

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 15/09/2025.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

JUAN PABLO ARTEAGA RAMOS

Torrefação seca oxidativa do bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos

Guaratinguetá
2023

Juan Pablo Arteaga Ramos

Torrefação seca oxidativa do bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia em Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna
Coorientadora: Prof. Dra. Ivonete Ávila

Guaratinguetá
2023

R175t Ramos, Juan Pablo Arteaga
Torrefação seca oxidativa do bagaço de cana-de-açúcar
para fins energéticos / Juan Pablo Arteaga Ramos -
Guaratinguetá, 2023.
62 f : il.
Bibliografia: f. 54-62

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna
Coorientador: Prof^a. Dr^a Ivonete Ávila

1. Biomassa. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Bagaço de
cana. I. Título.

CDU 620.91(043)

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O potencial desta pesquisa está no fornecimento do fundamento técnico da torrefação oxidativa do bagaço de cana-de-açúcar visando uma possível implementação em sistemas de cogeração de energia a base de cana-de-açúcar. A torrefação oxidativa usando como gás de arraste uma mistura entre ar e nitrogênio mostra-se promissor, devido à redução significativa deste gás inerte impactando no custo da torrefação. A demonstração da viabilidade técnica da torrefação oxidativa do bagaço de cana-de-açúcar pode ter um impacto regional e nacional, já que a cogeração de energia a base de cana-de-açúcar está bem distribuída no estado de São Paulo e presente em outros estados do Brasil.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The potential of this research lies in providing the technical basis for the oxidative roasting of sugarcane bagasse with a view to possible implementation in energy cogeneration systems based on sugarcane. Oxidative roasting using a mixture of air and nitrogen as a carrier gas shows promise, due to the significant reduction of this inert gas, impacting the roasting cost. Demonstrating the technical viability of oxidative roasting of sugarcane bagasse could have a regional and national impact, since sugarcane-based energy cogeneration is well distributed in the state of São Paulo and present in other states in Brazil.

JUAN PABLO ARTEAGA RAMOS

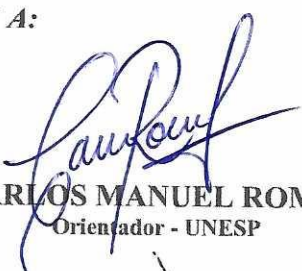
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA"**

**PROGRAMA: ENGENHARIA
CURSO: MESTRADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. CARLOS MANUEL ROMERO LUNA
Orientador - UNESP


Prof. Dr. DORIVAL PINHEIRO GARCIA
Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva


Prof.ª. Dr.ª. MARIANA PIRES FRANCO
UNESP

SETEMBRO de 2023

DADOS CURRICULARES

JUAN PABLO ARTEAGA RAMOS

NASCIMENTO 09/07/1996 – Lórica, Córdoba / Colômbia

FILIAÇÃO Alejandro Manuel Arteaga Vargas
Emelina Rosa Ramos Ballesta

2013/2020 Engenheiro Mecânico
Universidad de Córdoba

Principalmente dedico este trabalho a meus pais que me deram a educação necessária para ter esta disciplina e a minha esposa que me acompanha durante esta viagem.

AGRADECIMENTOS

Agradeço grandemente ao pessoal que apoio este processo, ao pessoal técnico da UNESP Itapeva que sempre estiveram prestos a me ajudar, principalmente a Felipe Fagnani e Thiago Oliveira. Ao professor Carlos Romero e a Greta Arce pelo seu acolhimento no Brasil, assim como a meus amigos Diego Racero e Elias Durango que acompanharam e ajudaram ao desenvolvimento deste trabalho e da minha adaptação no Brasil.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

“El tesoro más grande de un hombre son sus
sueños”

Juan Pablo Arteaga Ramos

RESUMO

A Biomassa é uma energia renovável que visa a substituição parcial dos combustíveis fósseis, dentre essas biomassas destacasse no Brasil o bagaço de cana-de-açúcar (BCA), o qual é um subproduto do processamento de cana-de-açúcar (a maior safra produzida no país). No Brasil surgiu a necessidade de aproveitar o BCA, e atualmente supre ao redor de 16% da demanda energética nacional. No entanto, o uso de BCA na produção de energia tem seus desafios, isto devido à natureza intrínseca do material e a características que dificultam seu processo de queima. Porém, para melhorar essas características pode ser aplicado um método de pré-tratamento. A torrefação, conhecido como um processo de pré-tratamento termoquímico onde a biomassa é aquecida, normalmente num ambiente com atmosfera inerte facilitando a eliminação de água e material volátil, obtendo ao final uma biomassa com características combustíveis melhoradas. Contudo, o uso de um ambiente inerte na torrefação dificulta a sua implementação em escala industrial. O objetivo deste trabalho foi estudar a torrefação de BCA num ambiente oxidativo, utilizando temperaturas entre 200 e 300 °C e concentrações volumétricas de oxigênio entre 0 e 20%. Obteve-se que a torrefação oxidativa melhorou as características energéticas do BCA, e os parâmetros de avaliação mostraram uma tendência definida com o aumento da temperatura e a concentração de oxigênio, por exemplo, o fator de melhoramento aumento, no entanto, o rendimento energético e rendimento mássico diminuíram. Porém, a torrefação oxidativa conseguiu gerar calor dentro do reator, diminuindo a demanda energética do processo e obtendo resultados semelhantes ao da torrefação inerte em temperaturas inferiores, o que visa sua implementação na escala industrial.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa; Processos termoquímicos; Energia.

ABSTRACT

Biomass is a renewable energy that aims to partially replace fossil fuels, among these biomasses, sugarcane bagasse (SB) stands out in Brazil, which is a byproduct of sugarcane processing (the largest crop produced in the country). In Brazil, the need to use bagasse arose, and it currently supplies around 16% of the national energy demand. However, the use of BCA in energy production has its challenges, due to the intrinsic nature of the material and characteristics that make its burning process difficult. Conversely, to improve these characteristics a pre-treatment method can be applied. Torrefaction, known as a thermochemical pre-treatment process, where biomass is heated, usually in an environment with an inert atmosphere, facilitating the elimination of water and volatile material, finally obtaining a biomass with a low moisture content, high energy density and improved calorific value. But the use of an inert environment in torrefaction makes it difficult to implement it on an industrial scale. The objective of this work was to study torrefaction of sugarcane bagasse in an oxidative environment, using temperatures between 200 and 300 °C and volumetric oxygen concentrations between 0 and 20%. It was found that oxidative roasting improved the energy characteristics of the SB, and the evaluation parameters showed a definite tendency with increasing temperature and oxygen concentration, for example, the enhancement factor increased, however, the energy yield and mass yield decreased. Nonetheless, oxidative torrefaction was able to generate heat inside the reactor, reducing the energy demand of the process and obtaining results like inert torrefaction at lower temperatures, which aims at its implementation on an industrial scale.

KEYWORDS: Biomass; Thermochemical processes; Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Energética ano base 2021	19
Figura 2 – Classificação dos principais tipos de biomassa	20
Figura 3 – Estrutura molecular parcial da celulose	21
Figura 4 – Estrutura molecular parcial de O-acetil-4-O-metilglucuronoxilano	21
Figura 5 – Estrutura molecular dos precursores da lignina	22
Figura 6 – Distribuição de usinas termelétricas a base de bagaço de cana-de-açúcar no Brasil	24
Figura 7 – Distribuição de usinas termelétricas a base de bagaço de cana-de-açúcar no estado de São Paulo	25
Figura 8 – Rotas de conversão de biomassa.....	26
Figura 9 – Esquema da torrefação de biomassa	28
Figura 10 – Classificação da torrefação.....	28
Figura 11 – Pesquisas na área de torrefação nas últimas quatro décadas	29
Figura 12 – Torrefação na partícula de biomassa	30
Figura 13 – Bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i>	33
Figura 14 – Calorímetro IKA C5000	34
Figura 15 – Equipamentos para preparação do BCA	35
Figura 16 – Bancada experimental de torrefação seca de biomassa	36
Figura 17 – Cilindros de gases comprimidos	37
Figura 18 – Painel de controle e mistura de gases	37
Figura 19 – Sistema de aquecimento	38
Figura 20 – Diferencias de temperatura nos pontos de controle	39
Figura 21 – Sistema de lavagem e anti-retrocesso de chama	39
Figura 22 – BCA seco e peneirado (500-850 μ m)	42
Figura 23 – Curvas TG/DTG do BCA em atmosfera inerte.....	43
Figura 24 – BCA torreficado em atmosferas e temperaturas diferentes	44
Figura 25 – Análise imediata e poder calorífico do BCA torreficado	46
Figura 26 – RM da torrefação do BCA	48
Figura 27 – RE da torrefação do BCA	49
Figura 28 – FM da torrefação do BCA	50
Figura 29 – Comportamento térmico do processo de torrefação	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Artigos sobre torrefação oxidativa de diversas biomassas	31
Tabela 2 – Análise composicional e imediata do BCA.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GEE	Gases de Efeito Estufa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MME	Ministério de Minas e Energia
IEA	International Energy Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	Food and Agriculture Organization of the United States
TORGAS	Torrefaction Gas
BCA	Bagaço de Cana-de-açúcar
NBR	Norma Brasileira Registrada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
ASTM	American Society for Testing and Materials
PCS	Poder Calorífico Superior
RM	Rendimento mássico
DE	Densidade Energética
RE	Rendimento Energético

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	BIOMASSA	19
2.1.1	Constituintes da biomassa lignocelulósica	20
2.1.2	Propriedades físicas e químicas da biomassa lignocelulósica	22
2.2	CANA-DE-AÇÚCAR	23
2.2.1	Bagaço de cana-de-açúcar na produção de energia	23
2.3	ROTAS DE CONVERSÃO DE BIOMASSA	26
2.3.1	Processos de conversão termoquímica	27
2.4	TORREFAÇÃO	27
2.4.1	Estado da arte da torrefação	29
2.5	TORREFAÇÃO SECA OXIDATIVA	30
2.5.1	Torrefação seca oxidativa de diversas biomassas	31
2.5.2	Torrefação seca oxidativa de bagaço de cana-de-açúcar	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	33
3.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA	33
3.2.1	Umidade	33
3.2.2	Análise composicional	34
3.2.3	Análise imediata	34
3.2.4	Poder Calorífico Superior (PCS)	34
3.3	PREPARAÇÃO E AMOSTRAGEM DO BCA	35
3.4	CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	35
3.5	BANCADA EXPERIMENTAL DE TORREFAÇÃO DE BIOMASSA	36
3.6	PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA TORREFAÇÃO SECA OXIDATIVA DO BCA	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BCA	41
4.1.1	Preparação do BCA	41

4.1.2	Análise composicional e imediata do BCA	42
4.1.3	Análise termogravimétrica	43
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BCA TORRIFICADO	44
4.2.1	Análise imediata e poder calorífico	45
4.3	PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA TORREFAÇÃO	47
4.4	COMPORTAMENTO TÉRMICO DA TORREFAÇÃO	51
5	CONCLUSÕES	53
5.1	FUTUROS ESTUDOS	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

No mundo, o rápido aumento da população provocou um incremento significativo na demanda de energia. Atualmente 85% dessa demanda energética é suprida pelos combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural), os quais geram problemas ambientais e causam a emissão de Gases Efeito Estufa (GEE) decorrentes da sua queima. O Acordo de Paris em 2015 teve como objetivo fortalecer a resposta global à ameaça das mudanças climáticas; um dos itens é a redução da emissão dos GEE, o que tem estimulado a procura por fontes de energia renováveis (Uemura *et al.* 2017; Ong *et al.* 2020; Yek *et al.* 2021; Kota, *et al.* 2022).

Para satisfazer a demanda de energia visando à redução das emissões de GEE, foram propostas diversas alternativas, dentre elas o uso de biomassa. A biomassa é um recurso renovável, considerado como a quarta fonte de energia no mundo com o potencial de satisfazer a demanda de energia e reduzir as emissões dos GEE (Kota *et al.* 2022; Chen *et al.* 2021).

A matriz energética brasileira, caracteriza-se pela grande participação de energias renováveis, onde a biomassa tem uma participação de aproximadamente 25%. Dentre estas biomassas a cana-de-açúcar é uma das mais usadas para produção de energia, e é a safra com maior produção no país segundo dados da FAO (2022).

No Brasil, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2023), a cana-de-açúcar tem uma representatividade de 15% (ano base 2022) das fontes de energias renováveis na matriz energética brasileira. Da produção de cana-de-açúcar se gera um subproduto o qual é o bagaço de cana-de-açúcar (BCA), atualmente, no Brasil existem usinas sucroalcooleiras, onde o BCA é queimado para produção de vapor de água e/ou para geração de energia elétrica, no entanto o BCA exibe algumas características tais como um elevado teor de umidade ($> 50\%$), natureza higroscópica, baixa massa específica e um poder calorífico relativamente baixo quando comparado com o carvão (Conag *et al.* 2017), o que provoca uma redução da eficiência de aproveitamento. Além disso, o atual sistema de gerenciamento do bagaço de cana-de-açúcar promove perdas de até 15% da massa devido à degradação provocada pela ação microbiana (Lima *et al.* 2018).

Com a finalidade de melhorar as características do BCA e evitar a perda deste material, a literatura propõe a implementação de um método de pré-tratamento conhecido como torrefação, o qual melhora as características da biomassa para fins energéticos, principalmente pelo aumento do seu poder calorífico. O processo de torrefação consiste no aquecimento da biomassa em um intervalo de temperaturas relativamente baixo ($200\text{--}300^{\circ}\text{C}$) aplicando uma baixa razão de aquecimento ($<50^{\circ}\text{C}/\text{min}$), em atmosfera não-oxidativa (inerte), usando gases como

nitrogênio, ou em atmosfera oxidativa usando ar ou uma corrente gasosa contendo uma fração de oxigênio (Cao *et al.* 2023; Bonassa *et al.* 2018; Zhang *et al.* 2019).

A torrefação em atmosfera oxidativa é um método promissor para aplicação industrial, resultando em baixos requerimentos energéticos e condições tecnológicas, assim como também a possibilidade de redução dos custos (Uemura *et al.* 2013). De acordo com Brachi *et al.* (2019), no caso da torrefação não-oxidativa (inerte), o uso de nitrogênio como gás de arraste afeta negativamente a economia do processo para aplicações em grande escala devido ao custo envolvido. Dessa forma, entende-se que a torrefação oxidativa tem algumas vantagens quando comparado à torrefação não-oxidativa.

Durante a torrefação oxidativa, o oxigênio presente no gás de arraste oxida parte dos voláteis que são gerados durante a torrefação e assim energia térmica adicional é produzida. Isto torna a torrefação oxidativa termicamente autossustentável reduzindo significativamente os custos de operação, tornando a torrefação de biomassa comercialmente mais viável (Chen *et al.* 2020). Finalmente, Zhang *et al.* (2019) sugere que esse processo seja a rota potencial para tratamento da biomassa e aumento da sua utilização na indústria.

A literatura apresenta diversos trabalhos sobre o estudo da torrefação oxidativa de diferentes biomassas (Lu *et al.* 2012; Uemura *et al.* 2013; Wang *et al.* 2013; Ramos *et al.* 2017; Uemura *et al.* 2017; Brachi *et al.* 2019; Chen *et al.* 2020; Liu *et al.* 2021; Riaz *et al.* 2022; Riaz *et al.* 2023). Os trabalhos consultados concluem que a torrefação oxidativa melhora as propriedades físicas e químicas da biomassa; o uso de um gás contendo uma concentração de oxigênio pode ser usado como gás de arraste na torrefação. A torrefação não-oxidativa do BCA foi estudada em diversos trabalhos (Joshi *et al.* 2015; Granados *et al.* 2017; Manatura 2020; Shehzad *et al.* 2020), no entanto, o estudo da torrefação oxidativa do BCA (Conag *et al.* 2017; Conag *et al.* 2018) ainda se mostra incipiente.

Dessa forma são necessários mais estudos sobre a torrefação oxidativa do BCA, pois a sua implementação nos sistemas de cogeração no setor sucroalcooleiro brasileiro, torna-se uma alternativa, a qual poderia aumentar a eficiência de geração, reduzir a poluição, assim como promover o aumento da participação da cana-de-açúcar na matriz energética.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a torrefação oxidativa do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar as propriedades físicas e químicas do bagaço de cana-de-açúcar;
- Executar os experimentos de torrefação em atmosfera inerte e oxidativa;
- Determinar os parâmetros de avaliação da torrefação;
- Caracterizar o bagaço de cana-de-açúcar torreficado.

5 CONCLUSÕES

O BCA conta com propriedades físico-químicas adequadas para sua utilização como combustível (razoável PCS e um baixo teor de cinzas), no entanto, também apresenta propriedades que limitam a eficiência do seu aproveitamento energético (elevado teor de umidade, higroscopicidade e baixa densidade energética).

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que torrefação oxidativa pode ser usada como um processo de pré-tratamento alternativo para melhorar as propriedades físicas e químicas do BCA.

A torrefação oxidativa em temperaturas inferiores a 260 °C apresentou um comportamento favorável para as propriedades energéticas do BCA, o que demonstra que é possível sua implementação e funcionamento mesmo oxidando parte do material, já que o ganho energético e diminuição do consumo de calor compensa a perda de material.

Os parâmetros de avaliação da torrefação demonstraram que o RM e RE na torrefação oxidativa são menores, no entanto o FM é melhor na torrefação oxidativa quando comparada com a inerte.

O incremento da temperatura interna no reator verificado durante a torrefação oxidativa do BCA, é um indicativo da possibilidade de redução da temperatura do processamento.

O melhoramento das propriedades do BCA na torrefação oxidativa pode ser obtido em uma inferior faixa de temperaturas (220 e 240 °C) quando comparado com a torrefação não oxidativa (240 e 260 °C). Isto poderia trazer uma redução do custo do processamento.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento da torrefação de BCA com dióxido de carbono e gases de exaustão.
- Fazer uma análise econômica da torrefação oxidativa e inerte para comparar o consumo e produção energética de ambas.
- Realizar um estudo de otimização da torrefação oxidativa do BCA.

REFERÊNCIAS

- ALIYU, A.; LEE, J. G. M.; HARVEY, A. P. Microalgae for biofuels: A review of thermochemical conversion processes and associated opportunities and challenges. **Bioresource Technology Reports**, Newcastle, v. 15, p. 100694. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X21000712>. Acesso em: 10 jan. 2022.
- ALMEIDA, S. G. *et al.* Biochar production from sugarcane biomass using slow pyrolysis: Characterization of the solid fraction. **Chemical Engineering and Processing-Process Intensification**, Araraquara, v. 179, p. 109054. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S025527012200264>. Acesso em: 10 dez. 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3172**: Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. West Conshohocken, PA: ASTM, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3175-20**: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. West Conshohocken, PA: ASTM, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1102-84**: Standard Test Method for Ash in Wood. West Conshohocken, PA: ASTM, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14660**: Madeira - Amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BAJPAL, P. **Lignocellulosic Biomass in Biotechnology**. Cambridge: Elsevier, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128218891/lignocellulosic-biomass-in-biotechnology>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- BASU, P. **Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory**. 3. ed. Cambridge: Academic press, 2018.
- BLASI, C. Modeling and simulation of combustion processes of charring and noncharring solid fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, Nápoles, v. 19, p. 71 104, 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0360128593900227>. Acesso em: 20 jun. 2021.
- BONASSA, G, *et al.* Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cascavel, v. 82, p. 2365-2378. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117312200>. Acesso em: 20 jun. 2021.

BRACHI, P. *et al.* Fluidized bed torrefaction of biomass pellets: A comparison between oxidative and inert atmosphere. **Powder Technology**, Nápoles, v. 357, p. 97-107. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591019306576>. Acesso em: 20 jun. 2021.

BRITO, J.; AGRELA, F. **New trends in eco-efficient and recycled concrete**. Sawston: Woodhead Publishing, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081024805/new-trends-in-eco-efficient-and-recycled-concrete>. Acesso em: 20 jun. 2021.

CAO, X. *et al.* Effects of oxidative torrefaction on the physicochemical properties and pyrolysis products of hemicellulose in bamboo processing residues. **Industrial Crops and Products**, Hangzhou, v. 191, p. 115986. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669022014698>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CHEN, D. *et al.* Upgrading rice husk via oxidative torrefaction: Characterization of solid, liquid, gaseous products and a comparison with non-oxidative torrefaction. **Fuel**, Nanjing, v. 275, p. 117936. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120309327>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CHEN, W. *et al.* Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. **Progress in Energy and Combustion Science**, Tainan, v. 82, p. 100887. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128520300976>. Acesso em: 20 abr. 2022.

CHENG, W. *et al.* Effect of oxidative torrefaction on particulate matter emission from agricultural biomass pellet combustion in comparison with non-oxidative torrefaction. **Renewable Energy**, Wuhan, v. 189, p. 39-51. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221334371730533X>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CONAG, A. *et al.* Energy densification of sugarcane bagasse through torrefaction under minimized oxidative atmosphere. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Talamban, v. 5, no 6, p. 5411-5419. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148122003093>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CONAG, A. *et al.* Energy densification of sugarcane leaves through torrefaction under minimized oxidative atmosphere. **Energy for Sustainable Development**, Talamban, v. 42, p. 160-169. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082617307949>. Acesso em: 20 abr. 2023.

DAI, L. *et al.* Integrated process of lignocellulosic biomass torrefaction and pyrolysis for upgrading bio-oil production: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Nanchang, v. 107, p. 20-36. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211930108X>. Acesso em: 20 abr. 2023.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy exploration & exploitation**, Trebizonda, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2002. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/014459802760170420>. Acesso em: 20 jul. 2021.

DIAS, M. *et al.* Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane. **Applied Energy**, Campinas, v. 109, p. 72-78. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261913002778>. Acesso em: 20 abr. 2023.

DOVICH FILHO, F. B. *et al.* An approach to technology selection in bioelectricity technical potential assessment: A Brazilian case study. **Energy**, Itajubá, v. 272, p. 126995. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544223003894>. Acesso em: 20 abr. 2023.

ELGARAHY, A. M. *et al.* Thermochemical conversion strategies of biomass to biofuels, techno-economic and bibliometric analysis: A conceptual review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Porto Saíde, v. 9, n. 6, p. 106503. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343721014809>. Acesso em: 20 abr. 2023.

EPE BRASIL. **Energia**. ABC da energia, [2022]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 26 abr. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONS (FAO). **Statistics**. Crops, [2020]. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 26 abr. 2023.

GENT, S. *et al.* **Theoretical and applied aspects of biomass torrefaction**: for biofuels and value-added products. Oxônia: Butterworth-Heinemann, 2017.

GRANADOS, D. A. *et al.* Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process. **Energy**, Medellín, v. 139, p. 818-827. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217313889>. Acesso em: 20 jul. 2021.

HE, Z. *et al.* Valorizing renewable cellulose from lignocellulosic biomass toward functional products. **Journal of Cleaner Production**, Tianjin, v. 414, p. 137708, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623018668>. Acesso em: 20 jul. 2023.

HOSSEINI, M. **Advanced bioprocessing for alternative fuels, biobased chemicals, and bioproducts**. Sawston: Woodhead Publishing, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128179413/advanced-bioprocessing-for-alternative-fuels-biobased-chemicals-and-bioproduts>. Acesso em: 10 jul. 2021.

IEA. **World Energy Outlook 2022**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 26 abr. 2023.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **IPCC Good Practice Guidance for LULUCF**. [2003.]. Disponível em: <https://www.ipcc-iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf.html>. Acesso em: 26 ago. 2022.

ISLAMOVA, S. I. *et al.* Oxidative torrefaction of sunflower husk pellets in the kaolin layer. **BioEnergy Research**, Cazã, v. 15, p. 183–192. 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-021-10280-6>. Acesso em: 20 ago. 2022.

JOSHI, Y. *et al.* Packed-bed torrefaction of bagasse under inert and oxygenated atmospheres. **Energy & fuels**, Delft, v. 29, n. 8, p. 5078-5087. 2015. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.5b00779>. Acesso em: 20 ago. 2021.

KANWAL, S. *et al.* Effect of torrefaction conditions on the physicochemical characterization of agricultural waste (sugarcane bagasse). **Waste Management**, Lahore, v. 88, p. 280-290. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19301849>. Acesso em: 20 ago. 2021.

KHALIL, M. J. *et al.* Utilization of sugarcane bagasse ash as cement replacement for the production of sustainable concrete—A review. **Construction and Building Materials**, Multã, v. 270, p. 121371. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820333754>. Acesso em: 20 ago. 2022.

KORSHUNOV, A. *et al.* Torrefaction of wood in a quiescent layer of talc. **Energy & Fuels**, Moscou, v. 34, n. 4, p. 4660-4669. 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.9b04478>. Acesso em: 20 ago. 2021.

KOTA, K. B. *et al.* Biomass torrefaction: An overview of process and technology assessment based on global readiness level. **Fuel**, Deradum, v. 324, p. 124663. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236122015113>. Acesso em: 20 ago. 2023.

LACA, A.; LACA, A.; DÍAZ, M. **Hydrolysis**: From cellulose and hemicellulose to simple sugars. In: Basile, A (Coord.). **Second and Third Generation of Feedstocks**. Amesterdã: Elsevier, 2019. Cap. 8, p. 213-240. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128151624000082>. Acesso em: 20 ago. 2023.

LEE, J. *et al.* Bioenergy generation from thermochemical conversion of lignocellulosic biomass-based integrated renewable energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Suwon, v. 178, p. 113240. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123000965>. Acesso em: 20 ago. 2023.

LEONTIEV, A. *et al.* The effect of an inhibitor on the torrefaction of pellets inside a quiescent layer of bentonite clay. **Biomass and Bioenergy**, Moscou, v. 130, p. 105381. 2019a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953419303307>. Acesso em: 20 dez. 2021.

LEONTIEV, A. *et al.* Torrefaction of biomass in a quiescent mineral layer: Influence of mineral filler type. **Fuel**, Moscou, v. 255, p. 115740. 2019b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236119310920>. Acesso em: 20 dez. 2021.

LI, X. *et al.* Effect of oxidative torrefaction on high temperature combustion process of wood sphere. **Fuel**, Guangzhou, v. 286, p. 119379. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120323759>. Acesso em: 20 dez. 2022.

LIANG, J. *et al.* Promising biological conversion of lignocellulosic biomass to renewable energy with rumen microorganisms: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Beijing, v. 134, p. 110335. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120306237>. Acesso em: 20 set. 2021.

LIMA, D. R. S. *et al.* Influence of different thermal pretreatments and inoculum selection on the biomethanation of sugarcane bagasse by solid-state anaerobic digestion: a kinetic analysis. **Industrial Crops and Products**, Ouro Preto, v. 111, p. 684-693. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669017308075>. Acesso em: 20 set. 2021.

LIU, Y. *et al.* Torrefaction of corn straw in oxygen and carbon dioxide containing gases: Mass/energy yields and evolution of gaseous species. **Fuel**, Jinan, v. 285, p. 119044. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120320408>. Acesso em: 20 set. 2022.

LIU, Z. *et al.* Hydrochar and pyrochar for sorption of pollutants in wastewater and exhaust gas: A critical review. **Environmental Pollution**, Beijing, v. 268, p. 115910. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749120365994>. Acesso em: 20 set. 2022.

LU, H. *et al.* Integration of biomass torrefaction and gasification based on biomass classification: a review. **Energy Technology**, Shanghai, v. 9, n. 5, p. 2001108. 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ente.202001108>. Acesso em: 20 set. 2022.

MANATURA, K. Inert torrefaction of sugarcane bagasse to improve its fuel properties. **Case Studies in Thermal Engineering**, Kamphaeng Saen, v. 19, p. 100623. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X19305118>. Acesso em: 20 set. 2022.

Ministério de minas e energia (MME). **Relatório BEN 2012**. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf. Acesso em: 05 abr. 2022.

MIRANDA, N. T. *et al.* Sugarcane bagasse pyrolysis: A review of operating conditions and products properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Campinas, v. 149, p. 111394. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121006791>. Acesso em: 20 set. 2022.

NGUYEN, L. N. *et al.* Application of rumen and anaerobic sludge microbes for bio harvesting from lignocellulosic biomass. **Chemosphere**, Sydney, v. 228, p. 702-708. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519308136>. Acesso em: 20 set. 2022.

NWABUNWANNE, N. *et al.* Improving the solid fuel properties of non-lignocellulose and lignocellulose materials through torrefaction. **Materials**, Alice, v. 14, n. 8, p. 2072. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/8/2072>. Acesso em: 20 set. 2022.

OLUGBADE, T. O.; OJO, O. T. Biomass torrefaction for the production of high-grade solid biofuels: a review. **BioEnergy Research**, Hong Kong, v. 13, n. 4, p. 999-1015. 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-020-10138-3>. Acesso em: 20 set. 2021.

ONG, H. C. *et al.* Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kuala Lumpur, v. 113, p. 109266. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119304745>. Acesso em: 20 set. 2022.

ONG, H. C. *et al.* A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach. **Energy Conversion and Management**, Kuala Lumpur, v. 209, p. 112634. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890420301722>. Acesso em: 20 set. 2022.

ONG, H. C. *et al.* Variation of lignocellulosic biomass structure from torrefaction: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kuala Lumpur, v. 152, p. 111698. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121009722>. Acesso em: 20 set. 2022.

PANG, S. Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals. **Biotechnology advances**, Christchurch, v. 37, n. 4, p. 589-597. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975018301800>. Acesso em: 20 set. 2021.

PEDROSO, D. T. *et al.* Technical assessment of the Biomass Integrated Gasification/Gas Turbine Combined Cycle (BIG/GTCC) incorporation in the sugarcane industry. **Renewable Energy**, Guaratinguetá, v. 114, p. 464-479. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117306511>. Acesso em: 20 set. 2022.

RAMOS, A.; MONTEIRO, E.; ROUBOA, A. Biomass pre-treatment techniques for the production of biofuels using thermal conversion methods—A review. **Energy Conversion and Management**, Porto, v. 270, p. 116271. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890422010482>. Acesso em: 20 set. 2022.

RIAZ, S.; OLUWOYE, I.; AL-ABDELI, Y. M. Oxidative torrefaction of densified woody biomass: Performance, combustion kinetics and thermodynamics. **Renewable Energy**, Joondalup, v. 199, p. 908-918. 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148122013660>. Acesso em: 20 abr. 2023.

RIAZ, S.; AL-ABDELI, Y. M.; OLUWOYE, I. Partially Oxidative Torrefaction of Woody Biomass Pellets: Burning Behaviour and Emission Analysis. **BioEnergy Research**, Joondalup, p. 1-11. 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-023-10572-z>. Acesso em: 20 abr. 2023.

ROUSSET, P. *et al.* Biomass torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition of the solid by-product. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Brasília, v. 96, p. 86-91. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016523701200071X>. Acesso em: 20 abr. 2022.

ROWELL, R. Cell Wall Chemistry. *In*: ROWELL, R. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC press, 2005. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/mono/10.1201/9780203492437-7/cell-wall-chemistry-roger-rowell-roger-rowell?context=ubx&refId=1c9228bc-e328-4fd7-9b81-3f9cd1306263>. Acesso em: 26 set. 2021.

SANTOS, A. **Torrefação de cavacos de eucalyptus spp usando dióxido de carbono como gás de arraste**. 2022. TCC (Graduação em Engenharia de produção), Universidade Estadual Paulista – Instituto de ciências e engenharia campus Itapeva, Itapeva, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/116160>. Acesso em: 05 abr. 2023

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. **BIOENERGIA & BIORREFINARIA: Cana-de-açúcar & Espécies florestais**. Viçosa: Produção independente, 2013.

SHEHZAD, M. *et al.* Impacts of non-oxidative torrefaction conditions on the fuel properties of indigenous biomass (bagasse). **Waste Management & Research**, Paquistão, v. 38, n. 11, p. 1284-1294. 2020. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X20916843>. Acesso em: 05 abr. 2022.

SORIA-VERDUGO, A. *et al.* Kinetics mechanism of inert and oxidative torrefaction of biomass. **Energy Conversion and Management**, Madrid, v. 267, p. 115892. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422006884>. Acesso em: 05 abr. 2023.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T 211 om-16: Ash in Wood, Pulp, Paper and Paperboard: Combustion at 525 Degrees C**. Atlanta: TAPPI, 2016.

THENGANE, S. K. *et al.* Advances in biomass torrefaction: Parameters, models, reactors, applications, deployment, and market. **Progress in Energy and Combustion Science**, Roorkee, v. 93, p. 101040. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128522000478>. Acesso em: 05 abr. 2023.

UEMURA, Y. *et al.* Torrefaction of empty fruit bunches under biomass combustion gas atmosphere. **Bioresource technology**, Seri Iskandar, v. 243, p. 107-117. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417309586>. Acesso em: 05 abr. 2023.

UEMURA, Y. *et al.* Torrefaction of oil palm EFB in the presence of oxygen. **Fuel**, Seri Iskandar, v. 103, p. 156-160. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236111007125>. Acesso em: 05 abr. 2023.

VARMA, A. K.; MONDAL, P. Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. **Industrial Crops and Products**, Roorkee, v. 95, p. 704-717. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669016308020>. Acesso em: 05 abr. 2023.

WANG, J. *et al.* Emission characteristics and influencing mechanisms of PAHs and EC from the combustion of three components (cellulose, hemicellulose, lignin) of biomasses. **Science of The Total Environment**, Shanghai, v. 859, p. 160359. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722074617>. Acesso em: 05 abr. 2023.

WAGLE, A. *et al.* Multi-stage pre-treatment of lignocellulosic biomass for multi-product biorefinery: A review. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Busan, v. 49, p. 101702, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138821007165>. Acesso em: 05 abr. 2023.

XIANG, H. *et al.* Investigation of the cofiring process of raw or torrefied bamboo and masson pine by using a cone calorimeter. **ACS omega**, Beijing, v. 4, n. 21, p. 19246-19254. 2019. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.9b02593>. Acesso em: 05 abr. 2023.

YEK, P. N. Y. *et al.* Progress in the torrefaction technology for upgrading oil palm wastes to energy-dense biochar: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Zhengzhou, v. 151, p. 111645. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121009205>. Acesso em: 05 abr. 2023.

ZHAN, Q. *et al.* A fractionation strategy of cellulose, hemicellulose, and lignin from wheat straw via the biphasic pretreatment for biomass valorization. **Bioresource Technology**, Guangzhou, v. 376, p. 128887. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852423003139>. Acesso em: 05 abr. 2023.

ZHANG, C. *et al.* Oxidative torrefaction of biomass nutshells: Evaluations of energy efficiency as well as biochar transportation and storage. **Applied Energy**, Harbin, v. 235, p. 428-441. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261918316519>. Acesso em: 05 abr. 2023.

ZHANG, C. *et al.* Oxidative torrefaction of microalga *Nannochloropsis Oceanica* activated by potassium carbonate for solid biofuel production. **Environmental Research**, Harbin, v. 212, p. 113389. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935122007162>. Acesso em: 05 abr. 2023.

ZHANG, C. *et al.* Comparative advantages analysis of oxidative torrefaction for solid biofuel production and property upgrading. **Bioresource technology**, Harbin, v. 386, p. 129531, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852423009598>. Acesso em: 05 abr. 2023.