

BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL

**LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCARBONO
BIOMASSA RESÍDUOS SÓLIDOS URBANO**



EDITORA BRASIL BIOMASSA

2026

SUMÁRIO EXECUTIVO

LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCARBONO BIOMASSA RESÍDUOS SÓLIDOS URBANO

INTRODUÇÃO.....22

Declarações Prospectivas

Apresentação do Livro Biocarbono da Biomassa dos Resíduos Sólidos Urbano

Exposição Fundamental Biocarbono Biomassa dos Resíduos Sólidos Urbano

Metodologia do Livro Biocarbono Biomassa dos Resíduos Sólidos Urbano

DIRETRIZES FUNDAMENTAIS.....85

Diretrizes gerais de produção de biocarbono biomassa dos Resíduos Sólidos Urbano

a. Diretrizes gerais

b. Pirólise da biomassa dos Resíduos Sólidos Urbano

c. Tipos de pirólise para produção biocarbono com Resíduos Sólidos Urbano

d. Composição do biocarbono da biomassa dos Resíduos Sólidos Urbano

e. Utilização de biocarbono à base da biomassa RSU para diferentes aplicações

f. Biocarbono à base da biomassa RSU para uso industria de alumínio

- g. Biocarbono à base da biomassa RSU para uso indústria de cimentos
- h Biocarbono à base da biomassa RSU para uso indústria ferro e aço
- i. Utilização de técnica analítica na caracterização de biocarbono da biomassa RSU

CAPÍTULO I RESÍDUOS SÓLIDOS URBANO.....110

1.1. Resíduos Sólidos Urbano

1.1.1 Resíduos sólidos: conceituação e classificação

1.1.1.1. Caracterização dos Resíduos Sólidos

1.1.1.2. Caracterização

1.1.1.3. Identificação

1.1.2 Classificação dos Resíduos

1.1.2.1. Classificação normativa

1.1.2.2. Classificação dos resíduos gerados no Brasil

1.1.3 Gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos

1.1.4 Gestão e gerenciamento integrados de resíduos sólidos

1.1.5 Gerenciamento e rotas tecnológicas para os resíduos sólidos

1.1.6 Geração dos Resíduos Sólidos

1.1.7 Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos

1.1.8 Tratamento

1.1.8.1 Triagem/Reciclagem

1.1.8.2 Compostagem

1.1.8.3 Incineração

1.1.9 Aterro Sanitário

1.1.10. Grupos de Geradores

1.1.11. Acondicionamento dos Resíduos Sólidos

1.1.11.1. Resíduos Domiciliares

1.1.11.1.1. Resíduos domiciliares não perigosos

1.1.11.1.2. Resíduos domiciliares perigosos

1.1.11.2. Resíduos Comerciais

1.1.11.3. Resíduos Públicos

1.1.11.4. Resíduos de Serviços de Saúde

1.1.11.5. Resíduos de Coleta Seletiva

1.1.11.6. Resíduos de Construção e Demolição

1.1.12. Resíduos Sólidos Especiais

1.1.12.1. Resíduos sólidos industriais

1.1.12.2. Resíduos de serviços de transportes

1.1.12.3. Resíduos agrossilvipastoris

1.1.13. Logística Reversa

CAPÍTULO II BIOMASSA RSU PRODUÇÃO BIOCARBONO160

2.1. Introdução

2.1.1. Viabilidade da utilização de RSU para produção de biocarbono

2.1.1.1. Tratamento de Resíduos Sólidos Urbano

2.1.1.2. Alternativas de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbano

2.1.2. Aterro sanitário com geração de energia

2.1.2.1. Termovalorização ou incineração com geração de energia

2.1.2.2. Compostagem

2.1.3. Caracterização do biocarbono derivado de Resíduos Sólidos Urbano

2.1.3.1. Rendimento do biocarbono

2.1.3.2. Propriedades aproximadas do biocarbono derivado de Resíduos Sólidos Urbano

2.1.3.3. Composições elementares do biocarbono derivado de Resíduos Sólidos Urbano

2.1.3.4. Funcionalidade de superfície do biocarbono derivado de Resíduos Sólidos Urbano

2.1.4. Aplicações do biocarbono derivado de Resíduos Sólidos Urbano

2.1.5. Oportunidades e desafios futuros

2.1.5.1. Perspectivas ambientais do biocarbono derivado de Resíduos Sólidos Urbano

2.1.5.2. Perspectivas econômicas do biocarbono derivado de Resíduos Sólidos Urbano

2.1.5.3. Limitações do biocarbono derivado de Resíduos Sólidos Urbano

2.1.6. Emissões de Gases de Efeito Estufa

2.1.6.1. Aterro Sanitário x Termovalorização

2.1.6.2. Fatores de emissões para a movimentação dos Resíduos Sólidos Urbano

2.1.6.3. Emissões no tratamento final de Resíduos Sólidos Urbano

2.1.6.4. Fatores de emissão de gases de efeito estufa para os cenários estabelecidos

CAPÍTULO III TECNOLOGIA INDUSTRIAL DE PIRÓLISE210

3.1. Processos termoquímicos Produção de Biocarbono

3.1.1. Torrefação

3.1.2. Pirólise

3.1.2.1. Carbonização ou pirólise lenta

3.1.2.2. Pirólise convencional

3.1.2.3. Pirólise flash

3.1.2.4. Pirólise Rápida

3.1.2.5. Pirólise de Alta Temperatura

3.1.3. Gaseificação

3.1.3.1. Gaseificador de leito fixo

3.1.3.2. Gaseificador updraft

3.1.3.3. Gaseificador downdraft

3.1.3.4. Gaseificador de leito fluidizado

3.1.4. Carbonização Hidrotérmica

3.2. Processos de conversão térmica pela pirólise

3.2.1. Processo de degradação térmica do tipo pirólise em base seca

3.2.1.1. Fase gasosa (gás pirolítico)

3.2.1.2. Fase líquida (bio-óleo)

3.2.1.3. Fase sólida (material carbonáceo pirogênico ou biocarbono)

3.2.2. Classificação dos tipos de pirólise quanto ao ajuste das condições operacionais

3.2.2.1. Carbonização ou pirólise lenta

3.2.2.2. Pirólise convencional

3.2.2.3. Pirólise flash

3.2.2.4. Pirólise Rápida

3.2.2.5. Pirólise de Alta Temperatura

3.2.3. Mecanismos envolvidos no processo de pirólise em base seca

3.2.3.1. Tipos de pirólise em base seca quanto ao ajuste das condições operacionais

3.3. Reatores para Pirólise

3.3.1. Reatores sob modo de operação batelada

3.3.2. Reatores sob modo de operação contínuo

3.3.3. Planta de pirólise rápida em escala piloto

3.3.3.1. Reator de leito fluidizado

.3.3.3.1. Reator Leito fluidizado circulante

3.3.3.2. Pirolisador de cone rotativo

3.3.3.3. Reator ablativo

3.3.3.4. Reator rosca sem fim

3.3.3.5. Variáveis de processo e aspectos operacionais de reatores pirolíticos

3.3.3.6. Escala de processo dos reatores pirolíticos

3.3.3.7. Distribuição dos produtos de pirólise (gás, líquido e sólido) em função da caracterização da biomassa e do ajuste de variáveis de processo

3.4. Pirólise para a produção de Biocarbono

3.4.1. Aplicações da pirólise lenta

3.4.1.1. Pirólise Rápida

3.4.2. Influência das características da biomassa no rendimento e qualidade do Biocarbono

3.4.3. Composição físico química da biomassa

3.4.3.1. Propriedades Morfológicas

3.4.3.1.1. Densidade básica

3.4.3.1.2 Teor de umidade

3.4.3.1.3. Poder calorífico

3.4.3.1.4. Composição química elementar

3.4.4. Caracterização da biomassa

3.4.5. Pirólise da Biomassa

3.4.6. Modelos Cinéticos da pirólise

3.4.7. Parâmetros operacionais que influenciam o processo de pirólise

3.4.7.1 Temperatura de reação

3.4.7.2. Tempo de residência

3.4.7.3. Taxa de aquecimento

3.4.7.4. Tipo de atmosfera e Pressão

3.4.8. Pirólise em leito fixo

CAPÍTULO IV BIO-ÓLEO, GÁS E BIOCARBONO.....310

4.1. Produtos da pirólise

4.1.1. Bio-óleo

4.1.1.1. Propriedades do bio-óleo

4.1.1.2 Características do bio-óleo

4.1.1.3 Teor de água no bio-óleo

4.1.1.4 Densidade do bio-óleo

4.1.1.5 Teor de sólidos

4.1.1.6 Teor de oxigênio

4.1.1.7 Poder calorífico

4.1.1.8 Aplicações do bio-óleo

4.1.1.9 Upgrading do bio-óleo

4.2. Gases da carbonização

4.2.1. Gás natural sintético – Syngas

4.3. Biocarbono

4.3.1. Aspectos Gerais de Produção do Biocarbono

4.3.2. Fatores de influência: biocarbono Parâmetros de caracterização da biomassa

4.3.3. Fatores de influência: Parâmetros de processo de biocarbono

4.3.4. Parâmetro de influência mais relevante na caracterização: Temperatura

4.3.5. Biocarbono combustível energético para minimizar os gases de efeito estufa

4.3.6. Biocarbono como substituto dos combustíveis fósseis

4.3.7. Biocarbono, bio-óleo e gás sintético ao caminho de uma economia neutra em carbono

4.3.8. Vantagens e benefícios do biocarbono

4.3.8.1. Aumento do valor energético da biomassa

4.3.8.2. Menor conteúdo de umidade

4.3.8.3. Combustão limpa

4.3.8.4. Redução das emissões dos GEE

4.3.8.5. Fácil implementação

4.3.8.6. Maior compatibilidade ambiental

4.3.8.7. Uso energético como combustível zero carbono para as siderúrgicas

4.3.8.8. Uso energético como combustível zero carbono para as cimenteiras

4.4. Tecnologia Biogreen

4.4.1. Propriedades reológicas e características de fluxo da matéria-prima

4.4.2. Sistema Industrial

4.4.3. Sistema de secagem

4.4.4. Sistema de Pirólise

4.4.5. Câmara de Pirólise

4.4.6. Sistema de Refrigeração

4.4.7. Sistema de transporte

4.4.8. Tecnologia de Pirólise em Contêineres

4.5. Caminhos da Descarbonização do Setor Ferro e Aço

4.5.1. Aumento de Eficiência dos Processos, e Integração Energética

4.5.2. Coque e o Biocarbono

4.5.3. Descarbonização com Biocarbono da Rota BF BOF de Tecnologia Convencional

4.5.4. Transição para o Aço Verde: Projetos de Redução

4.5.5. Aprimoramento Tecnológico Setor Siderúrgico

4.5.6. Tecnologia Redução Direta de Ferro e Forno Elétrico Arco

4.5.7. Tecnologias Inteligentes de Baixo Carbono

4.5.8. Aplicações do Biocarbono em Processos de Fabricação de Aço

4.5.8.1. Altos-fornos

4.5.8.2. Fabricação de Coque

4.5.8.3. Biocoque Renovável

4.5.8.4. Sinterização e Biocarbono

4.5.9. Biocarbono ativado como substituto carvão siderúrgico

4.5.10. Biocarbono ativado

4.5.10.1. Propriedades texturais do biocarbono ativado

4.5.10.2. Ativação do biocarbono

- 4.5.10.3. Ativação química e física
- 4.5.10.4. Impregnação em solução
- 4.5.10.5. Agentes de ativação
- 4.5.10.6. Comportamento energético
- 4.5.11. Estágio final de produção de biocarbono

CAPÍTULO V PIRÓLISE (BIOCARBONO) RSU.....440

5.1. Biomassa RSU

5.2. Tipos de biomassa RSU

5.3. Volume de resíduos RSU

5.3.1. Cálculo do aproveitamento da biomassa do RSU como matéria-prima para a produção de biocarbono

5.4. Caracterização de biomassa lignocelulósica (variáveis físico-químicas)

5.5. Composição físico-química da biomassa do RSU

5.6. Pirólise da biomassa do RSU

5.6.1. Pirólise rápida da biomassa do RSU

5.6.2. Produtos da pirólise rápida da biomassa do RSU

5.7. Biocarbono da biomassa do RSU

- 5.7.1. Gases não condensáveis da pirólise da biomassa do RSU
- 5.7.2. Bio-óleo da pirólise da biomassa d do RSU
- 5.7.3. Efeito dos parâmetros de reação na pirólise rápida de biomassa do RSU
- 5.7.4. Efeito da temperatura de reação
- 5.7.5. Efeito da taxa de aquecimento
- 5.7.6. Efeito do tempo de residência e vazão de gás inerte de arraste
- 5.7.7. Efeito do tamanho da partícula de biomassa do RSU
- 5.7.8. Efeito da composição da biomassa do RSU
- 5.7.9. Efeito da adição de catalisadores
- 5.7.10. Efeito do uso de sólidos inertes em um leito fluidizado
- 5.7.11 Análise Térmica da Pirólise da Biomassa do RSU
 - 5.7.11.1. Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG)
 - 5.7.11.2. Modelos cinéticos de degradação térmica
 - 5.7.11.3. Modelos de reação global e de energia de ativação distribuída
 - 5.7.11.4. Modelo de reações paralelas e independentes
- 5.7.12. Procedimento técnico da pirólise da biomassa do RSU
- 5.7.13. Matéria-prima utilizada

5.7.14. Biomassa residual do RSU

5.7.14.1. Catalisadores

5.7.14.2. Caracterização da biomassa do RSU

5.7.14.3. Densidade da biomassa do RSU

5.7.14.3.1. Densidade aparente

5.7.14.3.2. Densidade real

5.7.14.3.3. Densidade bulk

5.7.14.3.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

5.7.14.3.5. Poder calorífico

5.7.14.3.6. Análise imediata

5.7.14.3.7. Teor de umidade

5.7.14.3.8. Teor de voláteis

5.7.14.3.9. Teor de cinzas

5.7.14.3.10. Carbono fixo

5.7.14.4. Análise elementar da biomassa do RSU

5.7.14.5. Composição química das fibras lignocelulósicas

5.7.14.6. Análises termogravimétricas

5.7.14.7. Pirólise analítica da biomassa do RSU

5.7.14.7.1. Micropirólise acoplada a GC/MS

5.7.14.7.2. Micropirólise catalítica

5.7.14.7.3. Planejamento de experimentos (Fatorial 3k)

5.7.14.8. Pirólise rápida em leito fluidizado borbulhante da biomassa do RSU

5.7.14.8.1. Unidade experimental Pirólise rápida em leito fluidizado borbulhante da biomassa do RSU

5.7.14.9. Procedimento experimental da pirólise da biomassa do RSU

5.7.14.9.1. Caracterização do bio-óleo

5.7.14.9.1.1. Teor de água

5.7.14.9.1.2. Viscosidade

5.7.14.9.1.3. Poder calorífico

5.7.14.9.1.4. Análise elementar

5.7.14.9.1.5. pH

5.7.14.9.1.6. Identificação dos compostos via GC/MS

5.7.14.9.2. Caracterização do biocarbono

5.7.14.9.2.1. Densidade

5.7.14.9.2.2. Microscopia eletrônica de varredura

5.7.14.9.2.3. Análise elementar

5.7.14.9.2.4. Análise termogravimétrica

5.7.14.10. Resultado Final da Pirólise da biomassa do RSU

5.7.14.10.1. Caracterização da biomassa do RSU

5.7.14.10.2. Densidades aparente, real e bulk

5.7.14.10.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

5.7.14.10.4. Poder calorífico

5.7.14.10.5. Análise imediata

5.7.14.10.6. Análise elementar

5.7.14.10.7. Composição química

5.7.14.11. Análises termogravimétricas

5.7.14.11.1. Cinética de degradação térmica

5.7.14.11.2. Modelos cinéticos

5.7.14.12. Pirólise analítica da biomassa do RSU

5.7.14.12.1. Efeito da temperatura na pirólise analítica da biomassa do RSU

5.7.14.12.2. Efeito da presença de catalisadores na pirólise analítica da biomassa do RSU

5.7.14.12.3. Análise estatística do planejamento de experimentos

5.7.14.13.Pirólise rápida em reator contínuo de leito fluidizado borbulhante

5.7.14.13.1.Ensaio na unidade experimental

5.7.14.13.2.Resultado final do bio-óleo da biomassa do RSU

5.7.14.13.2.1.Propriedades físico-químicas do bio-óleo

5.7.14.13.3.Resultado do resíduo sólido da pirólise: biocarbono

5.7.14.13.3.1. Caracterização do resíduo sólido - biocarbono da pirólise da biomassa do RSU

5.7.15. Conclusivamente

CAPÍTULO VI BIOCARBONO E CRÉDITO DE CARBONO.....550

6.1. Mercado de Carbono

6.1.1. Mercado Regulado

6.1.2. Mercado Voluntário

6.1.3. Tipos de créditos de carbono

6.1.4. Estruturas operacionais do mercado

6.1.5. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

6.1.6. Características das Reduções Certificadas de Emissão

6.1.7. Geração de Crédito de Carbono

- 6.1.8. Metodologia utilizada
- 6.1.9. Estimativa de Emissões Reduzidas e Absorções de CO₂
- 6.1.10. Geração de créditos de carbono
- 6.1.11. Teor de carbono total
- 6.1.12. Emissão de CO₂
- 6.1.13.. Biocarbono e Mecanismo de Mercado de Carbono
 - 6.1.13.1. Biocarbono: Uma Tecnologia de Emissões Negativas
 - 6.1.13.2. Sequestro de carbono
 - 6.1.13.3. Uso do biocarbono antes do seu armazenamento permanente
 - 6.1.13.4. Mercado de remoção de carbono
 - 6.1.13.5. Estudos de caso e projetos
 - 6.1.13.6. Conclusões
- 6.2. Certificação da “International Biochar/Biocarbono Initiative”
 - 6.2.1. Certificação da “European Bbiochar/iocarbono Certificate”

BRASIL BIOMASSA CONSULTORIA ENGENHARIA TECNOLOGIA.....600

Livro Tecnologia Industrial Biocarbono Biomassa Resíduos Sólidos Urbanos
Catalogação na Fonte Brasil.

Brasil Biomassa e Energia Renovável. Curitiba. Paraná. 2026

Conteúdo: 1. Análise da biomassa Resíduos Sólidos Urbano como matéria-prima para a produção de Biocarbono no Brasil. 2. Projeções de produção de biocarbono com uso da biomassa Resíduos Sólidos Urbano. 3. Resíduos Sólidos Urbano no Brasil e o potencial de produção e de aproveitamento energético e sustentável (bioeconomia e economia circular) 4. Transição economia circular, resiliente e neutra em carbono com o biocarbono 5. Diretrizes gerais de produção de Biocarbono, bio-óleo e gás de Síntese 6. Avanços e desafios recentes na produção de biocarbono 7. Conversão termoquímica da biomassa Resíduos Sólidos Urbano em biocarbono, bio-óleo e gás de Síntese 8. Tecnologia Industrial de pirólise Biomassa Resíduos Sólidos Urbano. 9. Biocarbono e a geração de crédito de carbono. 10. Desafios no desenvolvimento da tecnologia de produção de biocarbono como substituto do carvão e do coque metalúrgico

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

Todos os direitos reservados a Brasil Biomassa e Energia Renovável

Copyright by Celso Marcelo de Oliveira

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 de fevereiro de 1998. Proibida a reprodução com ou sem fins lucrativos, parcial ou total, por qualquer meio impresso e eletrônico.

Edição eletrônica no Brasil e Portugal em versão eletrônica

© 2026 ABIB Brasil Biomassa e Energia Renovável

Edição 2026

Total 680 páginas.

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



DECLARAÇÕES PROSPECTIVAS

Este Livro Tecnologia Industrial Biocarbono Biomassa Resíduos Sólidos Urbano contém certas declarações prospectivas que dizem respeito a eventos futuros ou desempenho futuro do mercado de produção e consumo de biomassa Resíduos Sólidos Urbano para a produção de biocarbono. Estas declarações prospectivas são baseadas em previsões e estudos técnicos e dados de mercado das principais entidades internacionais sobre as expectativas de desenvolvimento e da estrutura do Livro.

Objetiva-se com o Livro Biocarbono Biomassa Resíduos Sólidos Urbano em gerar expectativas dentro de uma tendência de mercado de produção da biomassa do Resíduos Sólidos Urbano para a produção de biocarbono. Se as expectativas geradas e premissas revelarem-se incorretas por mudança de fatores e de mercado, então os resultados reais podem diferir materialmente da informação prospectiva contida neste documento. Além disso, declarações prospectivas, por sua natureza, envolvem riscos e incertezas que poderiam causar os resultados reais difiram materialmente daqueles contemplados no estudo. Assim utilizamos as declarações prospectivas de informações como apenas uma advertência no desenvolvimento do Livro Biocarbono Biomassa do Resíduos Sólidos Urbano.

DIRETORIA EXECUTIVA