

**BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL**

**LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCARBONO  
BIOMASSA DO SORGO**



**EDITORA BRASIL BIOMASSA**

**2026**

# SUMÁRIO EXECUTIVO

## LIVRO TECNOLOGIA INDUSTRIAL BIOCARBONO BIOMASSA DO SORGO

INTRODUÇÃO.....22

Declarações Prospectivas

Apresentação do Livro Biocarbono da Biomassa do Sorgo

Exposição Fundamental Biocarbono Biomassa do Sorgo

Metodologia do Livro Biocarbono Biomassa do Sorgo

DIRETRIZES FUNDAMENTAIS.....85

Diretrizes gerais de produção de biocarbono biomassa Sorgo

a. Diretrizes gerais

b. Pirólise da biomassa Sorgo

c. Tipos de pirólise para produção biocarbono Sorgo

d. Composição do biocarbono da biomassa Sorgo

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

f. Biocarbono à base da biomassa Sorgo para uso indústria de alumínio

g. Biocarbono à base da biomassa Sorgo para uso indústria de cimentos

h Biocarbono à base da biomassa Sorgo para uso indústria ferro e aço

i. Utilização de técnica analítica na caracterização de biocarbono da biomassa Sorgo

## CAPÍTULO I SORGO .....110

### 1.1. Gramíneas Forrageiras

#### 1.1.1. Ecofisiologia de Plantas Forrageiras

#### 1.1.2. Aspectos gerais da cultura do Sorgo

#### 1.1.3. Origem e Classificação Botânica

#### 1.1.4. Características morfoestruturais de variedades de Sorgo

##### 1.1.4.1. Características Agronômicas

#### 1.1.5. Caracterização de Cultivares

#### 1.1.6. Características produtivas

#### 1.1.7. Perfilhamento de Sorgo

#### 1.1.8. Produtividade e valor nutritivo de variedades de Sorgo

#### 1.1.9. Sistema de Cultivo do Sorgo

##### 1.1.9.1. Plantio

##### 1.1.9.2. Adubação

- 1.1.9.3. Colheita
- 1.1.9.4. Acúmulo de Matéria Seca
- 1.1.9.5. Acúmulo de Forragem
- 1.1.10. Manejo de corte de Sorgo
- 1.1.11. Irrigação de Sorgo
- 1.1.12. Silagem de Sorgo
  - 1.1.12.1. Considerações sobre manejo na capineira
  - 1.1.12.2. Considerações sobre ensilagem
  - 1.1.12.3. Definição e descrição do processo de ensilagem
  - 1.1.12.4. Limitações do Sorgo como forrageira para ensilagem
  - 1.1.12.5. Alternativas de tratamento sobre a qualidade da silagem de Sorgo
- 1.1.13. Sistema de Secagem
- 1.1.14. Sistema de Enfardamento Sorgo
- 1.1.15. Composição Químico Bromatológica do Sorgo
- 1.1.16. Potencial Energético do Sorgo

<b>CAPÍTULO II BIOMASSA SORGO .....</b>	<b>160</b>
---	------------

## 2.1. Geração de biomassa residual do Sorgo

### 2.1.1 Pré-tratamento de resíduos do Sorgo

### 2.1.2. Classificação dos resíduos do Sorgo

### 2.1.3. Avaliação da viabilidade do uso de resíduos do Sorgo

### 2.1.4. Propriedades dos tipos de biomassas do Sorgo

#### 2.1.4.1. Estrutura molecular

##### 2.1.4.1. Celulose

##### 2.1.4.2. Hemicelulose

##### 2.1.4.3. Lignina

#### 2.1.4.4. Variáveis físico-químicas da biomassa do Sorgo

##### 2.1.4.5. Parâmetros de análise estrutural e termogravimétrica

#### 2.1.4.6. Parâmetros de análise e de composição química imediata do Sorgo

##### 2.1.4.6.1. Teor de umidade

##### 2.1.4.6.2. Poder calorífico superior e inferior

#### 2.1.4.7. Composição básica de um combustível: elementos químicos

##### 2.1.4.7.1. Elementos químicos

##### 2.1.4.7.2. Compostos voláteis

- 2.1.4.7.3. Teor de material volátil
- 2.1.4.7.4. Teor de carbono fixo
- 2.1.4.7.5. Densidade aparente
- 2.1.4.7.6. Composição das cinzas da biomassa agrícola
- 2.1.4.7.7. Parâmetros de composição química elementar
- 2.1.4.7.8. Caracterização por análise térmica

## CAPÍTULO III TECNOLOGIA INDUSTRIAL DE PIRÓLISE .....210

### 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) SORGO.....440

5.1. Biomassa Sorgo

5.2. Tipos de biomassa Sorgo

5.3. Volume de resíduos Sorgo

5.3.1. Cálculo do aproveitamento da biomassa do Sorgo 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 Sorgo

5.6. Pirólise da biomassa do Sorgo

5.6.1. Pirólise rápida da biomassa do Sorgo

5.6.2. Produtos da pirólise rápida da biomassa do Sorgo

5.7. Biocarbono da biomassa do Sorgo

5.7.1. Gases não condensáveis da pirólise da biomassa do Sorgo

5.7.2. Bio-óleo da pirólise da biomassa do Sorgo

5.7.3. Efeito dos parâmetros de reação na pirólise rápida de biomassa do Sorgo

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 Sorgo

5.7.8. Efeito da composição da biomassa do Sorgo

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 Sorgo
  - 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 Sorgo
- 5.7.13. Matéria-prima utilizada
- 5.7.14. Biomassa residual do Sorgo
  - 5.7.14.1. Catalisadores
  - 5.7.14.2. Caracterização da biomassa do Sorgo
  - 5.7.14.3. Densidade da biomassa do Sorgo
    - 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 Sorgo

5.7.14.5. Composição química das fibras lignocelulósicas

5.7.14.6. Análises termogravimétricas

5.7.14.7. Pirólise analítica da biomassa do Sorgo

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 Sorgo

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

5.7.14.9. Procedimento experimental da pirólise da biomassa do Sorgo

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 Sorgo

5.7.14.10.1. Caracterização da biomassa do Sorgo

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 Sorgo

### 5.7.14.12.1. Efeito da temperatura na pirólise analítica da biomassa do Sorgo

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

### 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 Sorgo

#### 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 Sorgo

## 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 CO<sub>2</sub>

#### 6.1.10. Geração de créditos de carbono

#### 6.1.11. Teor de carbono total

#### 6.1.12. Emissão de CO<sub>2</sub>

#### 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 Biochar/Biocarbono Certificate”

BRASIL BIOMASSA CONSULTORIA ENGENHARIA TECNOLOGIA.....600

Livro Tecnologia Industrial Biocarbono Biomassa Sorgo

Catálogo na Fonte Brasil.

Brasil Biomassa e Energia Renovável. Curitiba. Paraná. 2026

Conteúdo: 1. Análise da biomassa Sorgo como matéria-prima para a produção de Biocarbono no Brasil. 2. Projeções de produção de biocarbono com uso da biomassa Sorgo. 3. Sorgo 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 Sorgo em biocarbono, bio-óleo e gás de Síntese 8. Tecnologia Industrial de pirólise Biomassa do Sorgo. 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 Sorgo contém certas declarações prospectivas que dizem respeito a eventos futuros ou desempenho futuro do mercado de produção e consumo de biomassa da cultura do Sorgo 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 Sorgo em gerar expectativas dentro de uma tendência de mercado de produção da biomassa do Sorgo 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 Sorgo.

DIRETORIA EXECUTIVA