2025 , 177 , 107948. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Ameen, S.; Tahir, A.; ul Haq, T.; Khan, AA; Butt, MTZ; Hussain, I.; Hussain, SZ; ur Rehman, H. Impulsionando a energia sustentável: o papel dos polioxometalatos (POMs) na produção fotoeletroquímica de hidrogênio. *Coord. Chem. Rev.* 2025 , 523 , 216265. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Jilani, A.; Ibrahim, H. Desenvolvimento na divisão fotoeletroquímica da água usando materiais à base de carbono: um caminho para a produção sustentável de hidrogênio. *Energies* 2025 , 18 , 1603. [Google Scholar] [CrossRef]

Rasool, MA; Sattar, R.; Anum, A.; Al-Hussain, SA; Ahmad, S.; Irfan, A.; Zaki, MEA. Uma visão sobre a divisão fotocatalítica da água baseada em nanomateriais de carbono para a produção de hidrogênio verde. *Catalysts* 2023 , 13 , 66. [Google Scholar] [CrossRef]

Zhang, F.; Yang, K.; Liu, G.; Chen, Y.; Wang, M.; Li, S.; Li, R. Avanços recentes no grafeno: síntese, propriedades e aplicações. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2022 , 160 , 107051. [Google Scholar] [CrossRef]

Fang, L.; Xie, Y.; Xu, F.; Guo, P. Reação de evolução de hidrogênio eficientemente aprimorada em eletrólito alcalino de microesferas de W/WO_2 semelhantes a ouriços-do-mar com óxido de grafeno reduzido como catalisadores. *J. Electroanal. Chem.* 2025 , 996 , 119414. [Google Scholar] [CrossRef]

Zhang, X.; Bi, Y.; Wang, Y.; Liu, Q.; Zhang, Y.; Wang, J.; Chen, L. N, S Grafeno co-dopado acoplado com nanoesferas de carbono carregadas com Ni₂P/CoP: um novo catalisador para a reação de evolução de hidrogênio. *Mater. Today Sustain.* 2024 , 25 , 100677. [Google Scholar] [CrossRef]

Xue, H.; Yang, T.; Zhang, Z.; Zhang, Y.; Geng, Z.; He, Y. Estimulação do potencial catalítico oculto e exposição do sítio de níquel em NiSe@CNTs resultam em atividade e estabilidade ultra-altas de HER/OER. *Appl. Catal. B Environ.* 2023 , 330 , 122641. [Google Scholar] [CrossRef]

Cai, Z.; Xu, L.; Zhou, Y.; Gao, L.; An, X.; Ma, X.; Ma, Y.; Liu, J.; Li, X.; Tang, K. Fabricação de compósito de fosfeto/nitreto de cobalto/nanotubo de carbono: um catalisador bifuncional eficiente para a evolução de hidrogênio e oxigênio. *Int. J. Hydrogen Energy* 2024 , 82 , 559–566. [Google Scholar] [CrossRef]

Farooq, N.; Qureshi, N.; Hussain, S.; Qureshi, AM; Sattar, Z.; Manavalan, RK; Ullah, N.; Aslam, MK. Avanços recentes, abordagens sintéticas e adaptativas de nanocompósitos à base de nitreto de carbono grafítico para aplicações sustentáveis: uma revisão. *Int. J. Hydrogen Energy* 2025 , 180 , 151763. [Google Scholar] [CrossRef]

Wei, X.; Shen, J.; Chen, Z.; Li, H.; Zong, K.; Yang, L.; Jin, M.; Chen, Z.; Wang, X.; Chen, Z. Aumento da produção fotocatalítica de H₂ em nanoestruturas porosas de gC₃N₄ dopadas com K : exploração do mecanismo a partir de estudos experimentais e DFT. *Int. J. Hydrogen Energy* 2025 , 161 , 150465. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, Z.; Huang, T.; Cheng, S.; Liu, Y.; Wu, X.; Wu, X.; Xia, W. Separação por transbordamento para produção massiva de gC₃N₄ em forma de folha com desempenho aprimorado na evolução fotocatalítica de H₂ . *Surf . Interfaces* 2025 , 58 , 105844. [Google Scholar] [CrossRef]

Bhakta, AK; Fiorenza, R.; Jlassi, K.; Mekhalif, Z.; Ali, AMA; Chehimi, MM. O papel emergente do biochar na família de materiais de carbono para a produção de hidrogênio. *Chem. Eng. Res. Des.* 2022 , 188 , 209–228. [Google Scholar] [CrossRef]

Wongfaed, N.; Sittijunda, S.; O-Thong, S.; Kongjan, P.; Jariyaboon, R.; Plangklang, P.; Reungsang, A. Aprimoramento da produção de hidrogênio por fermentação escura usando biochar modificado com metal a partir de resíduos de cana-de-açúcar: otimização, caracterização e análise metabólica. *J. Environ. Manag.* 2025 , 380 , 125047. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Zhou, X.; Li, Y.; Xiong, Z.; Yang, S.; Liu, Q.; Ma, Z.; Hou, M.; Li, N. Eletrólise da água assistida por ânodo de sacrifício de biochar para produção de hidrogênio: dopagem com heteroátomos e seus efeitos na transformação de radicais. *Int. J. Hydrogen Energy* 2025 , 160 , 150488. [Google Scholar] [CrossRef]

Rizwan, M.; Eisa, MH; Zada, A.; Azizi, S.; Alkaoud, AM; Albishi, MS; Chen, H. Avanços de ponta em aplicações de biochar: produção e armazenamento de hidrogênio termoquímico, fermentativo, fotocatalítico e eletrocatalítico. *Fuel* 2025 , 402 , 136016. [Google Scholar] [CrossRef]

Palfy, RK; Klinghoffer, NB. Pirólise de metano sobre biochar ativado e catalisadores compósitos de lama vermelha e biochar para produção de hidrogênio turquesa. *Int. J. Hydrogen Energy* 2025 , 170 , 151120. [Google Scholar] [CrossRef]

Padrões de Biochar. Iniciativa Internacional de Biochar. Definição padronizada de produto e diretrizes de teste de produto para biochar usado no solo; Padrões de Biochar da IBI, versão 2.1. Iniciativa Internacional de Biochar: Canandaigua, NY, EUA, 2015. Disponível online: <https://biochar-international.org/biochar-standards/> (acessado em 13 de novembro de 2025).

Tursi, A. Uma revisão sobre biomassa: importância, química, classificação e conversão. *Biofuel Res. J.* 2019 , 6 , 962–979. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, G.; Dai, Y.; Yang, H.; Xiong, Q.; Wang, K.; Zhou, J.; Li, Y.; Wang, S. Uma revisão dos avanços recentes na pirólise da biomassa. *Energy Fuels* 2020 , 34 , 15557–15578. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, L.; Ok, YS; Tsang, DCW; Alessi, DS; Rinklebe, J.; Wang, H.; Mašek, O.; Hou, R.; O'Connor, D.; Hou, D. Novas tendências em estratégias de pirólise e modificação de biochar: matéria-prima, condições de pirólise, preocupações com a sustentabilidade e implicações para a melhoria do solo. *Soil Use Manag.* 2020 , 36 , 358–386. [Google Scholar] [CrossRef]

Du, L.; Han, H.; Li, A.; Ren, Q.; Hu, S.; Su, S.; Wang, Y.; Jiang, L.; Xu, J.; Xu, K.; et al. Evolução da estrutura do biochar e seu impacto na adsorção de voláteis e na reforma durante a pirólise de carvão reciclado. *Energy Mater. Adv.* 2025 , 6 , 0167. [Google Scholar] [CrossRef]

Leng, L.; Huang, H. Uma visão geral do efeito dos parâmetros do processo de pirólise na estabilidade do biochar. *Bioresour. Technol.* 2018 , 270 , 627–642. [Google Scholar] [CrossRef]

Mao, J.; Zhang, K.; Chen, B. Ligando a hidrofobicidade do biochar à repelência à água e à capacidade de retenção de água do solo adubado com biochar. *Environ. Pollut.* 2019 , 253 , 779–789. [Google Scholar] [CrossRef]

Ferraro, G.; Pecori, G.; Rosa, L.; Betucci, L.; Fratini, E.; Casini, D.; Rizzo, AM; Chiaramonti, D. Biochar da pirólise em escala de laboratório: influência da matéria-prima e da temperatura operacional. *Conversas de biomassa. Biorrefinaria* 2024 , 14 , 5901–5911. [Google Scholar] [CrossRef]

Tomczyk, A.; Sokołowska, Z.; Boguta, P. Propriedades físico-químicas do biochar: efeitos da temperatura de pirólise e do tipo de matéria-prima. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2020 , 19 , 191–215. [Google Scholar] [CrossRef]

Janu, R.; Mrlik, V.; Ribitsch, D.; Hofman, J.; Sedláček, P.; Bielská, L.; Soja, G. Grupos funcionais da superfície do biochar afetados pela matéria-prima de biomassa, composição do biochar e temperatura de pirólise. *Carbon Resour. Convers.* 2021 , 4 , 36–46. [Google Scholar] [CrossRef]

Muzyka, R.; Misztal, E.; Hrabak, J.; Banks, SW; Sajdak, M. Diversas condições de pirólise de biomassa influenciam a porosidade e a distribuição do tamanho dos poros do biochar. *Energy* 2023 , 263 , 126128. [Google Scholar] [CrossRef]

Jalali, M.; Panam, Z.; Jalali, M.; Buss, W. O impacto do tipo de matéria-prima e dos parâmetros de pirólise nas propriedades físicas e químicas de biochars para aplicações de sorção, agricultura e sequestro de carbono: uma meta-análise. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2025 , 192 , 107271. [Google Scholar] [CrossRef]

Ippolito, JA; Cui, L.; Kammann, C.; Wrage-Mönnig, N.; Estavillo, JM; Fuertes-Mendizabal, T.; Cayuela, ML; Sigua, G.; Novak, J.; Spokas, K.; et al. Escolha da

matéria-prima, temperatura de pirólise e tipo influenciam as características do biochar: uma revisão abrangente de análise de metadados. *Biochar* 2020 , 2 , 421–438. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Chai, WS; Aslam, AA; Li, X.; Wu, T.; Pang, CH. Biochar com engenharia de superfície: avanços recentes em estratégias de modificação para remediação ambiental e aplicações energéticas. *J. Environ. Chem. Eng.* 2025 , 13 , 117951. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Bélanger, N.; Gariépy, Y.; Francis, M.; Prasher, S.; Khripin, CY; Mehlem, JJ; Dumont, M.-J. Avaliação e aprimoramento do biochar à base de amido como carga sustentável em compósitos de borracha estireno-butadieno por meio de tratamentos de ativação com vapor e CO₂ . *Biomass Bioenergy* 2024 , 184 , 107174. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Sun, J.; Jayakumar, A.; Díaz-Maroto, CG; Moreno, I.; Famoso, J.; Mašek, O. O papel da matéria-prima e do processo de ativação no desempenho de supercapacitores de biochar lignocelulósico. *Biomass Bioenergy* 2024 , 184 , 107180. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Alcazar-Ruiz, A.; Maisano, S.; Chiodo, V.; Urbani, F.; Dorado, F.; Sanchez-Silva, L. Aprimoramento do desempenho da captura de CO₂ por meio da ativação do biochar de bagaço de azeitona: um estudo comparativo de métodos físicos e químicos. *Sustain. Mater. Technol.* 2024 , 42 , e01177. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Sun, LM; McIntyre, SR; Iacomini, P.; Everden, K.; Williams, PT; Zong, S.; Liu, X.; Zhu, X.; Yang, Y.; Li, S.; et al. Produção, ativação e aplicações de biochar: uma revisão técnica abrangente. *Carbon Capture Sci. Technol.* 2025 , 16 , 100421. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Thi Thanh Thuy, V.; Wu, H.-C.; Tsai, Y.; Khiem, TC; Lin, Y.-F.; Bui, HM; Tsang, YF; Lin, K.-YA. Biochar dopado com heteroátomos como catalisador sustentável para a valorização de derivados de lignina: otimização do dopante para aumentar a conversão. *J. Environ. Chem. Eng.* 2025 , 13 , 116940. [Google Scholar] [CrossRef]

Gu, X.; Li, Z.; Xu, X.; Liu, H.; Cao, Y.; Wei, Y.; Liu, Z.; Guo, P.; Qing, Y.; Wu, Y. Biochar de casca de coco modificado com MgO, semelhante a hortênsias, para remediação de poluição por metais pesados em múltiplos meios: inovação morfológica e mecanismos subjacentes. *J. Hazard. Mater.* 2025 , 500 , 140337. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Visser, ED; Seroka, NS; Khotseng, L. Propriedades catalíticas do biochar como material de suporte potencial para células a combustível de metanol direto: uma revisão. *ACS Omega* 2023 , 8 , 40972–40981. [Google Scholar] [CrossRef]

Eom, H.; Jeon, B.; Shin, D. Um estudo experimental sobre o desempenho de adsorção de carbono do biochar para a produção de hidrogênio turquesa com emissão negativa de carbono. *Int. J. Hydrogen Energy* 2025 , 106 , 1322–1331. [Google Scholar] [CrossRef]

He, H.; Zhou, Z.; Tian, H.; Sun, C.; Xuan, Y. Estudo sobre o efeito de catalisadores à base de biochar modificados com Ni no processo de reforma a vapor de biomassa e plásticos para produção de hidrogênio. *J. Energy Inst.* 2025 , 119 , 101960. [Google Scholar] [CrossRef]

Li, Z.; Li, M.; Ding, M.; Lyu, X.; Nie, J.; Jin, Z. Biochar dopado com nitrogênio auxilia a transferência rápida de elétrons na interface ZnCdS/CoMoO₄ para aumentar a produção fotocatalítica de hidrogênio. *J. Colloid Interface Sci.* 2025 , 699 , 138231. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Li, X.; Zang, Y.; Zhang, J.; Zhang, L.; Zhang, J.; Huang, M.; Wang, J. Compósitos de biochar de casca de laranja e CdS para produção fotocatalítica de hidrogênio. *Inorganics* 2024 , 12 , 156. [Google Scholar] [CrossRef]

Bu, J.; Wei, H.-L.; Wang, Y.-T.; Cheng, J.-R.; Zhu, M.-J. Biochar aumenta a produção de H₂ por fermentação escura a partir do bagaço de cana-de-açúcar por meio do enriquecimento/colonização seletiva de bactérias funcionais e aprimoramento da transferência extracelular de elétrons. *Water Res.* 2021 , 202 , 117440. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Yang, Y.; Bu, J.; Tiong, YW; Xu, S.; Zhang, J.; He, Y.; Zhu, M.; Tong, YW. Fermentação escura termofílica aprimorada para produção de hidrogênio a partir de resíduos alimentares por biochar modificado com ferro. *Environ. Res.* 2024 , 244 , 117946. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Fang, Y.; Yu, X.; Wan, A.; He, Y.; Qin, Z.; Li, J. Fechando o ciclo: catalisador de níquel suportado em biochar para produção eficiente de gás de síntese rico em hidrogênio. *Int. J. Hydrogen Energy* 2024 , 80 , 332–342. [Google Scholar]

Kong, G.; Liu, Q.; Ji, G.; Jia, H.; Cao, T.; Zhang, X.; Han, L. Melhorando a produção de gás rico em hidrogênio a partir da gaseificação catalítica de biomassa com vapor sobre biochar poroso dopado com metal. *Bioresour. Technol.* 2023 , 387 , 129662. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Yang, G.; Hu, Q.; Hu, J.; Yang, H.; Yan, S.; Chen, Y.; Wang, X.; Chen, H. Produção de gás de síntese rico em hidrogênio a partir da gaseificação de biomassa usando nanocatalisadores à base de biochar. *Bioresour. Technol.* 2023 , 379 , 129005. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Liu, H.; Wu, J.; Shen, Y.; Ding, J.; Cong, H.; Shen, X.; Meng, H. Reforma catalítica a vapor de vapores de pirólise da casca de arroz: produção de hidrogênio promovida pelo uso de biochar dopado com Fe/K como catalisador. *Int. J. Hydrogen Energy* 2025 , 99 , 607–618. [Google Scholar] [CrossRef]

Di Stasi, C.; Cortese, M.; Greco, G.; Renda, S.; González, B.; Palma, V.; Manyà, J.J. Otimização das condições operacionais para a reforma a vapor de óleo de pirólise lenta sobre um catalisador de Ni-Co suportado em biochar ativado. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021 , 46 , 26915–26929. [Google Scholar] [CrossRef]

Ying, Z.; Gao, L.; Zheng, X.; Dou, B.; Cui, G. Cinética aprimorada da reação de evolução de oxigênio por meio de nanocápsulas de fosfetos de níquel-ferro à base de biochar na eletrólise da água para produção de hidrogênio. *Int. J. Hydrogen Energy* 2022 , 47 , 28782–28793. [Google Scholar] [CrossRef]

Guo, S.; Zhang, Y.; Liu, L. Sorção aprimorada por reforma a vapor de matérias-primas à base de biomassa: rumo à evolução sustentável de hidrogênio. *Chem. Eng. J.* 2024 , 485 , 149760. [Google Scholar] [CrossRef]

Zerga, AY; Tahir, M.; Alias, H.; Mohamed, AR. Nanotextura de biochar derivado de lodo para construir compósito BC/TiO₂ com elementos metálicos. Efeito influente na evolução fotocatalítica eficiente de hidrogênio. *Fuel* 2024 , 369 , 131678. [Google Scholar] [CrossRef]

Zhao, Y.; Wang, Y.; Wen, C.; Zhang, X.; Xie, Q.; Du, X.; Dong, L.; Cao, G.; Ren, N. Aprimoramento da produção de H₂ por fermentação escura a partir de águas residuais de xilose mediado por biochar : visão sobre a sucessão da estrutura da comunidade microbiana e seu desempenho metabólico. *Biomass Bioenergy* 2025 , 203 , 108297. [Google Scholar] [CrossRef]

Yu, Z.; Guo, Z.; Lang, L.; Yin, X.; Wang, A.; Wu, C. Otimização dos parâmetros do processo para gaseificação catalítica a vapor de biochar à base de Fe-K para produção de gás de síntese rico em hidrogênio. *Fuel* 2026 , 405 , 136465. [Google Scholar] [CrossRef]

Santos, JL; Megías-Sayago, C.; Ivanova, S.; Centeno, M.Á.; Odriozola, JA. Biochars funcionalizados como suportes para catalisadores Pd/C para produção

eficiente de hidrogênio a partir de ácido fórmico. *Appl. Catal. B Environ.* 2021 , 282 , 119615. [Google Scholar] [CrossRef]

Hu, B.; Xu, L.; Li, Y.; Sun, F.; Wang, Z.; Yang, M.; Zhang, Y.; Kong, W.; Shen, B.; Wang, X.; et al.

Biochar e mediação de Fe²⁺ na produção de hidrogênio por eletrólise da água: efeitos das propriedades físico-químicas dos biochars. *Energy* 2024 , 297 , 131275. [Google Scholar] [CrossRef]

Kani, NC; Chauhan, R.; Olusegun, SA; Sharan, I.; Katiyar, A.; House, DW; Lee, S.-W.; Jairamsingh, A.; Bhawnani, RR; Choi, D.; et al. Conversão sub-volt de biochar ativado e água para produção de H₂ próximo ao equilíbrio via eletrólise da água assistida por biochar. *Cell Rep. Phys. Sci.* 2024 , 5 , 102013. [Google Scholar] [CrossRef]

Afolabi, ATF; Kechagiopoulos, PN; Liu, Y.; Li, C.-Z. Características cinéticas da reforma a vapor e decomposição do etanol usando um catalisador de Ni suportado em biochar. *Fuel Process. Technol.* 2021 , 212 , 106622.

Saraugi, SS; Asare, F.; Gazo, R.; Mohanta, TR; Saha, P.; Routray, W. Uma caracterização abrangente do biochar de resíduos de coco verde produzido por pirólise lenta em diferentes temperaturas e taxas de aquecimento. *Biomass Bioenergy* 2026 , 207 , 108728. [Google Scholar] [CrossRef]

Sun, H.; Ying, Z.; Chen, X.; Zheng, X.; Dou, B.; Cui, G. Efeitos do pré-tratamento na reação de oxidação do biochar e na produção de hidrogênio na eletrólise da água assistida por biochar lignocelulósico. *Int. J. Hydrogen Energy* 2025 , 99 , 752–760. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, G.; Li, Q.; Dzakpasu, M.; Gao, X.; Yuwen, C.; Wang, XC. Impactos de diferentes tipos de biochar na promoção da produção de hidrogênio durante a codigestão fermentativa de resíduos alimentares e lodo de esgoto desidratado.

Xia, C.; Surendran, S.; Ji, S.; Kim, D.; Chae, Y.; Kim, J.; Je, M.; Han, M.-K.; Choe, W.-S.; Choi, CH; et al. Um catalisador de biochar multifuncional autodopado com enxofre para a eletrólise da água e um supercapacitor a partir de flores de *Camellia japonica*. *Carbon Energy* 2022 , 4 , 491–505. [Google Scholar] [CrossRef]

Buentello-Montoya, D.; Zhang, X.; Li, J.; Ranade, V.; Marques, S.; Geron, M. Desempenho do biochar como catalisador para reforma a vapor de alcatrão: efeito da estrutura porosa. *Appl. Energy* 2020 , 259 , 114176. [Google Scholar] [CrossRef]

Liu, Y.; Lyu, Z.; Wang, S.; Zhang, Y.; Wang, J.; Chen, Z.; Wang, J. Ativação e funcionalização de catalisadores à base de biochar obtidos de lodo de esgoto e talos de algodão para melhorar a produção de gás rico em hidrogênio. *J. Environ. Chem. Eng.* 2025 , 13 , 117665. [Google Scholar] [CrossRef]

Ertaş, C.; Kayan, DB Atividade eletrocatalítica do nanocompósito ZnCoNi suportado em biochar para produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água. *Int. J. Energy Stud.* 2025 , 10 , 1073–1089. [Google Scholar] [CrossRef]

An, M.; Yang, Z.; Zhang, B.; Xue, B.; Xu, G.; Chen, W.; Wang, S. Construção de heterojunção do tipo S de TiO_2 de fase anatase-rutilo modificada com biochar para desempenho aprimorado de degradação fotocatalítica e evolução fotocatalítica de hidrogênio. *J. Environ. Chem. Eng.* 2023 , 11 , 110367. [Google Scholar] [CrossRef]

Aviso/Nota do Editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são de exclusiva responsabilidade dos autores e colaboradores individuais, e não dos editores. Os editores se eximem de qualquer responsabilidade por danos a pessoas ou bens decorrentes de ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.

© Este artigo é de acesso aberto distribuído sob os termos e condições da licença Creative Commons Attribution (CC BY).

Tradução dos artigos internacionais pelo Comitê de Estudos da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e do Instituto Brasileiro de Bioenergia e Desenvolvida pela equipe técnica e de consultoria da Brasil Biomassa e Energia Renovável





Revisão dos métodos de aprimoramento do biochar para sua aplicação em processos de conversão termoquímica e recuperação de materiais crítico

Karoll Payam Danesh 1, Matteo Prussi 1, Andrea Salimbeni 2, Viviana Negro e David Chiaramonti 1,2,*

1 Departamento de Energia — DENERG, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi, 10129 Torino, Itália

2 Consórcio de Energias Renováveis para Pesquisa e Demonstração (RECORD), Viale Kennedy 182, 50038 Scarperia, Itália

Resumo

Com o rápido aumento da geração de resíduos sólidos em todo o mundo, são necessárias abordagens sustentáveis para a recuperação de recursos, considerando a proteção ambiental. Como uma das estratégias emergentes nos últimos anos, o biochar tem demonstrado grande potencial devido à sua alta estabilização de carbono, porosidade ajustável e capacidade de personalização. Esta revisão concentra-se na avaliação crítica das tecnologias disponíveis para o aprimoramento do biochar, com o objetivo específico de melhorar sua funcionalidade físico-química e a recuperação de materiais críticos, em consonância com as metas da economia circular. Revisamos sistematicamente as metodologias de ativação físico-química, funcionalizações e abordagens de lixiviação, considerando seus efeitos na área superficial, porosidade e química dos grupos funcionais. Damos especial atenção à dupla funcionalidade do biochar aprimorado:

(i) como suporte catalítico para processos termoquímicos e (ii) como meio para a reciclagem de nutrientes essenciais (por exemplo, fósforo, potássio, magnésio, cálcio). Evidencia-se que a ativação personalizada pode aprimorar ainda mais sua adsorção e eficiência catalítica, bem como promover a extração de nutrientes quase totais. Esta revisão posiciona o biochar avançado como uma tecnologia multifuncional facilitadora para a produção sustentável de materiais, ciclagem de nutrientes e valorização de resíduos na bioeconomia circular.

Palavras-chave: biochar ; métodos de aprimoramento ; recuperação de materiais ; lixiviação química

1. Introdução

O aumento exponencial na produção de resíduos em todos os setores tornou-se um grande fardo global, resultando em séria poluição ecológica e ameaças à saúde ambiental e pública, uma vez que atrai organismos causadores de doenças [1 , 2].

As opções convencionais de gestão de biorresíduos, incluindo aterros sanitários, são menos desejáveis devido aos seus impactos ambientais, sociais e econômicos, como a ocupação de terras valiosas, a produção de gases de efeito estufa (GEE), como o metano, e o potencial de contaminação do solo e das águas subterrâneas. A produção mundial de resíduos sólidos deverá aumentar de 2,01 bilhões de toneladas por ano para impressionantes 3,40 bilhões de toneladas até 2050, daí a necessidade de soluções criativas e sustentáveis para a gestão de resíduos [3 , 4].

Em 2023, o setor global de resíduos sólidos gerou cerca de 173,2 milhões de toneladas de CO₂ equivalente , com aproximadamente 70% provenientes de lixões a céu aberto, uma prática ainda utilizada em muitos países de baixa e média renda.

Essas projeções, ilustradas na Figura 1, sugerem que as emissões em um cenário de manutenção do status quo poderiam atingir 203,4 Mt CO₂eq em 2030 e 289,5 Mt CO₂eq em 2050, caso não haja mudanças nas práticas existentes. Isso ressalta a necessidade de desenvolver soluções mais sustentáveis e sistêmicas. A economia circular (EC) oferece um caminho alternativo, enfatizando a prevenção de resíduos, a recuperação de materiais e os fluxos de recursos em circuito fechado [5]. A implementação da EC no setor de resíduos poderia nos aproximar significativamente da meta de emissões líquidas zero até 2050. A transição de sistemas lineares para circulares de resíduos não é apenas fundamental para atingir as metas de redução de GEE, mas também representa uma importante melhoria na eficiência de recursos, prevenindo o descarte de resíduos perigosos e outros fluxos de resíduos que degradam o meio ambiente, com potenciais benefícios em apoio à economia circular e à bioeconomia [6].

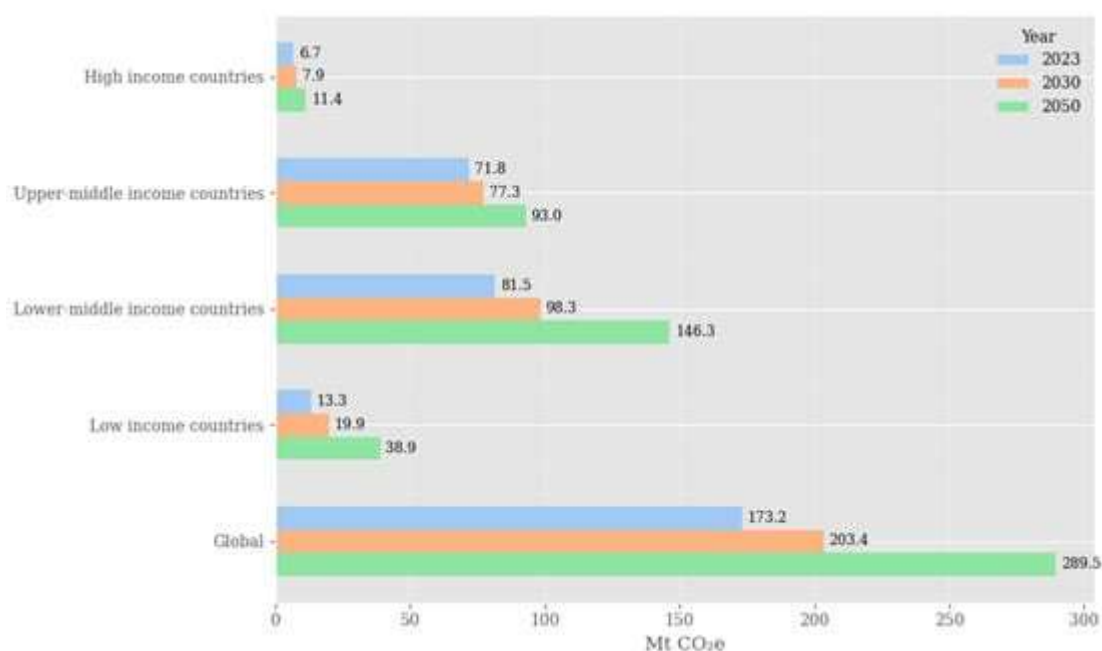


Figura 1. Emissões globais estimadas de GEE da gestão de resíduos sólidos por grupos de rendimento para os anos de 2023, 2030 e 2050. Elaborado a partir de: [7].

Uma abordagem promissora é a conversão de biorresíduos em biochar por meio da carbonização. Esse método não apenas reduz o desperdício, mas também recupera matérias-primas, representando um passo inteligente em direção a sistemas circulares e com uso eficiente de recursos [8].

O biochar resultante pode ser modificado para apresentar alta área superficial, porosidade ajustável e rica química de superfície, o que justifica seu uso em aplicações como sequestro de carbono, captura de CO₂, imobilização de metais pesados e remoção de micropoluentes orgânicos de águas residuais [9]. Crucialmente, durante as operações de aprimoramento do biochar, é possível recuperar materiais como fósforo, potássio, magnésio e cálcio, que são considerados matérias-primas críticas pela União Europeia devido à sua escassez e demanda crescente [10].

O biochar é tipicamente produzido por meio da pirólise lenta de biomassa lignocelulósica a temperaturas que variam de 400 a 750 °C e em ambientes com oxigênio limitado. O biochar derivado é um sólido rico em carbono que contém quantidades variáveis de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo e minerais de cinzas.

A temperatura de processamento, o tempo de residência, o tipo de reator e as etapas de pré-tratamento podem afetar as características físico-químicas do biochar produzido. Essas variáveis de processo governam essencialmente o grau de carbonização e o desenvolvimento de características superficiais que definem o funcionamento do biochar em diversas aplicações. Etapas como secagem, moagem e ativação podem aprimorar ainda mais o desempenho e a funcionalidade do biochar [11]. O teor de cinzas no biochar é composto por minerais como fósforo, cálcio, alumínio, ferro, potássio e silício, que variam dependendo das fontes de matéria-prima [12].

Seu potencial para armazenamento de carbono a longo prazo se deve à alta proporção (frequentemente acima de 87%) de carbono estável e resiliente que ele contém [13].

O biochar também apresenta desempenho promissor como catalisador multifacetado em diversas reações, incluindo, entre outras, craqueamento de metano, produção de biodiesel e purificação de gás de síntese [14 , 15].

Devido às suas propriedades, como alta porosidade e teor de carbono, e ao seu custo potencialmente menor, o uso de biochar como alternativa aos catalisadores tradicionais à base de metal sólido demonstra um potencial interessante [16 , 17].

Dois características físico-químicas principais, incluindo grupos funcionais de superfície e a dispersão de nanopartículas metálicas nas superfícies do biochar, desempenham um papel crucial no aumento de seu desempenho catalítico.

Além disso, propriedades como Área Superficial Específica (SSA), poros e sua natureza hidrofóbica também impactam a eficácia em sua aplicação como catalisador [18].

Com base na multifuncionalidade bem estabelecida do biochar nos contextos ambiental, agrícola e industrial, a aplicação conjunta do biochar por meio de métodos de aprimoramento, visando a recuperação de materiais como fertilizantes, e a aplicação do biochar ativado como catalisador no craqueamento de metano, produção de biodiesel, aprimoramento de gás de síntese e até mesmo na remediação de contaminantes ambientais, constitui uma abordagem derivada que aborda simultaneamente a recuperação de recursos e a valorização de resíduos.

Isso representa uma estratégia vantajosa para todos, que atende às necessidades das abordagens da bioeconomia circular.

Embora exista uma vasta literatura disponível sobre a produção, as propriedades e as aplicações do biochar, a contribuição original deste trabalho reside na análise aprofundada das ativações físico-químicas integradas e em estágio único, no desenvolvimento subsequente de vias para o aprimoramento das propriedades do biochar, tanto catalíticas quanto adsorptivas (aumento da área superficial, porosidade e grupos funcionais projetados), bem como na recuperação de nutrientes valiosos (por exemplo, fósforo, potássio, magnésio) a partir de matérias-primas derivadas de resíduos. Essa dupla aplicação serve para contextualizar o processo de produção de biochar no âmbito da bioeconomia circular de valorização de resíduos e fornecimento de recursos. Além disso, este artigo integra desenvolvimentos, incluindo as compensações ambientais e o estabelecimento do biochar como uma plataforma versátil para conectar a produção sustentável de materiais com a recuperação de nutrientes e as ambições de economia circular.

2. Métodos de Produção de Biochar

Existem vários processos principais (ver Figura 2) para a produção de carvão vegetal, que diferem em termos de flexibilidade da matéria-prima e parâmetros operacionais, bem como na qualidade e rendimento dos produtos resultantes. Entre as técnicas prevalentes, destacam-se a pirólise lenta e a pirólise intermediária, sendo a pirólise lenta a abordagem mais eficiente para a geração de biocarvão de qualidade substancial, considerando a retenção de carbono e o maior tempo de residência [19]. Vale mencionar dois métodos adicionais de pré-tratamento para a transformação do carbono da biomassa: a torrefação e a carbonização hidrotérmica (HTC), cujos produtos sólidos apresentam estruturas diferentes em comparação com o biocarvão.

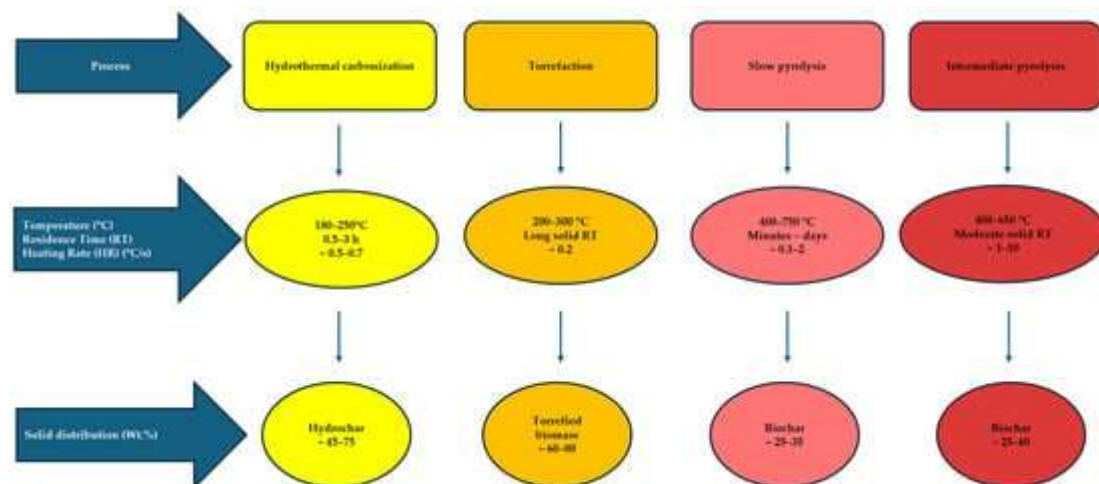


Figura 2. Parâmetros operacionais e distribuição típica de sólidos em diferentes processos [20 , 21 , 22].

2.1. Carbonização Hidrotérmica (HTC)

A carbonização hidrotérmica é um processo termoquímico que transforma biomassa úmida (75–90% de teor de água, sem necessidade de etapa de pré-tratamento por secagem [23]) em um produto rico em carbono chamado hidrocarvão. Nesse processo, a biomassa úmida é aquecida a 180–280 °C em água sob pressão (10–40 bar). A reação produz três principais produtos: hidrocarvão (um material combustível sólido), água de processo (rica em matéria orgânica dissolvida) e uma pequena quantidade de gás (principalmente nitrogênio e dióxido de carbono, representando aproximadamente 1–2% da entrada), cujo rendimento pode variar de acordo com a composição da alimentação [24]. A produção de hidrocarvão geralmente requer menor consumo de energia do que a produção de biocarvão. Ele apresenta potencial como substituto do carvão devido ao seu poder calorífico superior (PCS) comparativamente alto [25]. Em comparação com o biocarvão, o hidrocarvão possui menor teor de carbono e cinzas, além de menor área superficial específica e volume de poros.

2.2. Torrefação

A torrefação é um processo de pré-tratamento a temperatura moderada, no qual a biomassa é aquecida lentamente a cerca de 200–300 °C por um curto período antes da pirólise. Esse processo produz um sólido leve e poroso, rico em carbono e com teor de água reduzido, que, em termos de densidade energética e moabilidade, é mais adequado para manuseio, armazenamento e transporte do material [26].

O rendimento total de carbono é influenciado pela temperatura de tratamento, tempo de residência, matéria-prima e atmosfera do forno. Por exemplo, a lignina da faia começa a se decompor a aproximadamente 200 °C, a maior parte da hemicelulose a cerca de 230 °C e a celulose a temperaturas bem acima de 270 °C [27]. Em operações em escala piloto com pellets de madeira dura e capim-elefante, foram relatados rendimentos sólidos superiores a 77% em peso [28]. A área superficial limitada, a menor porosidade e a instabilidade da biomassa torrificada a tornam útil como combustível, mas não para processos ambientais e catalíticos [29].

2.3. Pirólise Lenta

A pirólise lenta é reconhecida como um método adequado para converter biomassa em um produto sólido estável enriquecido com carbono e elementos valiosos (fósforo, etc.), dependendo da matéria-prima [30].

Este processo termoquímico é bem conhecido e oferece uma maneira sustentável de produzir pirocarvão a partir de biomassa. Na pirólise lenta, aproximadamente 50% do teor de carbono da matéria-prima pode ser convertido permanentemente em uma estrutura de carbono estável [17].

Juntamente com o biochar, outras frações condensáveis (também conhecidas como bio-óleo) e não condensáveis (pirogás) são produzidas.

Essas frações podem ser valorizadas e/ou utilizadas para suprir a demanda energética do processo. No contexto do processo de pirólise lenta com recuperação de energia (Figura 3), o rendimento e a qualidade do biochar dependem fortemente dos parâmetros do processo. Temperaturas mais baixas, taxas de aquecimento mais lentas, tempos de residência mais longos e tamanhos de partículas maiores tendem a aumentar o rendimento de carvão, pois promovem reações secundárias que fixam o carbono na fase sólida [31]. A composição da matéria-prima também é importante, uma vez que a biomassa com alto teor de lignina geralmente gera mais biochar devido à sua maior estabilidade térmica em comparação com a celulose e a hemicelulose [32]. Embora as condições operacionais ótimas dependam das propriedades da matéria-prima, a pirólise lenta geralmente segue uma tendência em que condições de pirólise mais moderadas favorecem a recuperação de carbono no biochar; porém, temperaturas mais altas e taxas de aquecimento mais rápidas levam a uma mudança na distribuição da produção para bio-óleo e pirogás [33].

Em geral, como os processos de pirólise intermediária e rápida utilizam taxas de aquecimento mais elevadas, o rendimento de biochar é tipicamente menor em comparação com a pirólise lenta [34]. De acordo com os estudos relatados, a uma temperatura de 400 °C, ao aumentar a taxa de aquecimento de 5 °C/min para 30 °C/min, o rendimento de biochar diminui de 34,2 para 29,7 por cento [35]. Essas considerações permitem observar que as condições do processo e a qualidade da matéria-prima afetam significativamente tanto o rendimento do produto final quanto suas características físico-químicas.

Sustentabilidade 17 10194 g003

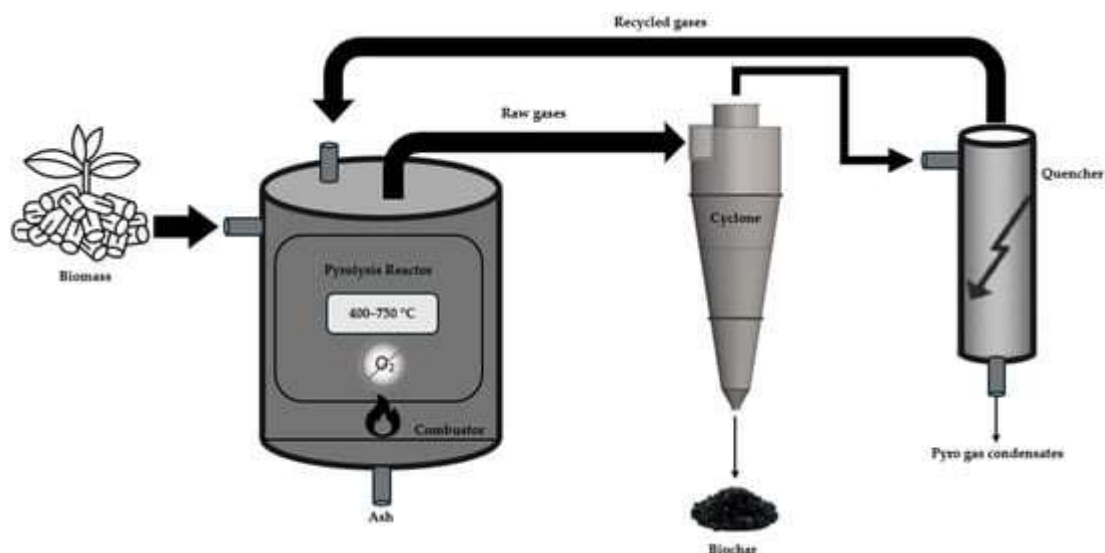


Figura 3. Esquema conceitual básico da pirólise lenta para produção de biochar [36].

O biochar produzido por pirólise lenta (pirochar) com baixa taxa de aquecimento e alto tempo de residência é geralmente mais estável estruturalmente, possui maior teor de carbono e maior porosidade, sendo adequado para processos de conversão em alta temperatura como meio, podendo inclusive auxiliar na remediação de poluentes. Em outras palavras, o pirochar é mais estável a longo prazo como condicionador e corretivo para solos e uso ambiental [37].

A produção de biochar envolve a decomposição de materiais orgânicos e a remoção de compostos voláteis, resultando em uma matriz estável com estruturas de carbono aromáticas aprimoradas. Essas características estruturais são cruciais para as funções catalíticas do biochar, pois contribuem para sua grande área superficial, maior porosidade e abundância de sítios ativos, o que facilita as interações químicas e torna o biochar um catalisador eficaz [38].

Conseqüentemente, a biomassa torrefada obtida a baixas temperaturas tem suas propriedades de combustível significativamente aprimoradas, mas ainda não possui a aromaticidade e a área superficial necessárias para aplicações mais avançadas [39].

O hidrocarvão HTC também contém altos níveis de voláteis e maiores relações H/C ($>1,4$), sendo mais adequado como aditivo para o solo e para a reutilização de nutrientes do que para aplicações catalíticas [40]. Por outro lado, o biocarvão de pirólise apresenta menores relações H/C e O/C ($<0,7$), alta aromaticidade e estabilidade estrutural, além de porosidade bem ajustada. Ademais, a natureza alcalina inerente e o rico conteúdo de elementos minerais do biocarvão derivado da pirólise, com os abundantes grupos funcionais de superfície (ácidos fenólicos e carboxílicos), também contribuem para suas propriedades catalíticas [41]. As propriedades combinadas descritas acima tornam o biocarvão de pirólise lenta um potencial candidato como material multifuncional para adsorção, aplicações ambientais e suporte de catalisadores [14].

3. Biochar como suporte catalítico

O biochar pode estabilizar e distribuir uniformemente as nanopartículas em sua superfície, o que o torna um catalisador muito eficaz, pois possui sítios ativos para diferentes reações. A estrutura mesoporosa permite uma boa dispersão de metais como manganês, cobre, cobalto e ferro, e sua imobilização nos poros, prevenindo a lixiviação para os sistemas aquosos [42]. Suas características únicas incluem heterogeneidade (fácil isolamento das misturas reacionais), bifuncionalidade (promovendo reações de transesterificação e esterificação), reciclabilidade, porosidade e não grafitação, o que o torna resistente ao processo de cristalização em altas temperaturas [43]. Comparado a outros catalisadores, o biochar é de baixo custo, degradável e reciclável, sendo, portanto, útil em uma ampla gama de aplicações nas áreas de energia e meio ambiente, como produção de biodiesel, craqueamento de metano e alcatrão, gás de síntese e remoção de poluentes [44].

Por exemplo, os elementos inorgânicos nativos, incluindo Fe e K, no biochar aumentam a atividade de craqueamento de alcatrão [45] ou o uso de biochar como suporte é um catalisador ecologicamente correto e eficiente para o craqueamento de metano para produzir hidrogênio [46]. No entanto, o biochar bruto geralmente apresenta a desvantagem de baixa porosidade, baixa área superficial e baixo desempenho catalítico, uma vez que possui muitos grupos funcionais na superfície (como -OH, C=O, etc.) e precisa ser modificado para melhorar suas funções (incluindo ativação da matéria-prima, controle da síntese e funcionalização da superfície) [47]. Ativações e modificações de superfície para biochar exibem aumento significativo na porosidade e eficiência, tornando-o amplamente utilizado em biorrefinarias e na produção de energia [48].

3.1. Definição das principais propriedades do biochar como catalisador

Nos últimos anos, o biochar tem sido considerado um catalisador para processos termoquímicos graças a algumas qualidades essenciais: ele suporta altas temperaturas, resiste a venenos químicos como o enxofre e contém metais benéficos como o ferro. Esses metais atuam como sítios ativos, tornando a reação mais eficiente e estável [49]. Para melhorar seu desempenho, a estrutura do biochar deve ser otimizada. Uma área superficial maior e um volume de poros mais elevado ajudam a reter melhor o carbono durante a reação. Tratamentos térmicos também podem criar falhas intencionais e defeitos estruturais que atuam como pontos energéticos onde as fortes ligações CH do metano podem ser quebradas mais facilmente [50]. Embora a temperatura e a composição do gás sejam importantes, é o projeto do catalisador que, em última análise, determina a quantidade de metano que realmente se converte [51]. No resumo da discussão sobre o aprimoramento do biochar de acordo com a pesquisa, os seguintes parâmetros devem ser levados em consideração.

3.1.1. Funcionalidade da Superfície

O biochar é inerentemente composto por grupos funcionais oxigenados, incluindo hidroxila (-OH), carboxila (-COOH) e carbonila (-C=O), que melhoram significativamente sua atividade catalítica [52]. O desempenho aprimorado deve-se em grande parte à presença de sítios ativos na superfície que promovem tanto a adsorção quanto os processos redox, posicionando o biochar como um material com considerável potencial em diversas aplicações [53]. Estudos têm demonstrado as funções catalíticas do biochar e focado na contribuição de grupos contendo oxigênio na remoção de poluentes e na conversão catalítica [54]. A funcionalização, como a sulfonação ou a deposição de metais, contribui ainda mais para a atividade catalítica. Por exemplo, o biochar sulfonado é considerado um catalisador ácido sólido de alta eficiência na hidrólise da celulose [55].

3.1.2. Elementos Inorgânicos

Outra característica importante do biochar é a presença, ainda que pequena, de quantidades significativas de compostos inorgânicos como potássio, sódio, cálcio, magnésio e ferro. A matéria-prima utilizada na produção do biochar é um fator importante que controla a quantidade e a composição desses minerais. Por exemplo, o biochar preparado a partir de plantas lenhosas, herbáceas ou aquáticas geralmente contém significativamente menos substâncias inorgânicas do que aquele preparado a partir de outras fontes [56].

Para investigar o impacto de diferentes tipos de compostos metálicos na atividade de catalisadores de carbono, dois métodos principais de aprimoramento podem ser utilizados [57 , 58]: a primeira abordagem envolve a remoção de metais de materiais de carbono com alto teor de cinzas que contêm vários metais por meio de tratamento ácido.

O segundo método introduz diferentes metais em catalisadores à base de carbono com baixo teor de cinzas para avaliar seu efeito no desempenho catalítico.

3.1.3. Tamanho das Partículas

Em processos catalíticos, o efeito do tamanho das partículas na transferência de massa, bem como na taxa de reação, é importante, porque com partículas catalíticas maiores, a resistência interna à transferência de massa é maior, o que reduz a cinética de reação mais lenta [59]. Vários estudos comprovam que partículas catalíticas menores proporcionam uma maior área superficial catalítica, o que é benéfico para a transferência de massa e para a reação do processo [60 , 61]. No entanto, partículas menores também podem resultar em uma maior queda de pressão no reator, e sua aplicação prática pode ser limitada [62].

Além das características do biochar, existem também propriedades térmicas e mecânicas excepcionalmente estáveis do biochar que podem ser bem empregadas em processos de alta temperatura. Acredita-se que essa estabilidade inerente não só garante o desempenho estável do biochar em condições ambientalmente adversas, mas também contribui para a reutilização do biochar como catalisador em múltiplos ciclos [17].

4. Revisão das técnicas de aprimoramento do biochar

A qualidade do biochar pode ser melhorada utilizando uma variedade de tratamentos pós-produção, como ativação por gás, redução, exposição a ácidos e álcalis, oxidações e tratamento com íons metálicos [63].

Recentemente, tem havido um crescente interesse em melhorar a capacidade do biochar de absorver substâncias, expandindo sua área superficial, aumentando sua porosidade ou introduzindo grupos funcionais [64].

A seleção de um método específico depende de sua aplicação final pretendida [65]. Os reagentes químicos empregados no aprimoramento do biochar podem induzir alterações em suas características físico-químicas, consequentemente aumentando suas capacidades de sorção.

Os processos de aprimoramento aumentam significativamente a eficácia do biochar e ampliam suas aplicações potenciais, especialmente na remediação de ambientes contaminados por pesticidas [66].

4.1. Métodos para o aprimoramento do biochar

Os métodos de aprimoramento visam melhorar as propriedades do biochar, ampliando sua gama de aplicações [69]. Os métodos de aprimoramento do biochar são geralmente divididos em dois grupos principais: ativação física e química.

Na ativação física, o material é tratado com gás CO_2 , vapor ou uma combinação de ambos a temperaturas superiores a $700\text{ }^\circ\text{C}$ para aumentar sua porosidade e área superficial.

Durante esse processo, átomos de carbono altamente reativos são eliminados [70 , 71]. A ativação química envolve o uso de substâncias alcalinas, como NaOH, KOH e hidróxidos de metais alcalino-terrosos (Ca(OH)_2) ou ácidos (como HCl, H_3PO_4 e HNO_3) durante a carbonização ou após a produção do biochar para modificar ainda mais suas propriedades [72].

4.1.1. Métodos Físicos

A porosidade do biochar pode ser aumentada por ativações físicas, como moagem de bolas, e também pelo uso de meios como ar, CO₂ ou vapor em altas temperaturas. Esse processo geralmente ocorre em duas etapas: primeiro, a biomassa sofre uma transformação termoquímica e, em seguida, é ativada para desenvolver uma estrutura porosa [73].

Em geral, o aumento da temperatura de ativação leva a uma maior liberação de matéria orgânica volátil, o que, por sua vez, gera mais poros. Poros maiores que 50 nm são classificados como macroporos, aqueles entre 2 e 50 nm são denominados mesoporos e poros menores que 2 nm são chamados de microporos. A formação de poros na superfície do biochar é uma característica física fundamental que ajuda a dissolver poluentes tóxicos durante a adsorção e aumenta seu desempenho catalítico [74].

4.1.1.1. Tratamento de oxidação térmica

Após o biochar ser aquecido à temperatura desejada (800–900 °C) por 1–2 h, ele é exposto a gases de hidrogênio, ar ou argônio, e novos grupos funcionais são formados em sua superfície [75]. Como ilustrado na Figura 4 , o aquecimento do biochar em ambiente de ar altera significativamente sua química superficial, o que, por sua vez, influencia sua capacidade de absorver compostos orgânicos e inorgânicos. De modo geral, o tratamento térmico aumenta a adsorção de substâncias polares e apolares. O tratamento térmico pode aumentar significativamente a porosidade e os grupos ácidos superficiais do biochar e cria novos sítios de adsorção no biochar para moléculas orgânicas/inorgânicas. A temperatura ideal para a oxidação térmica em ar está na faixa de 400–500 °C. Considerando a potencial variabilidade relacionada à matéria-prima, o biochar produzido a partir de matérias-primas ricas em lignina é preferível para o tratamento de oxidação térmica em ar [76 , 77 , 78].

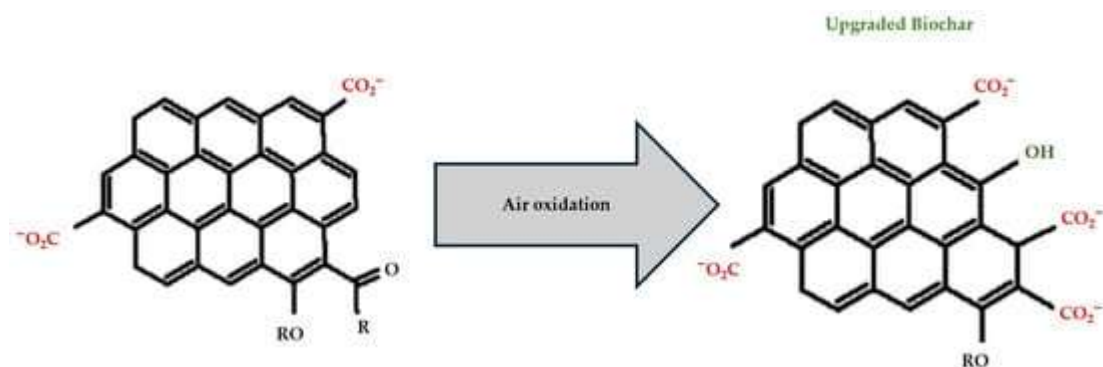


Figura 4. Mecanismo geral de tratamento térmico do biochar por meio de oxidação com ar (Cores na estrutura: vermelho = grupos funcionais oxigenados, verde = novas funcionalidades, preto = estrutura de carbono). Adaptado de [76], *Environmental Functional Materials*, 1 (2022), 187–195. © 2022 O Autor. Publicado pela Elsevier BV em nome da KeAi Communications Co., Ltd.

4.1.1.2. Ativação do Steam

Neste processo, a matéria-prima é primeiro aquecida a uma temperatura entre 300 e 700 °C durante 1 a 2 h na ausência de oxigênio. Como segunda etapa, a amostra decomposta é submetida a um fluxo de vapor a uma temperatura de 800 a 900 °C durante 30 min a 3 h, a uma taxa de 2,2 a 5 mL/min [79]. O vapor melhora as propriedades do biochar removendo elementos resultantes da combustão incompleta durante a decomposição térmica e oxidando a superfície do carbono. O vapor em alta temperatura reage com o carbono, removendo átomos de carbono como CO ou CO₂, desenvolvendo assim uma estrutura mais porosa [80].

4.1.1.3. Ativação com CO₂

O CO₂ pode ser usado como agente oxidante, atuando entre 200 e 900 °C, resultando na formação de poros e no aumento dos já existentes. O CO₂ geralmente não é muito reativo, mas quando combinado com vapor em temperaturas mais elevadas, torna-se ativo.

Essa reatividade aumentada auxilia na produção de biochar com dimensões de poros semelhantes [70]. A reatividade do CO_2 aumenta com a temperatura, facilitando sua forte interação com o biochar por meio da reação inversa de Boudouard. O carvão (C) é ativado pela seguinte reação: $\text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}$ [81]. Durante a reação, o dióxido de carbono (CO_2) é reduzido e se liga à superfície do carbono, produzindo um óxido superficial (C(O)) e monóxido de carbono (CO). A estrutura do biochar após a ativação com vapor e a purificação com CO_2 é mostrada na Figura 5. O óxido superficial (C(O)) é então dessorvido, o que refina ainda mais a estrutura porosa do carvão [82].

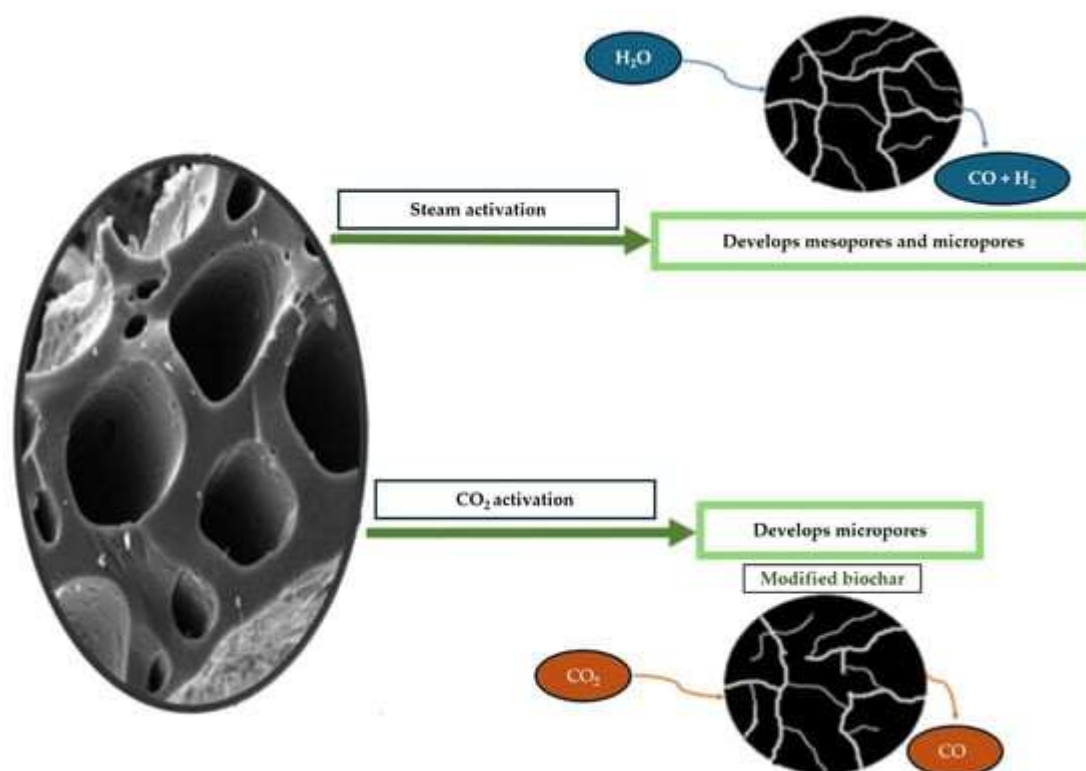


Figura 5. A estrutura microporosa do biochar se forma como resultado da ativação por vapor e do tratamento com CO_2 .

Adaptado de [86], Biomass Conversion and Biorefinery, 14 (2020), 5759–5770. © 2020 Springer-Verlag GmbH Germany. Reproduzido com permissão.

4.1.1.4. Moagem de bolas

Outro método de modificação física é a moagem de bolas, que representa um método livre de solventes, ambiental e conveniente. Desta forma, o biochar é submetido à moagem mecânica, sozinho ou com aditivos sólidos pulverizados, a fim de melhorar suas propriedades físico-químicas. A moagem de bolas tem a capacidade de produzir um diâmetro médio menor, aumentar a área superficial específica e adicionar grupos funcionais, etc., levando a uma alta taxa de permeabilidade de espécies adsorvidas e eficiência catalítica ou dispersão de mistura em compósitos [87].

4.1.2. Métodos Químicos

O processo de ativação envolve o uso de diversos agentes, incluindo bases como KOH e NaOH, ácidos como HNO₃ e H₃PO₄ , oxidantes como H₂O₂ e agentes sulfonantes (SO₃H) , e ZnCl₂ . A escolha do método de ativação depende de como o biochar será utilizado. Se for necessário atrair elementos com carga negativa, ele é tratado com bases para criar uma carga positiva em sua superfície, melhorando sua capacidade de se ligar à substância alvo. Por outro lado, a ativação ácida pode ser usada quando o biochar precisa capturar elementos com carga positiva [88]. Além disso, a ativação ajuda a remover a umidade e os compostos voláteis que podem levar à formação de alcatrão, aumentando, em última análise, sua porosidade e rendimento de carbono [89]. O biochar ativado é cuidadosamente lavado para remover quaisquer resíduos químicos e expor grupos funcionais que aumentam sua capacidade de absorver diferentes substâncias.

4.1.2.1. Ativação alcalina

Neste processo, o biochar é tratado com reagentes como hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de amônio (NH₄OH) [90].

Em um estudo de Ma [91], o biochar produzido a partir de serragem por meio de pirólise em temperaturas entre 300 e 700 °C foi tratado com uma solução de hidróxido de potássio (KOH) 2 mol/L por 5 h. Durante esse processo, ocorreram várias reações químicas, conforme descrito abaixo:



(7)



(8)

A adição de mais grupos funcionais contendo nitrogênio à estrutura do biochar é possibilitada pelo uso de NH₄OH, que aumenta o nitrogênio elementar no biochar [67].

Nessa etapa, grupos -NH₂ foram introduzidos na superfície do biochar.



(9)

Após ser tratado com NH₄OH, devido à remoção significativa de cinzas dos poros, a superfície do biochar apresentou uma textura pós-tratamento mais lisa. A aplicação de álcalis levou ao afinamento dos microporos, aumentando a SSA do biochar [68].

Em outro estudo de Haque et al. [92], o carvão ativado (CA) foi obtido por meio de carbonização tradicional e ativação com KOH, enquanto a sílica amorfa foi derivada da casca de arroz usando extração alcalina seguida de precipitação ácida. A temperatura ideal para a produção de CA foi determinada como sendo 700 °C. O CA produzido por extração alcalina apresentou maior atividade do que o obtido por ativação com KOH.

4.1.2.2. Ativação ácida

O tratamento ácido também pode modificar as características da superfície do biochar, como sua textura, porosidade e área superficial, e seus efeitos variam de acordo com os tipos e as concentrações dos ácidos [93]. A aplicação de biochar acidificado tem sido reconhecida por sua notável eficácia como suporte catalítico para processos termoquímicos, para melhorar a qualidade do solo e para promover a produtividade agrícola. Sabe-se que a acidificação do biochar influencia diversas propriedades físico-químicas, promovendo condições favoráveis à retenção de nutrientes, capacidade de troca iônica positiva e fertilidade do solo [94]. Os ácidos clorídrico (HCl), sulfúrico (H₂SO₄), fosfórico (H₃PO₄) e nítrico (HNO₃) são tipicamente usados no aprimoramento do biochar.

Os resultados experimentais [95 , 96 , 97] mostram que o biochar modificado com a maior área superficial específica foi obtido por meio de tratamento ácido seguido de ativação com KOH. Semelhante à ativação básica, o aprimoramento ácido aumenta o número de grupos funcionais contendo oxigênio no biochar [98]. Como resultado, a carga superficial e os grupos funcionais são alterados, levando a um ponto de carga zero mais baixo e a uma maior pureza superficial. Abaixo estão algumas reações importantes relatadas para o aprimoramento ácido do biochar usando diferentes ácidos.

O ácido sulfúrico reage com os átomos de carbono no biochar através do seguinte processo químico [99]:



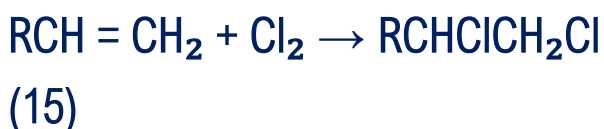
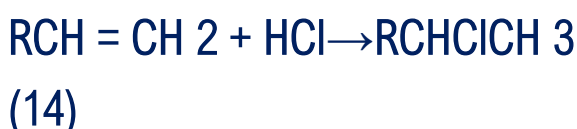
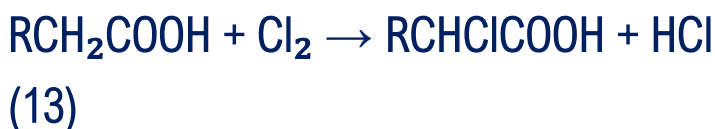
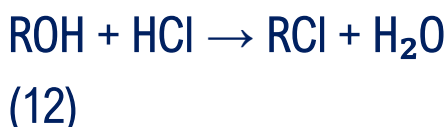
(10)

O ácido fosfórico interage com os grupos hidroxila (-OH) na superfície do biochar, formando ligações éster.

Esse processo ajuda a integrar os átomos de fósforo na estrutura do carbono, melhorando as características químicas do material.



O ácido clorídrico sofre substituição nucleofílica no biochar [100]:



Durante o processo de melhoria com ácido nítrico (HNO_3), as estruturas aromáticas dentro do biochar sofrem reações químicas com o ácido. Isso resulta na formação de estruturas orgânicas contendo grupos nitro [72]:



Conforme apontado por Kasozi et al. [101], embora as qualidades texturais de um biochar possam não ser melhoradas através do aprimoramento orgânico, sua química de superfície pode ser impactada consideravelmente.

Ácidos orgânicos, como o ácido acético, também impactam as características do biochar. Eles diminuem a porosidade do biochar, ao mesmo tempo que aumentam a formação de novos grupos funcionais na superfície, provavelmente devido a reações de esterificação. Conforme afirmado por Xu et al. [102], o tratamento ácido não altera a área superficial específica (SSA) e o volume total de poros (TPV) do biochar devido ao bloqueio dos poros.

Por moléculas de ácido orgânico adsorvidas. Isso indica que o biochar foi melhorado com ácido cítrico. Tipicamente, um aumento na razão atômica O/C significa uma melhoria na química da superfície do biochar. Grupos carboxílicos estão entre as funcionalidades de superfície identificadas no biochar modificado com ácidos orgânicos. Sheng et al. [103] demonstraram o aprimoramento do biochar derivado de aguapé com ácido cítrico; No estudo, a biomassa foi pirolisada a 300 °C por 2 h em atmosfera de nitrogênio com uma taxa de aquecimento de 5 °C/min, seguida de tratamento com ácido cítrico 0,7 mol/L por 2 h. A aplicação de ácido cítrico levou a uma redução na área superficial específica do biochar, provavelmente devido à dissolução e remoção da lignina durante o tratamento ácido.

O tratamento ácido geralmente extrai metais como ferro, alumínio, titânio, cálcio, sódio e enxofre de catalisadores à base de carbono e adiciona grupos contendo oxigênio, como carboxila, à superfície do biochar [61 , 104]. Embora esse tratamento aumente a área superficial e o volume de poros do biochar, melhorando suas propriedades de sorção, ele também altera sua composição e reatividade. Bases como NaOH e KOH podem reagir com enxofre e minerais importantes encontrados no carvão para formar compostos como silicato e aluminato. Esses compostos podem então ser dissolvidos por ácidos, produtos químicos como ácido sulfúrico e ácido clorídrico, juntamente com outros minerais não utilizados [30].

4.1.3. Métodos Inorgânicos

A utilização de sais, como cloretos ou fosfatos, permite influenciar tanto a estrutura física quanto a química da superfície do biochar. Li et al. [105] observaram uma alteração na superfície do biochar quando este foi tratado com K_3PO_4 ; em seu experimento.

As partículas foram imersas em K_3PO_4 e agitadas por 6 h. Posteriormente, a biomassa impregnada foi submetida à pirólise a $550\text{ }^\circ\text{C}$ por 1 h em atmosfera de nitrogênio, com uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ [106]. Esse procedimento de pré-tratamento resultou em um enriquecimento de $P_2O_7^{4-}$ na superfície do biochar formado a partir da decomposição de HPO_4^{2-} .



(17)

Os componentes gerados contribuem significativamente para a adsorção de metais pesados no biochar. O tratamento do biochar com K_3PO_4 melhorou suas propriedades texturais e química de superfície. Este modificador acelerou a decomposição dos polímeros da biomassa, levando à formação de numerosos grupos à base de oxigênio na superfície do biochar [107].

Em um experimento, o biochar foi tratado por imersão em uma solução contendo 30% de $ZnCl_2$ [98]. Durante esse processo de melhoria, as seguintes transformações químicas ocorreram no biochar:



(18)



(19)

4.1.4 . Atualização de H_2O_2

O biochar também pode ser aprimorado com o uso de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que é frequentemente considerado uma alternativa mais econômica e ambientalmente amigável do que ácidos, bases e sais fortes. Em Tan et al. [108], o biochar foi produzido a partir de talos de colza por meio de pirólise a $600\text{ }^\circ\text{C}$ em atmosfera de nitrogênio, com uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ e um tempo de processamento de aproximadamente quatro horas.

Para aprimorar suas propriedades, o biochar foi tratado com 30% de H_2O_2 por 24 h . Durante esse tratamento, o H_2O_2 reagiu com o biochar, resultando na formação de gás .



(20)



(21)



(22)

As alterações nas propriedades do biochar observadas em vários estudos após diferentes tratamentos de melhoria..

As técnicas de ativação resultam em desempenhos bastante diferentes do biochar. O biochar ativado com KOH apresentou a maior área superficial, atingindo uma SSA de $2183,8 \text{ m}^2 / \text{g}$, e desenvolveu uma quantidade suficiente de microporos , adequada para a remoção de íons de metais pesados e poluentes. As ativações com ZnCl_2 e H_3PO_4 , que obtiveram valores de SSA ($>1000 \text{ m}^2 / \text{g}$) e volumes de poros de até $0,6 \text{ cm}^3 / \text{g}$, resultaram em materiais híbridos microporosos-mesoporosos promissores para catálise e remoção de alcatrão. A ativação física com CO_2 ou O_2 proporcionou melhorias moderadas (SSA de 200 a $850 \text{ m}^2 / \text{g}$) com superfícies potencialmente ativas úteis para o aprimoramento de gás de síntese ou craqueamento de metano, enquanto a ativação com N_2 mostrou -se a menos eficaz (SSA $< 122 \text{ m}^2 / \text{g}$), o que pode ser atribuído tanto à atmosfera não reativa (ambiente inerte) quanto à pequena quantidade de grupos funcionais formados. Os tratamentos combinados químico-físicos permitem uma promoção sinérgica, com um valor de SSA de até $1419 \text{ m}^2 / \text{g}$ e PVs de até $0,83 \text{ cm}^3 / \text{g}$, tendo aplicação potencial em diversas catálises.

5. Discussão comparativa sobre métodos de atualização

Após analisar os prós e os contras de diferentes métodos de ativação e examinar diversos estudos, constatou-se que a ativação do biochar por meio de ácidos como HNO_3 , HCl , H_2SO_4 e H_3PO_4 modifica significativamente os grupos funcionais da superfície do biochar, aumentando o teor de oxigênio, amplificando a polaridade e reduzindo o percentual de cinzas. Diferentes ácidos proporcionam funcionalização superficial única: por exemplo, o tratamento com HNO_3 , que desencadeia nitratação e oxidação, possibilita a ligação de grupos $-\text{NO}_2$ e $-\text{COOH}$ [72] .

Já a ativação com H_3PO_4 forma estruturas contendo fósforo ($\text{P}=\text{O}$ e $\text{P}-\text{OOH}$), que podem formar complexos estáveis com poluentes [119]. Durante o tratamento com HCl , os grupos funcionais oxigenados são intensificados e, principalmente , suas estruturas carbonílicas, como fenóis, éteres e lactonas, são reduzidas.

Tais grupos funcionais, amplamente presentes nas bordas e superfícies externas do biochar, facilitam a hidrofiliabilidade e a polaridade, enquanto a desmineralização por ativação ácida tende a reduzir o teor de cinzas e a carga superficial, o que favorece a atração eletrostática de poluentes catiônicos [120]. Para ácidos, a ativação com HNO_3 não afeta significativamente a área superficial e a porosidade em comparação com HCl , H_2SO_4 e H_3PO_4 .

O tratamento com HNO_3 nos estágios iniciais pode causar o desenvolvimento de microporos e solubilizar as impurezas inorgânicas, resultando em melhoria da área superficial e do volume de poros.

No entanto, a ativação prolongada pode causar a coagulação dos cristalitos e o estreitamento dos poros, reduzindo a variação na porosidade total [121] .

Assim, afirma-se que o H_3PO_4 é um ácido mais fraco, que preserva melhor a estrutura de carbono e é mais eficiente no desenvolvimento de microporos, sendo, portanto, particularmente útil para a engenharia de porosidade. Por outro lado, a ativação alcalina (tipicamente NaOH ou KOH) aumenta os grupos alcalinos e os sítios superficiais não polares do biochar, promovendo assim a adsorção de poluentes aniônicos.

Esses processos aumentam principalmente a área superficial e o volume de poros, e o biochar ativado com KOH apresenta maior área superficial e maior capacidade de adsorção em relação à ativação com vapor [122]. No entanto, um tratamento excessivamente alcalino ou uma temperatura mais elevada durante o processamento podem destruir a estrutura dos poros devido a uma reação de gaseificação vigorosa, o que, por sua vez, resulta em diminuição da área superficial [123]. Do ponto de vista químico, é bem documentado que o KOH deve aumentar os grupos funcionais da superfície (isto é, carboxílicos, alcoólicos e fenólicos), mas os grupos de oxigênio se decompõem com o aquecimento, causando redução da funcionalidade geral e aumento do teor de carbono [124].

Em contraste, a ativação com NaOH recebeu muito menos atenção, embora seja considerada menos cara, menos perigosa e mais ecológica, e o Na^+ pode entrar na estrutura do biochar de forma mais eficaz do que o K^+ devido ao seu raio iônico menor [125].

A ativação física é desenvolvida como uma abordagem ecológica para ativar o biochar, sendo o vapor, o CO_2 e o ar/oxigênio os agentes mais utilizados. O biochar obtido por ativação com vapor apresenta excelente microporosidade e capacidade de adsorção; no entanto, a demanda energética para a produção de vapor para ativação é questionável em termos de eficiência e sustentabilidade [126].

Por outro lado, a ativação com CO_2 favorece a formação de mesoporosidade e é eficiente na acomodação de moléculas grandes, mas suas baixas taxas de ativação e a necessidade de longos tempos de processamento aumentam os requisitos energéticos e a pegada de carbono [94]. A ativação com ar ou oxigênio é a maneira mais simples e econômica de obter carvão ativado, mas apresenta o menor controle e frequentemente resulta em superaquecimento, menor rendimento e baixa estabilidade do biochar [127].

A ativação física, embora evite resíduos tóxicos de reagentes químicos como KOH ou H_3PO_4 e , portanto , seja mais ecológica, apresenta altas necessidades de energia térmica, o que continua sendo uma preocupação ambiental significativa [128].

Geralmente, em comparação com o carvão ativado tradicional, os biochars ativados fisicamente consomem menos em termos de serviços ecossistêmicos, pois são derivados de fontes renováveis com menos insumos químicos, especialmente na área de tratamento de águas residuais [129]. Além disso, as consequências ambientais não se limitam aos custos de carbono; por exemplo, melhorias na qualidade do solo foram registradas para biochars ativados a vapor, enquanto outros métodos de ativação estão associados a potenciais efeitos ecotóxicos [130].

6. Usos potenciais do biochar aprimorado como catalisador à base de carbono em diferentes aplicações

O biochar melhorado apresenta um potencial que vai muito além dos seus usos tradicionais, encontrando funções como suporte catalítico no craqueamento de metano, na produção de biodiesel, no aprimoramento do gás de síntese e até mesmo na limpeza de contaminantes ambientais.

O que o torna especialmente versátil é a forma como as suas propriedades podem ser ajustadas, especialmente para catálise [58 , 131]. Grande parte desta capacidade deriva da sua riqueza mineral natural; elementos como o ferro e o potássio apoiam ativamente os processos catalíticos [45].

6.1. Craqueamento Catalítico do Metano

No conceito de craqueamento de metano, pesquisas sobre a estrutura porosa de um catalisador indicam que catalisadores de carbono com maior teor de meso e macroporos alcançam maior produção de hidrogênio em comparação com aqueles dominados por microporos [132]. Isso ocorre porque a difusão do metano é mais severamente dificultada na presença de microporos, diminuindo a produção de hidrogênio [133]. A Figura 6 , adaptada de Harun et al. [134], ilustra um estudo sobre a produção de hidrogênio via decomposição catalítica de metano com catalisadores de carvão ativado, carvão ativado com rutênio e biochar ativado a 800 °C. É importante mencionar que a eficácia desses catalisadores é influenciada por sua área superficial, visto que uma área maior aumenta a adsorção de metano na superfície do catalisador.

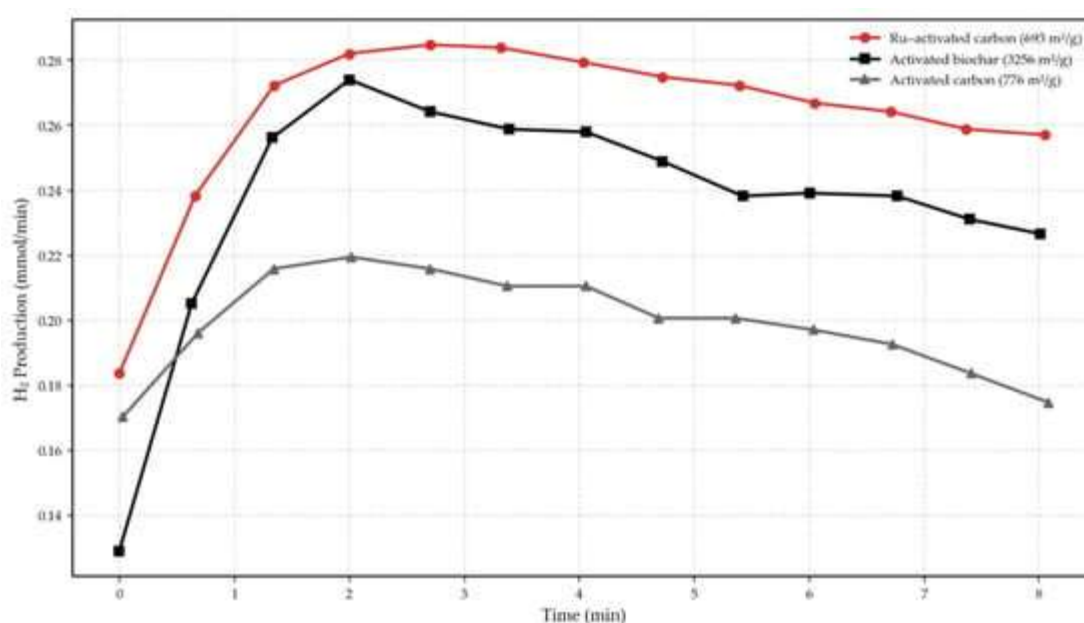


Figura 6. Produção de hidrogênio a partir da decomposição catalítica do metano usando diferentes carvões ativados. Dados elaborados de: [134].

Além disso, Abbas et al. [135] exploraram como a variação do tamanho das partículas afeta a conversão do metano e a taxa de decomposição usando um reator de leito fixo a uma temperatura elevada (850 °C) e um fluxo específico de metano.

Suas descobertas sugeriram que a alteração do tamanho das partículas dentro de uma faixa bastante ampla (de relativamente pequenas a relativamente grandes, especificamente de 135 a 1095 μm) teve pouca influência perceptível na quantidade de metano convertida, na rapidez com que se decompôs ou por quanto tempo o catalisador permaneceu ativo. Outro estudo testou tanto o biochar quanto o carvão ativado na decomposição do metano, e seus resultados mostraram que temperaturas mais altas e concentrações mais baixas de metano melhoraram a conversão.

A 900 °C com apenas 10% de metano em um fluxo de nitrogênio, eles alcançaram 72,3% de conversão com carvão ativado e 66,2% com biochar [49]. Durante os tratamentos ácidos do biochar e extração, alguns metais como Fe, Ni, Al e Ca, catalisadores carregados de carbono mostraram melhoria na eficiência de conversão de metano nos processos de craqueamento de metano [136].

A promessa do biochar estende-se também à reforma seca do metano [137]. Um estudo utilizou um biochar infundido com carboneto de tungstênio, que manteve o desempenho por mais de 500 h.

À medida que as proporções de $\text{CH}_4 / \text{CO}_2$ e as temperaturas aumentaram, a conversão de metano diminuiu, mas a transformação de CO_2 e a produção de hidrogênio cresceram de forma constante [138].

6.2. Apoio à Produção de Biodiesel

O biochar tem se mostrado um catalisador e suporte promissor para reações de esterificação e transesterificação nos processos de produção de biodiesel [139]. Seu baixo custo, flexibilidade e fonte de biorresíduos rica em minerais representam uma alternativa atraente aos catalisadores homogêneos e heterogêneos típicos [140].

A funcionalização é um dos principais fatores que reforçam a atividade catalítica do biochar. Por exemplo, um biochar sulfonado, como catalisador ácido sólido, apresentou um rendimento de biodiesel de aproximadamente 97% a partir de AGL (ácidos graxos livres) e também produziu 88% de produtividade por meio da esterificação e transesterificação simultâneas de óleos vegetais [141].

No entanto, o biochar com alto teor de minerais inorgânicos (como cálcio e potássio) pode desempenhar um bom papel como catalisador básico sólido. Por exemplo, o biochar da casca do palmiste, rico em CaO após calcinação, apresentou um teor de 99% de FAME (ésteres metílicos de ácidos graxos) após a metanálise do óleo de girassol [142 , 143]. Em outro estudo, o biochar de casca de pomelo ativado por KOH alcançou um rendimento de biodiesel de até 98% devido à sua alta basicidade e área de superfície/porosidade aumentada [144].

6.3. Aprimoramento do Gás de Síntese (Reforma do Alcatrão)

O biochar desempenha um papel importante na prevenção da geração de alcatrão durante a gaseificação e pirólise da biomassa e na melhoria da produção de gás de síntese (uma mistura de CO e H₂) [145]. A maior relação H₂ / CO (1,5) relatada foi obtida com biochar fisicamente ativado por CO₂ (900 °C) com grande área superficial específica (SSA) .

E porosidade hierárquica, apresentando excelente desempenho com rendimento de gás de síntese de 78,2% em massa e produção de hidrogênio de 26 mmol H₂ / g de biomassa, com uma eficiência de conversão de energia gasosa de 73% [118]. Ainda assim, o desempenho do biochar pode ser limitado devido à sua porosidade e área superficial restritas.

Para superar essa limitação, pesquisadores estão refinando o material, ativando a matéria-prima, ajustando as condições de síntese, adicionando tratamentos de superfície e combinando-o com outros materiais. Sua estrutura, alta área superficial, poros finos e minerais ativos comportam-se como catalisadores convencionais (dolomita, olivina, níquel e metais alcalinos) e como um catalisador eficaz na reforma de alcatrão [146]. Por exemplo, nanocatalisadores de biochar carregados com Ni/Ca/Fe atingiram 87% de conversão de alcatrão e 42,46 mmol H₂ /g-biomassa, o que demonstrou a excelente atividade catalítica em relação às modificações metálicas [147].

No caso do pirogás, Ren et al. descobriram que o uso de biochar como catalisador durante a pirólise da biomassa aumentou drasticamente o rendimento de pirogás de 15% para 46% a 480 °C [148]. Shen et al. observaram que a mesma abordagem aumentou o teor de hidrogênio no gás de síntese em até 27% [75].

6.4. Limpeza Ambiental

O biochar ativado é amplamente reconhecido como um adsorvente econômico, ecológico e altamente eficiente para contaminantes da água e do solo. Ele faz isso de duas maneiras principais: adsorvendo poluentes em sua superfície porosa e funcionando como suporte catalítico para acelerar reações que decompõem compostos tóxicos [149].

O biochar pode ajudar a limpar o meio ambiente imobilizando poluentes, transferindo elétrons para quebrá-los ou permitindo que oxidantes, como peróxidos, gerem agentes de limpeza poderosos [150]. Em aplicações de oxidação avançada, o biochar fisicamente ativado (por exemplo, carvão de casca de amendoim pirolisado a 900 °C) apresentou 98,3% de remoção de sulfametoxazol em 120 min devido ao seu alto teor de grafite, grupos COOH e área superficial específica aumentada [151]. O biochar quimicamente oxidado também apresentou bom desempenho, com mais de 97% de remoção do antibiótico sulfametoxazol em 30 min [152].

7. Lixiviação química de biochar derivado de resíduos e seu potencial para recuperação de materiais críticos

A economia circular em evolução favorece a recuperação de materiais críticos, onde o biochar pode auxiliar. É necessária uma mudança dos sistemas econômicos lineares convencionais para um que se concentre na reutilização de recursos e na redução de resíduos. O fornecimento de componentes de matérias-primas críticas de muitas indústrias enfrenta vulnerabilidades potenciais. A recuperação de materiais valiosos a partir de resíduos de biochar tem o potencial vantajoso de ajudar a garantir o fornecimento sustentável de matérias-primas críticas, o que reduz a dependência de processos de extração ambientalmente prejudiciais [153].

As características do biochar podem ser influenciadas pela qualidade das matérias-primas e pelas condições de processamento, exigindo algum refinamento adicional. Embora o biochar seja promissor, ele é frequentemente derivado de biorresíduos ricos em certos compostos inorgânicos, como Fe, Si, K e Al, que diluem a porosidade e podem inibir processos catalíticos [154].

Por meio da lixiviação química, materiais valiosos podem ser recuperados do biochar derivado de resíduos, promovendo a circularidade. Através dessa forma de lixiviação, nutrientes úteis como fósforo, potássio, magnésio e cálcio podem ser extraídos e usados como fertilizantes, enquanto metais pesados são removidos. A lixiviação aumenta a porosidade e a capacidade de adsorção do biochar, reduzindo o teor de cinzas, melhorando assim sua aplicação na remediação ambiental e na recuperação de energia. O processo também ajuda a reduzir os metais alcalino-terrosos (principalmente Ca^{2+} e Mg^{2+}), prevenindo a formação de carbonatos que poderiam diminuir a eficácia do biochar [30 , 155]. Por esse motivo, a lixiviação química pode ser considerada um processo de aprimoramento do biochar.

Como já foi mencionado, os tratamentos alcalinos com NaOH , KOH e Ca(OH)_2 são particularmente eficazes na extração de sílica, alumina e minerais de argila do carvão, formando silicatos e aluminatos hidratados contendo álcalis. Esses tratamentos também são adequados para a extração de enxofre inorgânico e orgânico [156]. Em um estudo de Qiu et al. [157], o bicarbonato de potássio (KHCO_3) mostrou-se promissor como agente ativador na pirólise para a criação de adsorventes de biochar hierarquicamente porosos (14,4 mg/g.min) a partir de lodo de esgoto, permitindo a recuperação de material da lixiviação em água, que pode ser utilizado para o crescimento de plantas (Figura 7).

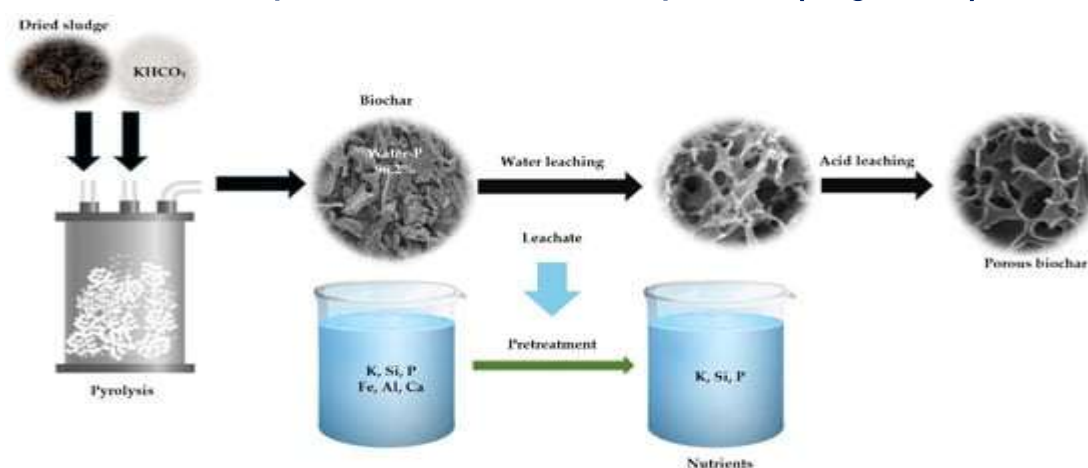


Figura 7. Biochar após tratamentos de lixiviação com água e ácido. Adaptado de [157], Resources, Conservation and Recycling, 176 (2022), 105953. © 2022 Elsevier BV. Reproduzido com permissão.

Por outro lado, a lixiviação ácida, que emprega ácidos como H_2SO_4 , HNO_3 e HCl , é mais eficaz na remoção de carbonatos, fosfatos, óxido de ferro (III) e sulfetos de carvão de baixa qualidade. A aplicação sequencial de lixiviação alcalina e ácida é frequentemente benéfica, pois os álcalis reagem com o enxofre e os minerais primários do carvão para formar compostos que os ácidos podem dissolver posteriormente [158] .

A lixiviação ácida também é empregada para a recuperação de fósforo de lodo de esgoto e cinzas de lodo incinerado com HCl ou H_2SO_4 , pois são particularmente eficazes na dissolução de fósforo ligado a alumínio e cálcio [159] .

Em uma investigação diferente realizada por Salimbeni et al., o carvão de lodo de esgoto produzido por pirólise lenta a $450\text{ }^\circ\text{C}$ foi tratado posteriormente com HNO_3 , HCl e KOH por meio de lixiviação química sob condições específicas ($60\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$, tempo de contato de 2 h). Os principais resultados de extração de fósforo e cálcio indicam que a lixiviação pode alcançar remoção quase completa (100% de remoção) e redução do teor de cinzas (61,4% de remoção). Como resultado, o biocarvão obtido apresentou teor de carbono substancialmente maior (aumentando de 14,4% para 27,4%), bem como maior área superficial (SSA) de $70\text{ m}^2/\text{g}$. Isso melhorou muito seu potencial de valorização. Embora a sílica tenha permanecido e a separação de Al/P tenha sido desafiadora, a lixiviação com HNO_3 em estágio único foi considerada promissora para a produção de precursores de fertilizantes ricos em P e material de carbono aprimorado [30] .

Além disso, Salimbeni et al. mostraram como a lixiviação química pode afetar o carvão derivado de lodo industrial e recuperar o material inorgânico para fertilizantes, como pode ser visto na Figura 8. Eles começaram com a pirólise lenta do lodo seco, seguida pela lixiviação ácida do carvão resultante/biocarvão e um lixiviado rico em nutrientes, e posteriormente ativaram fisicamente o biocarvão usando CO_2 a 700–800 °C. A precipitação química foi empregada para a recuperação de fósforo do lixiviado. Os resultados mostraram que a lixiviação removeu efetivamente cerca de 88% do teor de cinzas no carvão, com quase 100% de P, Mg, Ca e Fe, e cerca de 90% de Al. O carvão ativado derivado apresentou uma área superficial específica (SSA) de (417 m^2 / g), com potencial como adsorvente para tratamento de emissões ou águas residuais, e sugeriu outras aplicações potenciais, como na metalurgia [160].

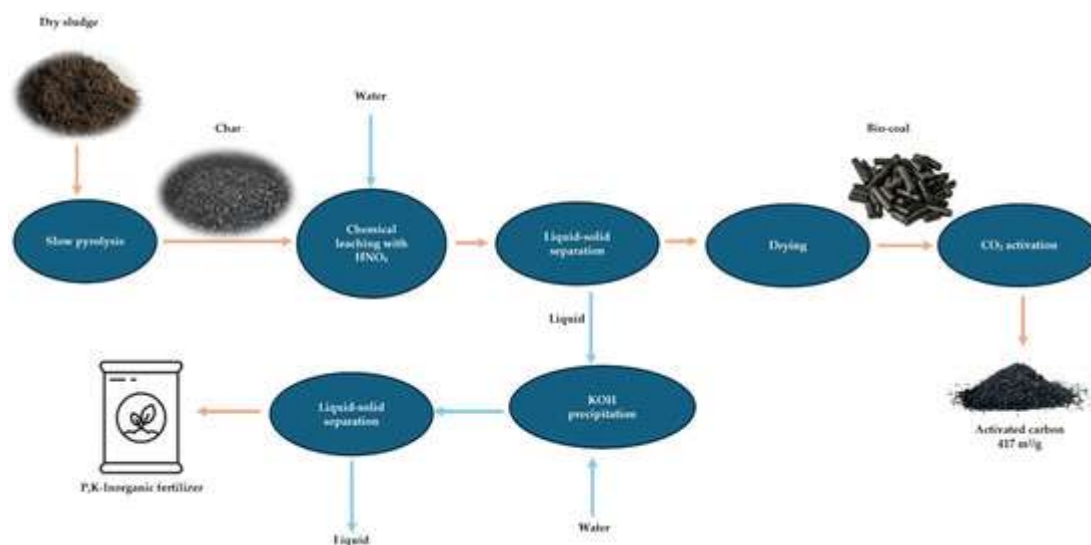


Figura 8. Metodologia elaborada para o tratamento termoquímico do carvão de lodo derivado e recuperação de material [160].

8. Da produção à modernização: preocupações e perspectivas técnico-econômicas

O futuro do aprimoramento do biochar apresenta oportunidades e caminhos críticos.

Muitos deles estão interligados, e múltiplos aspectos devem ser abordados para otimizar os processos de produção, melhorar o desempenho para aplicações específicas e viabilizar a implantação em larga escala ao longo do tempo.

8.1. Compatibilidade com biomassa

O rendimento e a qualidade do biochar foram determinados pelo tipo de biomassa. Quando usado como corretivo em tecnologias de remediação do solo, sequestro de carbono ou tratamento de água, o desempenho do biochar é frequentemente prejudicado pela contaminação e impurezas presentes na biomassa. O tamanho ou formato inadequado da matéria-prima muitas vezes exige operações de pré-tratamento dispendiosas. Serão necessários compromissos de longo prazo para estimular a produção de culturas energéticas, promover práticas de gestão sustentável da terra e explorar os subprodutos agroflorestais [161].

8.2. Limitações de ampliação de escala

A produção de biochar pode sofrer com a variabilidade nas condições de pirólise e nos parâmetros operacionais, resultando em qualidade inconsistente e desempenho incerto.

A ampliação da escala é difícil devido aos altos custos, à infraestrutura inadequada e à falta de padronização na produção industrial. A solução desses problemas envolverá o aprimoramento dos projetos de reatores e processos energeticamente eficientes, bem como padrões de qualidade comuns, apoiados por incentivos políticos e esquemas de certificação que possam promover a concorrência e a confiança no mercado para fomentar o uso generalizado [162].

8.3. Equilibrando a eficiência da modernização com os riscos ambientais

Embora o principal objetivo do aumento do desempenho físico-químico do biochar seja torná-lo mais eficiente em diferentes aplicações, sua sustentabilidade pode ser comprometida pelos métodos de aprimoramento. Por exemplo, modificações com sais metálicos aumentam a presença de grupos funcionais contendo oxigênio, o que aumenta diretamente a adsorção de contaminantes inorgânicos.

Esses tratamentos também alteram o potencial de lixiviação de íons metálicos e representam um risco de contaminação secundária catiônica [163]. Em relação à ativação física, no caso da moagem de alta energia, a área superficial, o tamanho das partículas e os grupos funcionais são considerados mais importantes, visto que se trata de uma tecnologia verde, reproduzível, econômica e livre de solventes.

Por outro lado, apresenta problemas como alto consumo de energia, durabilidade do equipamento e emissão de poeira [164]. Além disso, os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) formados durante a pirólise precisam ser submetidos a avaliações de risco precisas, devido à contaminação do solo e das culturas por HAPs. Portanto, ações devem ser tomadas para equilibrar a relação entre eficiência e sustentabilidade no aprimoramento do biochar, utilizando inovação, avaliações do ciclo de vida e gerenciamento de riscos.

8.4. Obstáculos Econômicos

As restrições econômicas continuam sendo um grande obstáculo para a ampla utilização do biochar. Atualmente, o custo de produção do biochar ainda é muito alto e precisaria ser reduzido em dois terços.

Ou os subsídios de carbono precisariam aumentar entre duas e nove vezes acima dos preços atuais do Sistema de Comércio de Emissões (SCE) da UE (≈ 88 EUR/t CO₂ eq) para se tornarem economicamente competitivos, de acordo com estudos [165]. O próprio mercado ainda é imaturo e carece de padrões de qualidade universais, o que limita a confiança e a adoção por parte dos investidores.

No setor agrícola, onde o biochar é frequentemente utilizado como corretivo de solo, os custos de capital iniciais podem ser elevados. Por exemplo, quando 40 t/ha de biochar foram utilizados a um custo de \sim €190/t em um estudo no Mediterrâneo, o tempo de retorno do investimento em condições normais foi de cerca de 5,5 anos em um período de amortização [166]. Em comparação com outras formas de remoção de dióxido de carbono (CDR), o biochar recebeu baixos níveis de apoio, e os subsídios existentes são insuficientes para garantir sua ampla adoção.

Apesar de todas as propriedades ajustáveis do biochar ativado, algumas dificuldades, como o alto custo de fabricação, a baixa estabilidade a longo prazo, a ampliação para escala industrial e a falta de compreensão do seu mecanismo de catálise, ainda persistem. Essas questões precisam ser abordadas para que o potencial total do biochar em uma bioeconomia circular sustentável, em escala industrial, seja plenamente explorado.

No futuro, o aprimoramento do biochar irá além da agricultura e da silvicultura, oferecendo novas oportunidades de pesquisa em remediação ambiental, horticultura, construção e ciência dos materiais. Essas escolhas exigem métodos de baixo custo para o seu aprimoramento, como a produção de biochar "verde" a partir de diversos resíduos, o que também pode contribuir para a redução da dependência de matérias-primas caras e para o uso circular de recursos.

É crucial também estabelecer os níveis mínimos de aplicação efetiva do biochar avançado, nos quais ele possa apresentar o melhor desempenho, minimizando custos e riscos de poluição colateral. Em última análise, a transição da pesquisa básica para a aplicação prática dependerá do sucesso de extensos ensaios de campo e estudos de intemperismo para garantir que as novas abordagens de modificação produzam biochar de alto desempenho, durável e seguro para produção em larga escala. Em conjunto, eles vislumbram as oportunidades e dificuldades que formam a base para a próxima fase das tecnologias de aprimoramento do biochar.

9. Conclusões

Esta revisão discutiu as propriedades comparativas de diferentes processos de conversão termoquímica, destacando que a pirólise lenta continua sendo a via mais eficiente para a produção de biochar com estrutura porosa bem ajustada e estável, tornando-o adequado para a valorização de fluxos de resíduos e para a mitigação de gases de efeito estufa a curto prazo por meio do sequestro de carbono. As etapas de aprimoramento subsequentes melhoram substancialmente o desempenho do biochar, com área superficial específica de até $2100 \text{ m}^2 / \text{g}$ por meio da ativação com KOH, e uma estrutura híbrida microporosa-mesoporosa é obtida com um volume de poros de $0,83 \text{ cm}^3 / \text{g}$ por meio de um tratamento combinado (KOH-N₂), enquanto a ativação ácida proporciona a remoção quase total de cinzas (fatores de remoção de até 88-100%), enriquecida com as funcionalidades de oxigênio superficial necessárias para adsorção e atividade catalítica adequadas. No nível catalítico, o biochar aprimorado supera significativamente os catalisadores comuns. No caso do craqueamento de metano, o carvão ativado apresentou uma conversão de CH₄ de 72,3% a 900 °C, enquanto o biocarvão bruto apresentou 66,2%.

Como suporte catalítico para a produção de biodiesel, o biocarvão sulfonado foi capaz de atingir um rendimento de 97% de biodiesel a partir dos ácidos graxos livres. Para a utilização de gás de síntese, a cogaseificação do biocarvão ativado com CO₂ apresentou um alto rendimento de gás de síntese de 78,2% em volume, com 26 mmol H₂ / g de biomassa, e produziu eficiências de conversão de energia de até 73%. O desempenho na remediação ambiental foi igualmente expressivo, com os biocarvões oxidados removendo >97% dos antibióticos e os carvões ativados termicamente removendo 98,3% do sulfametoxazol.

Em relação à recuperação de materiais, a lixiviação sequencial ácido-alcálica do biocarvão derivado de resíduos possibilitou uma recuperação de quase 100% de P, Mg, Ca e Fe, bem como uma redução substancial do teor de cinzas em 61–88%. Isso não só permitiu a recuperação de matérias-primas críticas listadas pela UE, como também aumentou o teor de carbono (de 14,4% para 27,4%) e a área superficial específica (até 417 m² / g), melhorando simultaneamente a capacidade catalítica e adsortiva do biochar.

Apesar de todos os avanços no aprimoramento do biochar, existem diversas questões a serem consideradas, como o custo de produção, a ampliação do processo de aprimoramento e o descarte de resíduos sólidos. Superar essas barreiras exigirá avanços tecnológicos e estruturas políticas inovadoras. Fundamentalmente, o aprimoramento do biochar oferece oportunidades reais em economias desenvolvidas. Está em consonância com os objetivos da economia circular e os compromissos de neutralidade de carbono; sistemas descentralizados podem substituir a queima a céu aberto, aumentar a fertilidade do solo e diminuir a dependência de fertilizantes importados. No futuro, será crucial integrar as tecnologias emergentes com projeções econômicas sólidas e regulamentações favoráveis para que o biochar concretize seu potencial como mitigação sustentável das mudanças climáticas e recuperação de recursos.

Contribuições dos autores

PD: Coleta de dados, revisão da literatura, redação – rascunho original; MP: Supervisão, metodologia, conceitualização, redação – revisão e edição; AS: Análise de dados, visualização – revisão e edição; VN: Revisão e edição; DC: Supervisão, administração do projeto, redação – revisão e edição, obtenção de financiamento. Todos os autores leram e aprovaram a versão final do manuscrito.

Financiamento

Este estudo foi realizado no âmbito da Parceria Ampliada MICS (Made in Italy – Circular and Sustainable) e recebeu financiamento da União Europeia Next Generation EU (PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA (PNRR) – MISSIONE 4 COMPONENTE 2, INVESTIMENTO 1.3 – DD 1551.11-10-2022, PE00000004).

Declaração do Comitê de Revisão Institucional

Não aplicável.

Declaração de Consentimento Informado

Não aplicável.

Declaração de Disponibilidade de Dados

Nenhum dado novo foi criado neste estudo.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos colegas do Departamento de Energia do Politecnico di Torino e do RE-CORD (Consórcio de Energias Renováveis para Pesquisa e Demonstração) pelo valioso feedback técnico e apoio durante a preparação deste manuscrito. Este manuscrito reflete apenas as opiniões e pontos de vista dos autores; nem a União Europeia nem a Comissão Europeia podem ser consideradas responsáveis por eles.

Conflitos de interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

Saravanan, A.; Karishma, S.; Kumar, PS; Rangasamy, G. Uma revisão sobre a regeneração de biorresíduos em bioprodutos e bioenergia: avaliação do ciclo de vida e economia circular. *Fuel* 2023 , 338 , 127221. [Google Scholar] [CrossRef]

Dey, T.; Bhattacharjee, T.; Nag, P.; Ritika; Ghata, A.; Kuila, A. Valorização de resíduos agrícolas em produtos de valor agregado para o desenvolvimento sustentável. *Bioresour. Technol. Rep.* 2021 , 16 , 100834. [Google Scholar] [CrossRef]

Kaza, S.; Yao, L.; Bhada-Tata, P.; Van Woerden, F. (Eds.) *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050* ; Banco Mundial: Washington, DC, EUA, 2018. [Google Scholar] [CrossRef]

Rahman, IU; Mohammed, HJ; Bamasag, A.; Peshawar, T.; Pukhtunkhwa, K. Uma exploração dos recentes avanços na conversão de resíduos em energia para a gestão otimizada de resíduos sólidos. *Discov. Chem. Eng.* 2025 , 5 , 1–26. [Google Scholar] [CrossRef]

Acelerando a Transição para uma Economia Circular | Relatório. Disponível online: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition> (acessado em 30 de julho de 2025).

Noor, T.; Javid, A.; Hussain, A.; Bukhari, SM; Ali, W.; Akmal, M.; Hussain, SM. Tipos, fontes e gestão de resíduos urbanos. *Urban Ecol. Emerg. Patterns Soc.-Ecol. Syst.* 2020 , 131 , 239–263. [Google Scholar] [CrossRef]

Oo, PZ; Prapasongsa, T.; Strezov, V.; Huda, N.; Oshita, K.; Takaoka, M.; Ren, J.; Halog, A.; Gheewala, SH. O papel da gestão global de resíduos e da economia

circular rumo à neutralidade de carbono. *Sustain. Prod. Consum.* 2024 , 52 , 498–510. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Khawaja, MK; Alkayyali, K.; Almanasreh, M.; Alkhalidi, A. Barreiras e soluções para a conversão de resíduos em energia em países em desenvolvimento com recursos hídricos e energéticos limitados. *Sci. Total Environ.* 2024 , 926 , 172096. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Masrura, SU; Dissanayake, P.; Sun, Y.; Ok, YS; Tsang, DCW; Khan, E. Uso sustentável de biochar para recuperação de recursos e remoção de produtos farmacêuticos da urina humana: uma revisão crítica. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2021 , 51 , 3016–3048. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Zhu, F.; Cakmak, EK; Cetecioglu, Z. Recuperação de fósforo para economia circular: potencial de aplicação de recursos viáveis e processos de engenharia na Europa. *Chem. Eng. J.* 2023 , 454 , 140153. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Ferraro, G.; Pecori, G.; Rosa, L.; Betucci, L.; Fratini, E.; Casini, D.; Rizzo, AM; Chiaramonti, D. Biochar de pirólise em escala de laboratório: Influência da matéria-prima e temperatura operacional. *Conversas de biomassa. Biorrefinaria* 2024 , 14 , 5901–5911. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Alkharabsheh, HM; Seleiman, MF; Battaglia, ML; Shami, A.; Jalal, RS; Alhammad, BA; Almutairi, KF; Al-Saif, AM. Biochar e seus amplos impactos na qualidade e fertilidade do solo, lixiviação de nutrientes e produtividade das culturas: uma revisão. *Agronomy* 2021 , 11 , 993. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Chiaramonti, D.; Lehmann, J.; Berruti, F.; Giudicianni, P.; Sanei, H.; Masek, O. Biochar é uma forma de remoção de carbono de longa duração, possibilitando projetos de CDR baseados em evidências. *Biochar* 2024 , 6 , 81. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Zhou, T.; Deng, J.; Zeng, Y.; Liu, X.; Song, B.; Ye, S.; Li, M.; Yang, Y.; Wang, Z.; Zhou, C. Biochar encontra átomo único: um catalisador para utilização

eficiente em aplicações de proteção ambiental e conversão de energia. *Small* 2024 , 20 , 2404254. [Google Scholar] [CrossRef]

Velusamy, K.; Isabel, JB; Periyasamy, S.; Thiruvankadam, A.; Ravikumar, H.; Gupta, SK; López-Maldonado, EA. Papel do biochar como um catalisador mais verde na produção de biocombustíveis: Produção, ativação e potencial de utilização — Uma revisão. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2024 , 177 , 105732. [Google Scholar] [CrossRef]

Yu, JT; Dehkhoda, AM; Ellis, N. Desenvolvimento de catalisador à base de biochar para transesterificação de óleo de canola. *Energy Fuels* 2011 , 25 , 337–344. [Google Scholar] [CrossRef]

Lee, J.; Kim, KH; Kwon, EE Biochar como catalisador. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017 , 77 , 70–79. [Google Scholar] [CrossRef]

Lee, JE; Park, YK Aplicações de materiais modificados à base de biochar para a remoção de poluentes ambientais: uma mini revisão. *Sustainability* 2020 , 12 , 6112. [Google Scholar] [CrossRef]

Manyà, JJ; Azuara, M.; Manso, JA. Produção de biochar por meio de pirólise lenta de diferentes materiais de biomassa: buscando as melhores condições operacionais. *Biomass Bioenergy* 2018 , 117 , 115–123. [Google Scholar] [CrossRef]

Chiaramonti, D.; Lotti, G.; Vaccari, FP; Sanei, H. Avaliação da permanência do carbono de longa duração no solo agrícola: desenterrando biochar de 15 anos de um experimento de campo de longo prazo em vinhedo. *Biomass Bioenergy* 2024 , 191 , 107484. [Google Scholar] [CrossRef]

Kazawadi, D.; Ntalikwa, J.; Kombe, G. Uma revisão da pirólise intermediária como tecnologia de conversão de biomassa para coprodução de bio-óleo e biochar de adsorção. *J. Renew. Energy* 2021 , 2021 , 5533780. [Google Scholar] [CrossRef]

Al-Rumaihi, A.; Shahbaz, M.; McKay, G.; Mackey, H.; Al-Ansari, T. Uma revisão das tecnologias de pirólise e matéria-prima: uma abordagem de mistura de plástico e biomassa para rendimento ideal de biochar. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2022 , 167 , 112715. [Google Scholar] [CrossRef]

Khan, TA; Saud, AS; Jamari, SS; Rahim, MHA; Park, JW; Kim, HJ. Carbonização hidrotérmica de biomassa lignocelulósica para preparação de material rico em carbono: uma revisão. *Biomass Bioenergy* 2019 , 130 , 105384. [Google Scholar] [CrossRef]

Miliotti, E.; Casini, D.; Rosi, L.; Lotti, G.; Rizzo, AM; Chiaramonti, D. Pirólise em escala laboratorial e carbonização hidrotérmica de digestato de biomassa: Caracterização de produtos sólidos e conformidade com os padrões de biochar. *Biomass Bioenergy* 2020 , 139 , 105593. [Google Scholar] [CrossRef]

Ighalo, JO; Akaeme, FC; Georgin, J.; de Oliveira, JS; Franco, DSP. Hidrocarvão de biomassa: uma revisão crítica da química do processo, metodologia de síntese e aplicações. *Sustainability* 2025 , 17 , 1660. [Google Scholar] [CrossRef]

Kota, KB; Shenbagaraj, S.; Sharma, PK; Sharma, AK; Ghodke, PK; Chen, WH Torrefação de biomassa: uma visão geral da avaliação de processos e tecnologias com base no nível de prontidão global. *Fuel* 2022 , 324 , 124663. [Google Scholar] [CrossRef]

Onyenwoke, C.; Tabela, LG; Mupondwa, E.; Crença.; Adapa, P. Efeito da Torrefação nas Propriedades Fisioquímicas da Serragem de Abeto Branco para Produção de Biocombustíveis. *Combustíveis* 2023 , 4 , 111–131. [Google Scholar] [CrossRef]

Boateng, AA; Mullen, CA. Pirólise rápida de biomassa pré-tratada termicamente por torrefação. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2013 , 100 , 95–102. [Google Scholar] [CrossRef]

Bukhsh, K.; Chen, C.; Su, G.; Dong, S.; Li, L.; Deng, S.; Li, X.; Ma, J.; Wang, X. Vantagens comparativas de biochars derivados de biomassa via torrefação sob atmosfera de gases de combustão e nitrogênio. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2025 , 190 , 107120. [Google Scholar] [CrossRef]

Salimbeni, A.; Di Bianca, M.; Lombardi, G.; Rizzo, AM; Chiaramonti, D. Oportunidades da integração da pirólise lenta e da lixiviação química para a extração de matérias-primas críticas de lodo de esgoto. *Water* 2023 , 15 , 1060. [Google Scholar] [CrossRef]

Mengesha, TT; Ancha, VR; Nigussie, A.; Afessa, MM; Bhandari, R. Efeito do tamanho da partícula e da taxa de aquecimento na formação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos durante a pirólise da biomassa do sabugo de milho. *Sustainability* 2025 , 17 , 4962. [Google Scholar] [CrossRef]

Munzeiwa, WA; Tsekoa, P.; Kammies, LRD; Chelechele, K.; Oluwalana-Sanusi, AE; Chaukura, N. Influência do potencial basal da biomassa nas propriedades e no desempenho do biochar para aplicações específicas. *Discov. Water* 2025 , 5 , 77. [Google Scholar] [CrossRef]

di Laurea, C.; Pinzuti, RCA Biochar: Análise e Potencial Econômico com Foco nos Produtores Europeus ; Politecnico di Torino: Torino, Itália, 2023. [Google Scholar]

Slezak, R.; Unyay, H.; Szufa, S.; Ledakowicz, S. Uma revisão abrangente e comparação de reatores de biomassa modernos: torrefação versus pirólise de biomassa — Parte 2. *Energies* 2023 , 16 , 2212. [Google Scholar] [CrossRef]

Gorshkov, A.; Berezikov, N.; Kaltaev, A.; Yankovsky, S.; Slyusarsky, K.; Tabakaev, R.; Larionov, K. Análise das características físico-químicas do biochar obtido por pirólise lenta de cascas de nozes em atmosfera de nitrogênio. *Energies* 2021 , 14 , 8075. [Google Scholar] [CrossRef]

Salimbeni, A.; Lombardi, G.; Rizzo, AM; Chiaramonti, D. Viabilidade técnico-econômica da integração da pirólise lenta de biomassa em uma siderúrgica com forno elétrico a arco: um estudo de caso. *Appl. Energy* 2023 , 339 , 120991. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Afshar, M.; Mofatteh, S. Biochar para um futuro sustentável: produção ecologicamente correta e diversas aplicações. *Results Eng.* 2024 , 23 , 102433. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Zaied, BK; Rashid, M.; Nasrullah, M.; Zularisam, AW; Pant, D.; Singh, L. Uma revisão abrangente sobre a remoção de contaminantes de águas residuais farmacêuticas pelo processo de eletrocoagulação. *Sci. Total Environ.* 2020 , 726 , 138095. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Piersa, P.; Unyay, H.; Szufa, S.; Lewandowska, W.; Modrzewski, R.; Ślęzak, R.; Ledakowicz, S. Uma revisão abrangente e comparação de reatores modernos de torrefação de biomassa versus pirólise de biomassa — Parte 1. *Energies* 2022 , 15 , 2227. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Huang, J.; Feng, Y.; Xie, H.; Wu, P.; Wang, M.; Wang, B.; Zhang, Q.; Zhang, S.; Liu, Z. Um estudo bibliográfico que revisa a última década do hidrocarvão em aplicações ambientais: História, situação atual e tendências de pesquisa. *Biochar* 2023 , 5 , 1–27. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Ercan, B.; Alper, K.; Ucar, S.; Karagoz, S. Estudos comparativos de hidrocarvões e biocarvões produzidos a partir de biomassa lignocelulósica via carbonização hidrotérmica, torrefação e pirólise. *J. Energy Inst.* 2023 , 109 , 101298. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Xiong, X.; Yu, IKM; Cao, L.; Tsang, DCW; Zhang, S.; Ok, YS. Uma revisão de catalisadores à base de biochar para síntese química, produção de biocombustíveis e controle da poluição. *Bioresour. Technol.* 2017 , 246 , 254–270. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Khan, N.; Gupta, A.; Ahamad, S.; Hussain, MK; Khan, MU; Siddiqui, ZN. Catalisadores de biochar funcionalizados: Avançando a química verde na síntese de O- e N-heterociclos. *Environ. Res.* 2025 , 284 , 122136. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Bartoli, M.; Giorcelli, M.; Tagliaferro, A. Uma visão geral abrangente sobre materiais à base de biochar para aplicações catalíticas. *Catalysts* 2023 , 13 , 1336. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Hervy, M.; Berhanu, S.; Weiss-Hortala, E.; Chesnaud, A.; Gérente, C.; Villot, A.; Minh, DP; Thorel, A.; Le Coq, L.; Nzihou, A. Caracterização multiescalar de espécies minerais de carvão para craqueamento de alcatrão. *Fuel* 2017 , 189 , 88–97. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Feng, D.; Wang, J.; Wang, S.; Sun, S.; Shang, Q.; Zhao, Y. Efeito do suporte de biochar no desempenho catalítico de catalisadores à base de Fe para craqueamento de CH₄. *Fuel Process. Technol.* 2023 , 247 , 107794. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Chellappan, S.; Nair, V.; Sajith, V.; Aparna, K. Síntese, otimização e caracterização de catalisador à base de biochar a partir de serragem para esterificação e transesterificação simultâneas. *Chin. J. Chem. Eng.* 2018 , 26 , 2654–2663. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Lyu, H.; Zhang, Q.; Shen, B. Aplicação de biochar e seus compósitos em catálise. *Chemosphere* 2020 , 240 , 124842. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Patel, S.; Kundu, S.; Halder, P.; Marzbali, MH; Chiang, K.; Surapaneni, A.; Shah, K. Produção de hidrogênio por decomposição catalítica de metano usando biochar e carvão ativado produzido a partir da pirólise de bio-sólidos. *Int. J. Hydrogen Energy* 2020 , 45 , 29978–29992. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Prabowo, J.; Lai, L.; Chivers, B.; Burke, D.; Dinh, AH; Ye, L.; Wang, Y.; Wang, Y.; Wei, L.; Chen, Y. Coprodutos de carbono sólido da produção de hidrogênio por pirólise de metano: entendimentos atuais e progressos recentes. *Carbon* 2024 , 216 , 118507. [Google Scholar] [CrossRef]

Mirkarimi, SMR; Bensaid, S.; Negro, V.; Chiaramonti, D. Revisão do craqueamento de metano sobre catalisador à base de carbono para energia e combustíveis. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2023 , 187 , 113747. [Google Scholar] [CrossRef]

Chen, J.; Zhou, J.; Zheng, W.; Leng, S.; Ai, Z.; Zhang, W.; Yang, Z.; Yang, J.; Xu, Z.; Cao, J.; et al. Uma revisão completa sobre os grupos funcionais contendo oxigênio do biochar: mecanismos de formação, métodos de detecção, engenharia e aplicações. *Sci. Total Environ.* 2024 , 946 , 174081. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Hou, J.; Yu, J.; Li, W.; He, X.; Li, X. Os efeitos da oxidação química e da redução em alta temperatura nos grupos funcionais da superfície e no desempenho de adsorção do biochar para a adsorção de sulfametoxazol. *Agronomy* 2022 , 12 , 510. [Google Scholar] [CrossRef]

Sharmila, VG; Tyagi, VK; Varjani, S.; Banu, JR. Uma revisão sobre o catalisador à base de biochar derivado de lignocelulose na remediação de águas residuais: tecnologias avançadas de tratamento e ferramentas de aprendizado de máquina. *Bioresour. Technol.* 2023 , 387 , 129587. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Azar, FZ; Lillo-Ródenas, MA; Román-Martínez, MC. Hidrólise de celulose catalisada por carvões ativados mesoporosos funcionalizados em condições brandas. *SN Appl. Sci.* 2019 , 1 , 1739. [Google Scholar] [CrossRef]

Ahmed, SF; Mehejabin, F.; Chowdhury, AA; Almomani, F.; Khan, NA; Badruddin, IA; Kamangar, S. Biochar produzido a partir de matérias-primas residuais:

mecanismos, fatores de influência, economia, utilização, desafios e perspectivas. *GCB Bioenergy* 2024 , 16 , e13175. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, J.; Jin, L.; Zhou, Y.; Li, Y.; Hu, H. Efeito da adição de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ao carvão nas propriedades do carvão ativado para decomposição de metano em hidrogênio. *Fuel Process. Technol.* 2018 , 176 , 85–90. [Google Scholar] [CrossRef]

Liu, F.; Xuan, G.; Ai, L.; Liu, Q.; Yang, L. Fatores-chave que afetam a atividade catalítica do catalisador à base de carvão ativado na decomposição do metano por ciclo químico para produção de H_2 . *Fuel Process. Technol.* 2021 , 215 , 106745. [Google Scholar] [CrossRef]

Hamdani, IR; Ahmad, A.; Chulliyil, HM; Srinivasakannan, C.; Shoaibi, AA; Hossain, MM. Decomposição termocatalítica do metano: uma revisão sobre catalisadores à base de carbono. *ACS Omega* 2023 , 8 , 28945–28967. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Jung, JU; Nam, W.; Yoon, KJ; Han, GY. Produção de hidrogênio por decomposição catalítica de metano sobre catalisadores de carbono em leito fluidizado. *Korean J. Chem. Eng.* 2007 , 24 , 674–678. [Google Scholar] [CrossRef]

Kim, MH Produção de hidrogênio por decomposição catalítica de metano sobre carvões ativados: estudo cinético. *Int. J. Hydrogen Energy* 2004 , 29 , 187–193. [Google Scholar] [CrossRef]

Jin, Z.; Xiao, S.; Dong, H.; Xiao, J.; Tian, R.; Chen, J.; Li, Y.; Li, L. Adsorção e degradação catalítica de contaminantes orgânicos por biochar: papel negligenciado do tamanho das partículas do biochar. *J. Hazard. Mater.* 2022 , 422 , 126928. [Google Scholar] [CrossRef]

Xie, Y.; Wang, L.; Li, H.; Westholm, LJ; Carvalho, L.; Thorin, E.; Yu, Z.; Yu, X.; Skreiberg, Ø. Uma revisão crítica sobre a produção, modificação e utilização de

biochar. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2021 , 161 , 105405. [Google Scholar] [CrossRef]

Liu, Y.; Lonappan, L.; Brar, SK; Yang, S. Impacto da adição de biochar em solos agrícolas na sorção, dessorção e degradação de pesticidas: uma revisão. *Sci. Total Environ.* 2018 , 645 , 60–70. [Google Scholar] [CrossRef]

Dai, SJ; Zhao, YC; Niu, DJ; Li, Q.; Chen, Y. Preparação e reativação de biochar magnético pelo método de sal fundido: desempenho relevante para a redução de pesticidas contendo cloro. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2019 , 69 , 58–70. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, P.; Stenrød, M.; Wang, L.; Yuan, S.; Mao, L.; Zhu, L.; Zhang, L.; Zhang, Y.; Jiang, H.; Zheng, Y.; et al. Caracterização do compósito de montmorilonita-biochar e sua aplicação na remoção de atrazina em solução aquosa e solo. *Front. Environ. Sci.* 2022 , 10 , 888252. [Google Scholar] [CrossRef]

El-Nemr, MA; Abdelmonem, NM; Ismail, IMA; Ragab, S.; El Nemr, A. Modificação do biochar preparado a partir de cascas de *Pisum sativum* com ozônio e hidróxido de amônio melhora a adsorção de cobre (II) em meio aquoso. *Environ. Process.* 2020 , 7 , 973–1007. [Google Scholar] [CrossRef]

Chen, H.; Yang, X.; Liu, Y.; Lin, X.; Wang, J.; Zhang, Z.; Li, N.; Li, Y.; Zhang, Y. A modificação com KOH melhora efetivamente o desempenho de adsorção de Cd e Pb do biochar enriquecido com N derivado de penas de galinha descartadas. *Waste Manag.* 2021 , 130 , 82–92. [Google Scholar] [CrossRef]

Al Masud, A.; Shin, WS; Sarker, A.; Septian, A.; Das, K.; Deepo, DM; Iqbal, MA; Islam, ARMT; Malafaia, G. Uma revisão crítica da aplicação sustentável de biochar para remediação verde: incertezas da pesquisa e direções futuras. *Sci. Total Environ.* 2023 , 904 , 166813. [Google Scholar] [CrossRef]

Anto, S.; Sudhakar, M.; Envergonhado, TS; Samuel, MS; Mathimani, T.; Brindhadevi, K.; Pugazhendhi, A. Estratégias de ativação para biochar para uso como catalisador eficiente em diversas aplicações. *Combustível* 2021 , 285 , 119205. [Google Scholar] [CrossRef]

Cha, JS; Park, SH; Jung, S.-C.; Ryu, C.; Jeon, J.-K.; Shin, M.-C.; Park, Y.-K. Produção e utilização de biochar: uma revisão. *J. Ind. Eng. Chem.* 2016 , 40 , 1–15. [Google Scholar] [CrossRef]

Peiris, C.; Nayanathara, O.; Navarathna, CM; Jayawardhana, Y.; Nawalage, S.; Burk, G.; Karunanayake, AG; Madduri, SB; Vithanage, M.; Kaumal, MN; et al. A influência de três modificações ácidas nas características físico-químicas do biochar de resíduos de chá pirolisado em diferentes temperaturas: um estudo comparativo. *RSC Adv.* 2019 , 9 , 17612–17622. [Google Scholar] [CrossRef]

Iwanow, M.; Gärtner, T.; Sieber, V.; König, B. Carvão ativado como suporte de catalisador: precursores, preparação, modificação e caracterização. *Beilstein J. Org. Chem.* 2020 , 16 , 1188–1202. [Google Scholar] [CrossRef]

Greenough, S.; Dumont, MJ; Prasher, S. As propriedades físico-químicas do biochar e sua aplicabilidade como carga em compósitos de borracha: uma revisão. *Mater. Today Commun.* 2021 , 29 , 102912. [Google Scholar] [CrossRef]

Shen, W.; Li, Z.; Liu, Y. Modificação de grupos funcionais químicos de superfície de carbono poroso. *Recent Pat. Chem. Eng.* 2008 , 1 , 27–40. [Google Scholar] [CrossRef]

Xiao, F. Uma revisão do biochar funcionalizado por oxidação térmica do ar. *Environ. Funct. Mater.* 2022 , 1 , 187–195. [Google Scholar] [CrossRef]

Zhu, X.; Li, C.; Li, J.; Xie, B.; Lü, J.; Li, Y. Tratamento térmico de biochar em atmosfera de ar/nitrogênio para desenvolvimento de mesoporosidade e

adsorção aprimorada de tetraciclina. *Bioresour. Technol.* 2018 , 263 , 475–482. [Google Scholar] [CrossRef]

Sun, Z.; Dai, L.; Lai, P.; Shen, F.; Shen, F.; Zhu, W. Oxidação do ar na engenharia de superfície de materiais à base de biochar: uma revisão crítica. *Carbon. Res.* 2022 , 1 , 32. [Google Scholar] [CrossRef]

Rajapaksha, AU; Vithanage, M.; Ahmad, M.; Seo, D.-C.; Cho, J.-S.; Lee, S.-E.; Lee, SS; Ok, YS. Remoção aprimorada de sulfametazina por biochar derivado de planta invasora ativado por vapor. *J. Hazard. Mater.* 2015 , 290 , 43–50. [Google Scholar] [CrossRef]

Azargohar, R.; Dalai, AK Ativação de biochar com vapor e KOH: estudos experimentais e de modelagem. *Microporous Mesoporous Mater.* 2008 , 110 , 413–421. [Google Scholar] [CrossRef]

Franciski, MA; Peres, EC; Godinho, M.; Perondi, D.; Foletto, EL; Collazzo, GC; Dotto, GL. Desenvolvimento de biochar ativado por CO₂ a partir de resíduos sólidos de uma indústria cervejeira e sua aplicação na adsorção de azul de metileno. *Waste Manag.* 2018 , 78 , 630–638. [Google Scholar] [CrossRef]

Sajjadi, B.; Chen, W.-Y.; Egiebor, NO. Uma revisão abrangente sobre a ativação física do biochar para aplicações energéticas e ambientais. *Rev. Chem. Eng.* 2019 , 35 , 735–776. [Google Scholar] [CrossRef]

Singh, KP; Malik, A.; Sinha, S.; Ojha, P. Adsorção em fase líquida de fenóis usando carvões ativados derivados de resíduos agrícolas. *J. Hazard. Mater.* 2008 , 150 , 626–641. [Google Scholar] [CrossRef]

Mestre, AS; Pires, J.; Nogueira, JMF; Carvalho, AP. Carvões ativados para a adsorção de ibuprofeno. *Carbon* 2007 , 45 , 1979–1988. [Google Scholar] [CrossRef]

Veksha, A.; Bhuiyan, TI; Hill, JM. Ativação de madeira de álamo com dióxido de carbono e ácido fosfórico para remoção de carbono orgânico total da água

produzida em areias betuminosas: aumento do rendimento com reciclagem de bio-óleo. *Materials* 2016 , 9 , 20. [Google Scholar] [CrossRef]

Bushra, B.; Remya, N. Biochar da pirólise da biomassa da casca de arroz — Características, modificação e aplicação ambiental. *Biomass Convers. Biorefinery* 2020 , 14 , 5759–5770. [Google Scholar] [CrossRef]

Lu, X.; Sun, J.; Pan, G.; Qi, W.; Zhang, Z.; Xing, J.; Gao, Y. Biochar modificado por moagem de bolas com aditivos aumenta a passivação de Cd no solo, aumenta o crescimento das plantas e restringe a absorção de Cd pela couve chinesa. *Horticulturae* 2025 , 11 , 168. [Google Scholar] [CrossRef]

Tan, XF; Liu, S.-B.; Liu, Y.-G.; Gu, Y.-L.; Zeng, G.-M.; Hu, X.-J.; Wang, X.; Liu, S.-H.; Jiang, L.-H. Biochar como potenciais precursores sustentáveis para a produção de carvão ativado: múltiplas aplicações na proteção ambiental e armazenamento de energia. *Bioresour. Technol.* 2017 , 227 , 359–372. [Google Scholar] [CrossRef]

Dalai, AK; Azargohar, R. Produção de carvão ativado a partir de biochar usando ativação química e física: Mecanismo e modelagem. *ACS Symp. Ser.* 2007 , 954 , 463–476. [Google Scholar] [CrossRef]

Huang, H.; Tang, J.; Gao, K.; He, R.; Zhao, H.; Werner, D. Caracterização de biochars modificados com KOH a partir de diferentes temperaturas de pirólise e adsorção aprimorada de antibióticos. *RSC Adv.* 2017 , 7 , 14640–14648. [Google Scholar] [CrossRef]

Ma, Y. Comparação de carvões ativados preparados a partir de palha de trigo via ativação com $ZnCl_2$ e KOH. *Valorização de biomassa residual* 2017 , 8 , 549–559. [Google Scholar] [CrossRef]

Haque, M.; Islam, MS. Preparação e caracterização de carvão ativado e sílica amorfa a partir da casca de arroz. *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.* 2015 , 50 , 263–270. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, J.; Wang, S. Preparação, modificação e aplicação ambiental do biochar: uma revisão. *J. Clean. Prod.* 2019 , 227 , 1002–1022. [Google Scholar] [CrossRef]

Panwar, NL; Pawar, A. Influência das condições de ativação nas propriedades físico-químicas do biochar ativado: uma revisão. *Biomass Convers. Biorefinery* 2022 , 12 , 925–947. [Google Scholar] [CrossRef]

Qu, J.; Wang, Y.; Tian, X.; Jiang, Z.; Deng, F.; Tao, Y.; Jiang, Q.; Wang, L.; Zhang, Y. Biochar poroso ativado com KOH com alta área superficial específica para remoção adsorptiva de cromo (VI) e naftaleno da água: fatores de influência, mecanismos e exploração da reutilização. *J. Hazard. Mater.* 2021 , 401 , 123292. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Jedynak, K.; Charmas, B. Propriedades de adsorção de biochars obtidos por ativação com KOH. *Adsorption* 2024 , 30 , 167–183. [Google Scholar] [CrossRef]

Jamil, U.; Zeeshan, M.; Khan, SR; Saeed, S. Síntese e ativação em duas etapas com KOH de biochar poroso de palha de trigo e pneu usado para exclusão adsorptiva de cromo (VI) de solução aquosa; estudo termodinâmico e de regeneração. *J. Water Process Eng.* 2023 , 53 , 103892. [Google Scholar] [CrossRef]

Liu, C.; Wang, W.; Wu, R.; Liu, Y.; Lin, X.; Kan, H.; Zheng, Y. Preparação de biochar modificado com ácido e álcali para remoção do pigmento azul de metileno. *ACS Omega* 2020 , 5 , 30906–30922. [Google Scholar] [CrossRef]

Hafeez, A.; Pan, T.; Tian, J.; Cai, K. Biochars modificados e seus efeitos na qualidade do solo: uma revisão. *Environments* 2022 , 9 , 60. [Google Scholar] [CrossRef]

Han, Y.; Zheng, J.; Jiang, C.; Zhang, F.; Wei, L.; Zhu, L. Biochar de algas modificado com ácido clorídrico para a remoção de *Microcystis aeruginosa*: desempenho e mecanismo de coagulação. *SSRN Electron. J.* 2022 , 10 , 108903. [Google Scholar] [CrossRef]

Kasozi, GN; Zimmerman, AR; Nkedi-Kizza, P.; Gao, B. Sorção de catecol e ácido húmico em uma variedade de carbonos negros produzidos em laboratório (biochars). *Environ. Sci. Technol.* 2010 , 44 , 6189–6195. [Google Scholar] [CrossRef]

Xu, Y.; Liu, Y.; Liu, S.; Tan, X.; Zeng, G.; Zeng, W.; Ding, Y.; Cao, W.; Zheng, B. Adsorção aprimorada de azul de metileno pela modificação com ácido cítrico do biochar derivado de aguapé (*Eichornia crassipes*). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016 , 23 , 23606–23618. [Google Scholar] [CrossRef]

Sheng, X.; Wang, J.; Cui, Q.; Zhang, W.; Zhu, X. Um biochar viável derivado de resíduos de biogás e sua aplicação na adsorção eficiente de tetraciclina em solução aquosa. *Environ. Res.* 2022 , 207 , 112175. [Google Scholar] [CrossRef]

Godwin, PM; Pan, Y.; Xiao, H.; Afzal, MT Progresso na preparação e aplicação de biochar modificado para melhorar a remoção de íons de metais pesados de águas residuais. *J. Bioresour. Bioprod.* 2019 , 4 , 31–42. [Google Scholar] [CrossRef]

Li, B.; Wei, D.; Li, Z.; Zhou, Y.; Li, Y.; Huang, C.; Long, J.; Huang, H.; Tie, B.; Lei, M. Insights mecanísticos sobre a remoção aprimorada de roxsarsona e seus metabólitos por um nanocompósito de ferro zerovalente suportado por biochar à base de lodo: Adsorção e transformação redox. *J. Hazard. Mater.* 2020 , 389 , 122091. [Google Scholar] [CrossRef]

Zhang, H.; Liao, W.; Zhou, X.; Shao, J.; Chen, Y.; Zhang, S.; Chen, H. Coefeito da temperatura de pirólise e da impregnação com fosfato de potássio nas

características, estabilidade e mecanismo de adsorção do biochar enriquecido com fósforo. *Bioresour. Technol.* 2022 , 344 , 126273. [Google Scholar] [CrossRef]

Zheng, Z.; Duan, X. Mitigando os efeitos na saúde do Cr(VI) aquoso com biochar modificado com ferro. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022 , 19 , 1481. [Google Scholar] [CrossRef]

Tan, Z.; Zhang, X.; Wang, L.; Gao, B.; Luo, J.; Fang, R.; Zou, W.; Meng, N. Sorção de tetraciclina em biochar modificado com H₂O₂ derivado de talo de colza. *Environ. Pollut. Bioavailab.* 2019 , 31 , 198–207. [Google Scholar] [CrossRef]

Yao, X.; Ji, L.; Guo, J.; Ge, S.; Lu, W.; Chen, Y.; Cai, L.; Wang, Y.; Song, W. Um material de biochar poroso abundante derivado de wakame (*Undaria pinnatifida*) com alto desempenho de adsorção para três corantes orgânicos. *Bioresour. Technol.* 2020 , 318 , 124082. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Jiang, C.; Yakaboylu, GA; Yumak, T.; Zondlo, JW; Sabolsky, EM; Wang, J. Carvões ativados preparados por ativação indireta e direta de CO₂ de biomassa lignocelulósica para eletrodos de supercapacitores. *Renew. Energy* 2020 , 155 , 38–52. [Google Scholar] [CrossRef]

Guo, F.; Peng, K.; Liang, S.; Jia, X.; Jiang, X.; Qian, L. Avaliação do desempenho catalítico de diferentes catalisadores de biochar ativado para remoção de alcatrão da pirólise de biomassa. *Fuel* 2019 , 258 , 116204. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, L.; Sun, F.; Hao, F.; Qu, Z.; Gao, J.; Liu, M.; Wang, K.; Zhao, G.; Qin, Y. Uma estratégia de ativação catalítica induzida por traços verdes de K₂CO₃ para o desenvolvimento de carvão ativado convertido em carvão vegetal como candidato avançado para adsorção de CO₂ e supercapacitores. *Chem. Eng. J.* 2020 , 383 , 123205. [Google Scholar] [CrossRef]

Lobos, MLN; Sieben, JM; Comignani, V.; Duarte, M.; Volpe, MA; Moyano, EL Biochar da pirólise da celulose: um suporte catalítico alternativo para a eletro-oxidação do metanol. *Int. J. Hydrogen Energy* 2016 , 41 , 10695–10706. [Google Scholar] [CrossRef]

Chen, T.; Luo, L.; Deng, S.; Shi, G.; Zhang, S.; Zhang, Y.; Deng, O.; Wang, L.; Zhang, J.; Wei, L. Sorção de tetraciclina em biochar modificado com H₃PO₄ derivado de palha de arroz e esterco suíno. *Bioresour. Technol.* 2018 , 267 , 431–437. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Yazdani, MR; Duimovich, N.; Tiraferri, A.; Laurell, P.; Borghei, M.; Zimmerman, JB; Vahala, R. Sorbentes de biochar mesoporoso personalizados a partir de biomassa de pinha para a adsorção de matéria orgânica natural da água do lago. *J. Mol. Liq.* 2019 , 291 , 111248. [Google Scholar] [CrossRef]

Premchand, P.; Demichelis, F.; Galletti, C.; Chiaramonti, D.; Bensaid, S.; Antunes, E.; Fino, D. Aprimoramento da produção de biochar: uma análise técnica da influência combinada da ativação química (KOH e NaOH) e das atmosferas de pirólise (N₂ / CO₂) nos rendimentos e propriedades do biochar derivado da casca de arroz. *J. Environ. Manag.* 2024 , 370 , 123034. [Google Scholar] [CrossRef]

Hwang, H.; Lee, JH; Ahmed, MA; Choi, JW. Avaliação de carvões ativados derivados de pirocarvão e hidrocarvão para materiais biossorbentes e supercapacitores. *J. Environ. Manag.* 2021 , 298 , 113436. [Google Scholar] [CrossRef]

Yang, H.; Cui, Y.; Jin, Y.; Lu, X.; Han, T.; Sandström, L.; Jönsson, PG; Yang, W. Avaliação de catalisadores à base de biochar projetados para a produção de gás de síntese em um processo de pirólise e reforma catalítica de biomassa. *Energy Fuels* 2023 , 37 , 5942–5952. [Google Scholar] [CrossRef]

Zeng, XY; Wang, Y.; Li, RX; Cao, HL; Li, YF; Lü, J. Impactos da temperatura e da modificação com ácido fosfórico nas propriedades físico-químicas do biochar para excelente adsorção de sulfadiazina. *Biochar* 2022 , 4 , 14. [Google Scholar] [CrossRef]

Amalina, F.; Razak, ASA; Krishnan, S.; Zularisam, AW; Nasrullah, M. Os efeitos da modificação química no desempenho do adsorvente no tratamento de água e efluentes — Uma revisão. *Bioresour. Technol. Rep.* 2022 , 20 , 101259. [Google Scholar] [CrossRef]

Sajjadi, B.; Zubatiuk, T.; Leszczynska, D.; Leszczynski, J.; Chen, WY. Ativação química de biochar para aplicações energéticas e ambientais: uma revisão abrangente. *Rev. Chem. Eng.* 2018 , 35 , 777–815. [Google Scholar] [CrossRef]

Medyńska-Juraszek, A.; Álvarez, ML; Białowiec, A.; Jerzykiewicz, M. Caracterização e capacidade de sorção de cátions de sódio de biochars quimicamente modificados produzidos a partir de resíduos agrícolas e florestais. *Materials* 2021 , 14 , 4714. [Google Scholar] [CrossRef]

Chew, TW; H'ng, PS; Abdullah, BCTGLC; Chin, KL; Lee, CL; Hafizuddin, BMSMN; TaungMai, L. Uma revisão das propriedades do carvão ativado de base biológica produzido a partir de diferentes produtos químicos ativadores durante o processo de ativação química da biomassa e seu potencial para a Malásia. *Materials* 2023 , 16 , 7365. [Google Scholar] [CrossRef]

Pinij, P.; Tippayawong, N.; Chimupala, Y.; Chaiklangmuang, S. Desempenho de grupos funcionais e transformação de KOH em resíduos de palha de milho por meio de pirólise catalítica. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2021 , 157 , 105234. [Google Scholar] [CrossRef]

Hafizuddin, MS; Lee, CL; Chin, KL; H'ng, PS; Khoo, PS; Rashid, U. Fabricação de carvão ativado com estrutura altamente microporosa via modificação de

superfície com hidróxido de sódio. *Polymers* 2021 , 13 , 3954. [Google Scholar] [CrossRef]

Panahi, HKS; Dehghani, M.; Ok, YS; Nizami, A.-S.; Khoshnevisan, B.; Mussatto, SI; Aghbashlo, M.; Tabatabaei, M.; Lam, SS. Uma revisão abrangente do biochar projetado: produção, características e aplicações ambientais. *J. Clean. Prod.* 2020 , 270 , 122462. [Google Scholar] [CrossRef]

Xu, Z.; He, M.; Xu, X.; Cao, X.; Tsang, DCW. Impactos de diferentes processos de ativação na estabilidade do carbono do biochar para resistência à oxidação. *Bioresour. Technol.* 2021 , 338 , 125555. [Google Scholar] [CrossRef]

Akhil, D.; Lakshmi, D.; Kartik, A.; Vo, DVN; Arun, J.; Gopinath, KP. Produção, caracterização, ativação e aplicações ambientais de biochar modificado: uma revisão. *Environ. Chem. Lett.* 2021 , 19 , 2261–2297. [Google Scholar] [CrossRef]

Thompson, KA; Shimabuku, KK; Kearns, JP; Knappe, DRU; Summers, RS; Cook, SM. Comparação ambiental de biochar e carvão ativado para tratamento terciário de águas residuais. *Environ. Sci. Technol.* 2016 , 50 , 11253–11262. [Google Scholar] [CrossRef]

Kołtowski, M.; Charmas, B.; Skubiszewska-Zięba, J.; Oleszczuk, P. Efeito da ativação do biochar por diferentes métodos na toxicidade do solo contaminado por atividade industrial. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2017 , 136 , 119–125. [Google Scholar] [CrossRef]

Ali, H.; Ali, S.; Baloch, S.; Naheed, F.; Amjad, E.; Saeed, Q.; Naveed, M.; Mustafa, A. Aplicação de biochar para melhoria da qualidade do solo: uma visão geral ; Intechopen: Londres, Reino Unido, 2024. [Google Scholar] [CrossRef]

Bai, Z.; Li, W.; Bai, J.; Li, B.; Chen, H. Os efeitos das propriedades texturais e da química de superfície do carvão ativado em seu desempenho catalítico na decomposição do metano para a produção de hidrogênio. *Energy Sources Part*

A Recovery Util. Environ. Eff. 2012 , 34 , 1145–1153. [Google Scholar] [CrossRef]

Pham, CQ; Siang, TJ; Kumar, PS; Ahmad, Z.; Xiao, L.; Bahari, MB; Cao, ANT; Rajamohan, N.; Qazaq, AS; Kumar, A.; et al. Produção de hidrogênio e materiais de carbono de alto valor agregado por decomposição catalítica de metano: uma revisão. Environ. Chem. Lett. 2022 , 20 , 2339–2359. [Google Scholar] [CrossRef]

Harun, K.; Adhikari, S.; Jahromi, H. Produção de hidrogênio via decomposição termocatalítica de metano usando catalisadores à base de carbono. RSC Adv. 2020 , 10 , 40882–40893. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Abbas, HF; Daud, WMAW Influência do material do reator e do carvão ativado na decomposição termocatalítica do metano para produção de hidrogênio. Appl. Catal. A Gen. 2010 , 388 , 232–239. [Google Scholar] [CrossRef]

Bai, Z.; Chen, H.; Li, W.; Li, B. Produção de hidrogênio por decomposição de metano sobre carvão vegetal. Int. J. Hydrogen Energy 2006 , 31 , 899–905. [Google Scholar] [CrossRef]

Mani, S.; Kastner, JR; Juneja, A. Decomposição catalítica de tolueno usando um catalisador derivado de biomassa. Fuel Process. Technol. 2013 , 114 , 118–125. [Google Scholar] [CrossRef]

Wang, B.; Gao, B.; Fang, J. Avanços recentes na produção e aplicação de biochar projetado. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 2017 , 47 , 2158–2207. [Google Scholar] [CrossRef]

Kumar, S.; Soomro, SA; Harijan, K.; Uqaili, MA; Kumar, L. Avanços do catalisador à base de biochar para a produção aprimorada de biodiesel: uma revisão abrangente. Energies 2023 , 16 , 644. [Google Scholar] [CrossRef]

Park, G.; Lee, D.-J.; Kwon, D.; Kim, JY; Jung, S.; Tsang, YF; Kwon, EE. Uso de biochar como catalisador para a produção de biodiesel. *J. Ind. Eng. Chem.* 2025 , 142 , 408–415. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

di Bitonto, L.; Reynel-Ávila, HE; Mendoza-Castillo, DI; Bonilla-Petriciolet, A.; Durán-Valle, CJ; Pastore, C. Síntese e caracterização de óxidos de cálcio nanoestruturados suportados em biochar e sua aplicação como catalisadores para a produção de biodiesel. *Renew. Energy* 2020 , 160 , 52–66. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Jung, JM; Oh, JI; Baek, K.; Lee, J.; Kwon, EE. Produção de biodiesel a partir de óleo de cozinha usado utilizando biochar derivado de esterco de galinha como meio poroso e catalisador. *Energy Convers. Manag.* 2018 , 165 , 628–633. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Jung, JM; Oh, JI; Park, YK; Lee, J.; Kwon, EE. Manipulação de biochar de esterco de galinha mediada por CO₂ para produção de biodiesel. *Environ. Res.* 2019 , 171 , 348–355. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Zhao, C.; Lv, P.; Yang, L.; Xing, S.; Luo, W.; Wang, Z. Síntese de biodiesel sobre catalisador à base de biochar a partir de resíduos de biomassa da casca de pomelo. *Energy Convers. Manag.* 2018 , 160 , 477–485. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Cao, J.-P.; Liu, T.-L.; Ren, J.; Zhao, X.-Y.; Wu, Y.; Wang, J.-X.; Ren, X.-Y.; Wei, X.-Y. Preparação e caracterização de níquel carregado em carvão de resina como catalisador de reforma de alcatrão para gaseificação de biomassa. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2017 , 127 , 82–90. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Asadullah, M.; Ito, SI; Kunimori, K.; Yamada, M.; Tomishige, K. Gaseificação de biomassa para hidrogênio e gás de síntese em baixa temperatura: novo sistema catalítico usando reator de leito fluidizado. *J. Catal.* 2002 , 208 , 255–259. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Yang, G.; Hu, Q.; Hu, J.; Yang, H.; Yan, S.; Chen, Y.; Wang, X.; Chen, H. Produção de gás de síntese rico em hidrogênio a partir da gaseificação de biomassa usando nanocatalisadores à base de biochar. *Bioresour. Technol.* 2023 , 379 , 129005. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Ren, S.; Lei, H.; Wang, L.; Bu, Q.; Chen, S.; Wu, J. Produção de hidrocarbonetos e gás de síntese rico em hidrogênio por pirólise catalítica de biomassa e aprimoramento de bio-óleo sobre catalisadores de biochar. *RSC Adv.* 2014 , 4 , 10731–10737. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Ahmad, M.; Rajapaksha, AU; Lim, JE; Zhang, M.; Bolan, N.; Mohan, D.; Vithanage, M.; Lee, SS; Ok, YS. Biochar como sorvente para o gerenciamento de contaminantes no solo e na água: uma revisão. *Chemosphere* 2014 , 99 , 19–33. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Chandola, D.; Rana, S.; Chandola, D.; Rana, S. Biochar para Remediação Ambiental. Em *Biochar - Tecnologias Produtivas, Propriedades e Aplicações* ; Intechopen: Londres, Reino Unido, 2022. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Gasim, MF; Choong, Z.-Y.; Koo, P.-L.; Low, S.-C.; Abdurahman, M.-H.; Ho, Y.-C.; Mohamad, M.; Suryawan, IWK; Lim, J.-W.; Oh, W.-D. Aplicação de biochar como material funcional para remediação de poluentes orgânicos na água: uma visão geral. *Catalysts* 2022 , 12 , 210. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Chen, H.; Gao, Y.; Li, J.; Fang, Z.; Bolan, N.; Bhatnagar, A.; Gao, B.; Hou, D.; Wang, S.; Song, H.; et al. Biochar projetado para descontaminação ambiental em sistemas aquáticos e de solo: uma revisão. *Carbon Res.* 2022 , 1 , 4. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Barragán-Mantilla, SP; Gascó, G.; Méndez, A. Perspectivas sobre o uso de biochar na valorização de resíduos de mineração da flotação de minerais sulfetados: recuperação de metais e efeitos na toxicidade. *Waste Manag.* 2023 , 171 , 116–123. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Zhao, L.; Sun, Z.-F.; Pan, X.-W.; Tan, J.-Y.; Yang, S.-S.; Wu, J.-T.; Chen, C.; Yuan, Y.; Ren, N.-Q. Biochar derivado de lodo de esgoto para melhoria ambiental: avanços, desafios e soluções. *Water Res. X* 2023 , 18 , 100167. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Behera, SK; Kumari, U.; Meikap, BC. Uma revisão da lixiviação química de carvão por solução ácida e alcalina. *J. Min. Metall.* 2018 , 54 , 1–24. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Pochampally, SV; Blanco, JG; Ayalew, K.; Murph, SEH; Moon, J. Biochars inovadores intercalados com álcalis e esfoliados com ácido, com áreas de superfície aprimoradas para aplicações de adsorção de contaminantes. *Sep. Purif. Technol.* 2024 , 350 , 127793. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Qiu, J.; Hou, H.; Liang, S.; Yang, L.; Gan, Q.; Tao, S.; Yu, W.; Lv, R.; Ding, L.; Xiao, K.; et al. Preparação de biochar hierarquicamente poroso e recuperação simultânea de nutrientes de lodo de esgoto por meio de três etapas de pirólise ativada por álcali, lixiviação com água e lixiviação ácida. *Resour. Conserv. Recycl.* 2022 , 176 , 105953. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Rahman, M.; Pudasainee, D.; Gupta, R. Revisão sobre o aprimoramento químico do carvão: processos de produção, aplicações potenciais e desenvolvimentos recentes. *Fuel Process. Technol.* 2017 , 158 , 35–56. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Jama-Rodzeńska, A.; Sowinski, J.; Koziel, JA; Białowiec, A. Recuperação de fósforo de cinzas de lodo de esgoto com base na abordagem do berço ao berço - Mini-revisão. *Minerais* 2021 , 11 , 985. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Salimbeni, A.; Di Bianca, M.; Rizzo, AM; Chiaramonti, D. Produção de carvão ativado e fertilizante rico em fósforo a partir de lodo industrial pela aplicação de um tratamento termoquímico integrado. *Sustainability* 2023 , 15 , 14620. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

Lobato-Peralta, DR; Duque-Brito, E.; Villafán-Vidales, HI; Longoria, A.; Sebastian, P.; Cuentas-Gallegos, AK; Arancibia-Bulnes, CA; Okoye, PU. Uma revisão sobre tendências na extração de lignina e valorização da biomassa lignocelulósica para aplicações energéticas. *J. Clean. Prod.* 2021 , 293 , 126123. [Google Scholar] [CrossRef]

Santos, DCBD; Evaristo, RBW; Dutra, RC; Suarez, PAZ; Silveira, EA; Ghesti, GF. Avançando as aplicações do biochar: uma revisão dos processos de produção, métodos analíticos, critérios de decisão e caminhos para escalabilidade e certificação. *Sustainability* 2025 , 17 , 2685. [Google Scholar] [CrossRef]

Lin, Y.; Yu, C.; Zhang, Y.; Lu, L.; Xu, D.; Peng, X. Métodos e mecanismos de modificação de biochar para melhoria de solos afetados por salinidade e solos salino-álcalinos: uma revisão. *Soil Use Manag.* 2024 , 40 , e12992. [Google Scholar] [CrossRef]

Harindintwali, JD; He, C.; Xiang, L.; Dou, Q.; Liu, Y.; Wang, M.; Wen, X.; Fu, Y.; Ul Islam, M.; Chang, SX; et al. Efeitos da moagem de bolas na adsorção de contaminantes em água por biochar: uma meta-análise. *Sci. Total Environ.* 2023 , 882 , 163643. [Google Scholar] [CrossRef]

Jokubè, M.; Hyyrynen, M.; Pihlainen, S.; Hyytiäinen, K. Viabilidade econômica do biochar para o aumento do estoque de carbono em solos agrícolas finlandeses. *Carbon Manag.* 2025 , 16 , 2465328. [Google Scholar] [CrossRef]

Aviso/Nota do Editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são de exclusiva responsabilidade dos autores e colaboradores individuais, e não da MDPI e/ou dos editores. A MDPI e/ou os editores se eximem de qualquer responsabilidade por danos a pessoas ou bens decorrentes de ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.

© 2025 pelos autores. Este artigo é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos e condições da licença Creative Commons Attribution

SÉRIE ESPECIAL LIVROS TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCHAR

PLATAFORMA BRASIL BIOMASSA LIVROS <https://www.brasilbiomassa.com/livrosbiochar>

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA AÇAÍ



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA ACÁZI



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA ALGODÃO



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA AMENDOIM



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA ARROZ



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA BABAÇU



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA CACAU



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA CAFÉ



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA CASTANHA CAJU



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA CASTANHA PARÁ



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA CENDEA



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA COCO VERDE



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA CUPUAÇU



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA DENDÊ



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA FEIJÃO



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA LARANJA



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA MANDIOCA



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA MILHO



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA SOJA



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA TRIGO



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA UVA



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA CANA DE-AÇÚCAR



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA CAPIM ELIFANTE



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL
BIOCHAR BIOMASSA CAPIM BRAQUIÁRIA



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCHAR
FLORESTAL MADEIRA ACÁCIA



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCHAR
FLORESTAL MADEIRA BAMBU



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCHAR
FLORESTAL MADEIRA BRACATINGA



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCHAR
FLORESTAL MADEIRA EUCALIPTO



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCHAR
FLORESTAL MADEIRA PINUS



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCHAR
BIOMASSA RESÍDUOS SÍLICO URBANOS



EDITORA BRASIL BIOMASSA 2026