

# RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a) o texto completo desta Dissertação será disponibilizado somente a partir de 06/04/2023.



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"  
Programa Interunidades



Mestrado

---

## Engenharia Civil e Ambiental

**MARIA ISABEL SILVA DOS SANTOS**

**IMPACTO DA TORREFAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-  
QUÍMICAS DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR: POTENCIAL DE  
COGERAÇÃO DE ENERGIA E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

Guaratinguetá / SP  
2022



**MARIA ISABEL SILVA DOS SANTOS**

**IMPACTO DA TORREFAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-  
QUÍMICAS DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR: POTENCIAL DE  
COGERAÇÃO DE ENERGIA E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

**Orientadora:** Profª Drª Maria Lucia Pereira Antunes

**Co-orientadora:** Profª Drª Eliana Vieira Canettieri

Guaratinguetá / SP  
2022



Santos, Maria Isabel Silva.

Impacto da torrefação nas características físico-químicas do bagaço de cana de açúcar: potencial de cogeração de energia e avaliação do ciclo de vida /

Maria Isabel Silva dos Santos, 2022

115 f. : il.

Orientadora: Maria Lucia Pereira Antunes

Co-orientadora: Eliana Vieira Canettieri

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia, Bauru, 2022

1. Torrefação. 2. Cogeração de energia. 3. Bagaço de cana de açúcar. 4. Avaliação de ciclo de vida. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARIA ISABEL SILVA DOS SANTOS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 06 dias do mês de abril do ano de 2022, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARIA ISABEL SILVA DOS SANTOS, intitulada **Impacto da torrefação nas características físico-químicas do bagaço de cana de açúcar e na avaliação do ciclo de vida da cogeração de energia**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARIA LUCIA PEREIRA ANTUNES SILVA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciencia e Tecnologia Campus de Sorocaba Unesp, Profa. Dra. EINARA BLANCO MACHIN (Participação Virtual) do(a) Engenharia Mecânica / University of Concepcion, Prof. Dr. MICHEL XOCAIRA PAES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Gestão Pública (GEP) / Fundação Getulio Vargas (FGV) - Escola de Administração de Empresas de São Paulo (EAESP). Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARIA LUCIA PEREIRA ANTUNES SILVA

## PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA: **MARIA ISABEL SILVA DOS SANTOS**

DE: "IMPACTO DA TORREFAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR E NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA COGERAÇÃO DE ENERGIA"

PARA:

IMPACTO DA TORREFAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS  
FÍSICO-QUÍMICAS DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR: Potencial  
de cogeração de energia e avaliação do ciclo de vida

Bauru, 06 de abril de 2022.



Profª. Drª. Maria Lucia Pereira Antunes Silva  
Orientador(a)

Para os meus pais.

## AGRADECIMENTOS

O presente estudo foi desenvolvido com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) através da concessão de bolsa de estudo de mestrado por intermédio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Além disso, o projeto também recebeu financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através da cooperação internacional Brasil-Chile, Projeto nº 2018/08419-4.

Um grande agradecimento à minha orientadora Profa. Maria Lucia P. Antunes por estar sempre disposta a me guiar e instruir durante o desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigada também por ser tão humana em seu tratar. A minha co-orientadora Profa. Eliana Canetierri por ser sempre tão solícita, gentil e ter me auxiliado em todas as etapas experimentais deste trabalho. Agradeço que tenha feito tudo o que pôde para garantir a minha entrada na universidade nos períodos de pandemia. Ter duas mulheres me orientando me inspira e motiva.

Gostaria de expressar um grande agradecimento a Miriam Ricciulli por toda orientação, ajuda e esclarecimentos oferecidos durante os testes de composição de lignocelulósicos, além da companhia oferecida durante os experimentos. Deixo também o meu agradecimento a Profa. Ivonete Ávila e toda equipe do Laboratório de Combustão e Captura de Carbono (LC3), onde foram realizados os testes de termogravimetria que integram este trabalho. Um grande agradecimento ao Prof. João Andrade por integrar os profissionais de diversas instituições que contribuíram para a realização deste trabalho.

Além disso, agradeço a Leila Ribeiro dos Santos e todo grupo de pesquisadores do Laboratório de Combustão, Propulsão e Energia (LCPE) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) responsáveis pela realização dos testes de Composição Elementar e torrefação. Deixo o meu agradecimento também aos professores Daniel Travieso, Einara Machín e toda equipe da Unidad de Desarrollo Tecnológico (UdT) – Chile, onde foram realizados os testes de torrefação aqui descritos.

Um grande agradecimento ao meu namorado Felipe Solferini pelo apoio, conversas, risadas e todo amor dedicado a mim durante o desenvolvimento deste trabalho. Você fez o processo muito mais suave.

Um agradecimento a Marta Solferni por todas as vezes em que me ajudou com a logística de testes, preparou almoços, me levou ou buscou no laboratório. O seu carinho e cuidado são sempre muito valorizados.

Um grande agradecimento também aos meus amigos Guilherme Gianotti e Clara Lôbo pelas trocas, incentivos e companheirismo nos anos dedicados a este trabalho. Muito obrigada também a Lauren Colvara por sempre me aconselhar pelos caminhos da academia e ser sempre tão presente e encorajadora na minha vida.

Por fim, o meu muito obrigada à minha família maravilhosa – Any, Sergio, Henrique, Aparecida e Laércio. Obrigada por terem sempre acreditado em mim, me incentivado, se sacrificado e torcido pelo meu sucesso. A vocês ofereço todas as minhas conquistas.

## Resumo

O agronegócio e toda a sua cadeia produtiva geram uma quantidade substancial de resíduos orgânicos que podem causar diversos impactos ambientais se não descartados corretamente. Nesse contexto, uma possibilidade interessante está nos processos de reaproveitamento de energia e, por conseguinte, processos de pré-tratamento que poderiam potencialmente otimizar a geração de energia, como a torrefação. O presente trabalho busca analisar como a torrefação afeta a composição do bagaço de cana-de-açúcar (BCA) e os impactos ambientais da adição de uma unidade de torrefação a uma usina de cogeração convencional. A torrefação foi realizada em 4 cenários diferentes: 230°C por 30 e 45 minutos; e 280°C durante 30 e 45 minutos. Análises elementares (CHN-O), termogravimétricas e caracterização da composição lignocelulósica foram realizadas para bagaço de cana *in natura* e torrefatado. Os dados experimentais serviram de base para a modelagem de uma avaliação ambiental do ciclo de vida (ACV) de um sistema teórico de cogeração de energia que contém uma unidade de torrefação; desenvolvida a partir do *software* OpenLCA aplicando a metodologia CML *baseline*. Resultados mostram que a torrefação leve a 230°C emitiu principalmente umidade e matéria volátil do BCA; enquanto a torrefação severa, a 280°C, degradou a estrutura da biomassa. Os valores de poder calorífico aumentaram em cerca de 20% para a torrefação de menor temperatura e em 27% para a torrefação mais severa. A torrefação a 230°C reduziu a massa do BCA em cerca de 13% - 15,6%, enquanto a 280°C a redução é em torno de 25 - 25,8%. A perda de massa mais acentuada na torrefação severa foi responsável por diminuir a taxa de energia da biomassa. Os resultados da ACV mostram que os principais impactos ambientais do processo de cogeração a partir do bagaço da cana-de-açúcar estão relacionados à emissão de gases de efeito estufa. O melhor desempenho em termos de valorização energética e impactos ambientais foi obtido pela torrefação a 230°C por 30 minutos.

**Palavras-chave:** bagaço de cana de açúcar, torrefação, avaliação de ciclo de vida, cogeração de energia

## Abstract

Agribusiness and its entire production chain generate a substantial amount of organic waste that can cause several environmental impacts if not correctly disposed. In this context, an interesting possibility lies in the energy reuse processes and, therefore, pre-treatment processes that could potentially increase the generation of energy, such as torrefaction. Thus, the present work seeks to analyze how torrefaction affects the composition of sugarcane bagasse (SCB) and the environmental impacts of the addition of this valorization process to a conventional cogeneration powerplant. The torrefaction process was carried out in 4 different scenarios: 230°C for 30 and 45 minutes; and 280°C for 30 and 45 minutes. Ultimate analyses (CHN-O), thermogravimetric analyses and characterization of lignocellulosic composition were conducted for raw and torrefied sugarcane bagasse. The experimental data served as basis for modeling a cradle-to-gate environmental life cycle analysis (LCA) of a theoretical energy cogeneration system that contains a torrefaction unit. Results show that mild torrefaction at 230°C emitted mainly moisture and volatile matter from SCB; whilst severe torrefaction, at 280°C, degraded significantly the structure of the biomass. The values of high heating values increased by about 20% for the lowest temperature torrefaction and by 27% for the more severe scenario. Torrefaction at 230°C reduced the mass of BCA by around 13% - 15.6%, while at 280°C the reduction was around 25 - 25.8%. The more accentuated mass loss in severe torrefaction was responsible to diminishes the energy yield of the biomass. The LCA results show that the main environmental impacts of the cogeneration process fueled by sugarcane bagasse are related to the emission of greenhouse gases. The best performance in terms of both energetic valorization and environmental impacts was obtained by torrefaction at 230°C for 30 minutes.

**Keywords:** sugarcane bagasse, torrefaction, life cycle analysis, cogeneration of energy

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Esquemático do sistema de uma usina sucroalcooleira com cogeração de energia a partir de bagaço de cana de açúcar (Fonte: Modificado de Siemens (2018)).....        | 9  |
| Figura 2. Esquemático das fases do processo de torrefação de acordo com a temperatura ao longo do tempo. (Fonte: Modificado de NHUCHHEN et al., 2014, p.14) .....             | 10 |
| Figura 3. Componentes da estrutura da parede celular (Fonte: Yarris, 2010).....                                                                                               | 13 |
| Figura 4. Componentes da Biomassa. PM – Peso Molecular e %m é a porcentagem da massa da biomassa que a substância compõe. (Fonte: Modificado de Mamvura e Danha (2020)) ..... | 14 |
| Figura 5. Alterações estruturais, químicas e de coloração da biomassa a diferentes temperaturas. (Fonte: Modificado de Shankar e colab., 2012)) .....                         | 16 |
| Figura 6. Diagrama de Van Krevelen relacionando as razões O/C e H/C com o tipo de combustível. (Fonte: Modificado de Jones et al, 2006 apud Basu, 2008).....                  | 17 |
| Figura 7. Curvas termogravimétrica (TG) e termogravimétrica diferencial (DTG) genéricas. (Fonte: autoria própria).....                                                        | 22 |
| Figura 8. Estrutura metodológica de uma ACV. ....                                                                                                                             | 24 |
| Figura 9. Ciclo de vida de um produto e as possíveis fronteiras de análise do sistema. (Fonte: modificado de GUELPA e colab., 2020 ) .....                                    | 25 |
| Figura 10. Lista de Categoria de Impactos "midpoint" e "endpoint" .....                                                                                                       | 28 |
| Figura 11. Fronteiras de um processo de torrefação de casca de arroz. (Fonte: Modificado de THENGANE (2020)).....                                                             | 38 |
| Figura 12. Fronteiras de um sistema de torrefação do caroço da azeitona. ....                                                                                                 | 39 |
| Figura 13. (a) Bagaço de Cana de Açúcar integral; (b) Moinho de facas; (c) BCA moído a 20 mesh.....                                                                           | 41 |
| Figura 14. (a) Equipamento completo de torrefação, (b) Torrefador desmontado, (c) Momento de inserção da biomassa na torre de aquecimento do torrefador. ....                 | 42 |
| Figura 15. (a) Moagem manual e peneiramento da amostra. (b) a (d) Equipamento analisador CHNS/O - <i>Series II PerkinElmer</i> . ....                                         | 44 |
| Figura 16. Balança determinadora de umidade Marte ID-200 .....                                                                                                                | 44 |
| Figura 17. Curva de Temperatura do procedimento de determinação de cinzas. (Fonte: Desenvolvida pelo autor).....                                                              | 46 |
| Figura 18. Balança termogravimétrica Q600 SDT disponível no Laboratório LC3 .....                                                                                             | 47 |

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 19. Fluxograma simplificado do método de determinação dos componentes lignocelulósicos. ....                                                               | 48 |
| Figura 20. (a) Conjunto utilizado na determinação dos extrativos da biomassa; (b) Esquemático do funcionamento do extrator Soxhlet (Fonte: autoria própria) ..... | 50 |
| Figura 21. Conjunto de filtragem a vácuo do hidrolisado .....                                                                                                     | 52 |
| Figura 22. Fronteiras do sistema de cogeração de energia a partir do BCA sem a etapa de torrefação. (Fonte: Autoria própria) .....                                | 57 |
| Figura 23. Fronteiras do sistema de cogeração de energia a partir do BCA com etapa de torrefação. (Fonte: Autoria própria) .....                                  | 57 |
| Figura 24. Evolução da coloração do BCA ao longo das condições de torrefação (Autoria própria). ....                                                              | 63 |
| Figura 25. Gráfico de pontos O/C x H/C de cada um dos cenários I, II, III e IV propostos                                                                          | 66 |
| Figura 26. Curvas TG e DTG obtidas para cada cenário proposto (Autoria própria) .....                                                                             | 74 |
| Figura 27. Comparativo entre cenários semelhantes de torrefação e BCA in natura. (Fonte: Autoria própria) .....                                                   | 79 |
| Figura 28. Comparativo de perda de massa por evento de acordo com o cenário. (Fonte: Autoria própria) .....                                                       | 80 |
| Figura 29. Composição do BCA in natura e nos cenários de torrefação propostos. (Fonte: autoria própria) .....                                                     | 88 |
| Figura 30. Resultados dos índices ambientais obtidos por kWh elétrico gerado. ....                                                                                | 95 |
| Figura 31. Resultados do impacto no aquecimento global em 100 anos (GWP100) de cada cenário proposto por kWh elétrico gerado. (Fonte: Autoria própria) .....      | 97 |

## Índice de Tabelas

|                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Comparativo entre os principais processos de conversão termoquímica .....                                                                                                      | 6  |
| Tabela 2. Composição elementar, em porcentagem, do BCA segundo quatro diferentes autores.....                                                                                            | 32 |
| Tabela 3. Composição Elementar in natura e após torrefação a duas temperaturas.....                                                                                                      | 32 |
| Tabela 4. Composição lignocelulósica do BCA (Fonte: autoria própria) .....                                                                                                               | 33 |
| Tabela 5. Composição elementar e lignocelulósica do BCA antes e depois da torrefação. ....                                                                                               | 34 |
| Tabela 6. Estudos de ACV da geração de energia a partir do BCA. (Fonte: Autoria própria) .....                                                                                           | 35 |
| Tabela 7. Cenários utilizados para torrefação e numeração dada.....                                                                                                                      | 43 |
| Tabela 8. Perda de massa para os diferentes cenários estudados obtidos com a torrefação do BCA.....                                                                                      | 62 |
| Tabela 9. Composição elementar do BCA .....                                                                                                                                              | 64 |
| Tabela 10. Valores calculados das razões O/C e H/C e variações .....                                                                                                                     | 65 |
| Tabela 11. Teor de Umidade das amostras de BCA.....                                                                                                                                      | 68 |
| Tabela 12. Teor de cinzas totais médio das amostras de BCA.....                                                                                                                          | 69 |
| Tabela 13. Valores calculados de poder calorífico inferior (PCI) e superior (PCS). ....                                                                                                  | 71 |
| Tabela 14. Massas de entrada e saída, e da TES/e após a torrefação. ....                                                                                                                 | 72 |
| Tabela 15. Principais dados obtidos a partir das curvas TG/DTG. ....                                                                                                                     | 76 |
| Tabela 16. Caracterização de lignocelulósicos no BCA <i>in natura</i> e torrefatado em porcentagem de massa total da amostra seca.....                                                   | 81 |
| Tabela 17 Caracterização do teor de hemicelulose no BCA in natura e torrefatado.....                                                                                                     | 83 |
| Tabela 18 Caracterização do teor de celulose no BCA in natura e torrefatado.....                                                                                                         | 84 |
| Tabela 19 Caracterização do teor de lignina no BCA in natura e torrefatado.....                                                                                                          | 86 |
| Tabela 20 Caracterização do teor de ácido acético no BCA in natura e torrefatado.....                                                                                                    | 87 |
| Tabela 21. Inventário das etapas de Produção de Açúcar, Secagem e Moagem do processo de produção de energia a partir do BCA torrefação por kWh elétrico gerado ao final do sistema. .... | 90 |
| Tabela 22. Inventário da torrefação do BCA nos quatro cenários propostos por kWh elétrico gerado ao final do sistema. ....                                                               | 91 |
| Tabela 23. Comparação da geração de energia a partir do BCA in natura e torrefatado. ...                                                                                                 | 92 |

|                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 24. Inventário da geração de energia em um ciclo de cogeração a partir do BCA in natura e torrefatado por kWh elétrico gerado. ....                                                                                              | 93 |
| Tabela 25. Indicadores de impacto ambiental por kWh elétrico gerado (AP – Potencial de Acidificação, GWP100 – Potencial de aquecimento global em 100 anos, EUP – Potencial de Eutrofização, HTP – Potencial de toxicidade humana). .... | 94 |

## Siglas e Abreviações

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida  
AIACV - Avaliação de Impacto Ambiental do Ciclo de Vida  
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica  
AP – Potencial de Acidificação  
BCA – Bagaço de Cana de Açúcar  
CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento  
DTG – Termogravimetria derivada  
EUP – Potencial de Eutrofização  
GWP100 – Potencial de Aquecimento Global em 100 anos  
HTP – Potencial de Toxicidade Humana  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
ICV – Inventário de Ciclo de Vida  
IPCC - Painel Intergovernamental de Mudança Climática  
PRNS - Política Nacional de Resíduos Sólidos  
SICV - Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida  
SIN - Sistema Interligado Nacional  
TGA – Termogravimetria  
UF – Unidade Funcional  
ÚNICA - União de Cana-de-Açúcar

% *Extrativos* = Porcentagem de extrativos na amostra  
% *Sólidos Totais* = Porcentagem de sólidos totais na amostra  
%C – Fração de carbono em massa  
%H - Fração de hidrogênio em massa  
%N – Porcentagem de nitrogênio no combustível  
%O - Fração de oxigênio em massa  
%X – Porcentagem do elemento X na biomassa  
%A - Porcentagem de arabinose na amostra  
%AA - Porcentagem de ácido acético na amostra  
%AF - Porcentagem de ácido fórmico na amostra

$\%Cb$  - Porcentagem de celobiose na amostra  
 $\%Cl$  - Porcentagem total de celulose na amostra  
 $\%F$  - Porcentagem de furfural na amostra  
 $\%G$  - Porcentagem de glicose na amostra  
 $\%H$  - Porcentagem total de hemicelulose na amostra  
 $\%HMF$  - Porcentagem de hidroximetilfurfural na amostra  
 $\%S$  - Porcentagem de enxofre no combustível  
 $\%Xi$  - Porcentagem de xilose na amostra  
 $c_{p,i}$  – Calor específico do componente i  
 $c_{vapor}$  – Calor latente de vaporização da água  
 $Caminho\ ótico$  - 1 cm  
 $Cinzas$  – Porcentagem de cinzas no combustível  
 $Diluição$  - Fator de diluição  
 $E_a$  – Energia de ativação  
 $H_{vap}$  – Calor de vaporização da água a 100°C  
 $k_i$  - Taxa específica de reação do componente i  
 $k_{oi}$  – Fator pré exponencial para o componente i  
 $K$  - Número de mols de nitrogênio  
 $LHV_{fuel}$  - Poder calorífico inferior  
 $m_{Gooch+filtro}$  - Massa do conjunto Gooch + Filtro  
 $m_{Gooch+filtro+amostra}$  – Massa final do conjunto Gooch + Filtro + amostra seca  
 $m_{amostra\ seca}$  - Massa da amostra seca  
 $m_{amostra}$  - Massa da amostra seca  
 $m_{balão+pérolas}$  - Massa do conjunto formado pelo balão e pérolas de vidro  
 $m_{balão+pérolas+extrativos}$  - Massa do conjunto formado por balão, pérolas de vidro e extrativos, ao final do experimento após evaporação do álcool  
 $m_{cadinho}$  - Massa do cadinho vazio  
 $m_{cadinho+cinzas}$  - Massa do conjunto de cadinho com a amostra  
 $m_{cartucho}$  - Massa do cartucho vazio  
 $m_{cartucho+amostra}$  - Massa do cartucho com a amostra dentro  
 $m_{cinzas\ e}$  - Massa de cinzas estruturais  
 $m_i$  – Massa do componente i  
 $M$  – Umidade da amostra de biomassa

$MM_i$  = Mass molar do componente i

$MM_c$  – Massa Molar do Carbono = 12g/mol

$MM_x$  – Massa Molar do elemento X

PCI – Poder calorífico inferior

PCS – Poder calorífico superior

$Perda\ Massa_c$  - Perda de massa na torrefação do cenário “c”

$Q_{biomass}$  - Calor necessário para o aquecimento da biomassa

$Q_{dr}$  – Calor necessário para a complete evaporação da umidade

$Q_{inerts}$  – Calor necessário para o nitrogênio usado na fluidização e cinzas

$Q_{nitrogen,ramp}$  - Calor necessário para o nitrogênio durante a rampa de temperatura

$Q_{nitrogen,res}$  - Calor necessário para o nitrogênio durante o tempo de residência

$Q_{ph}$  - Calor necessário para o pré-aquecimento do insumo da temperatura ambiente até a temperatura de secagem

$Q_{pd}$  - Calor necessário para o aquecimento da biomassa de 100°C até a temperatura de torrefação

$Q_{total}$  - Calor total necessário para a torrefação

$R$  = Constante Universal dos Gases

$Redução_m$  - Redução percentual da massa do componente

$T$  = Temperatura absoluta

$Teor_c^A$  - Teor do componente A no cenário “c”

$Teor_{in}^A$  - Teor do componente no BCA *in natura*

$TE_{s/e}$  – Taxa de energia da biomassa na entrada e na saída da torrefação

$UV_{abs}$  - Média das absorbâncias em UV-visível para a amostra no comprimento de onda adequado

$V_{filtrado}$  - Volume filtrado

$W$  = Trabalho

$wmf\%$  – Fração de massa de voláteis

$x$  – Número de mols de carbono

$X/C$  – Razão molar da quantidade do elemento X em relação à quantidade de C presentes na biomassa

$y$  - Número de mols de hidrogênio

$Y_{s,i}$  – Produção total de voláteis

$z$  - Número de mols de oxigênio

$\alpha$  – Coeficiente de excesso de ar

$\alpha_{i,V1}, \alpha_{i,V2}$  - Coeficientes associados à formação do componente fibroso i

$\eta_i$  – Eficiência do componente i

$\Delta H_i$  - Variação do total de entalpia do componente i

$\varepsilon$  - Absortividade da biomassa no comprimento de onda específico

## Sumário

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>RESUMO.....</b>                                                           | <b>I</b>   |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>                                               | <b>III</b> |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>                                                | <b>V</b>   |
| <b>SIGLAS E ABREVIações .....</b>                                            | <b>VII</b> |
| <b>SUMÁRIO.....</b>                                                          | <b>XI</b>  |
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                                     | <b>1</b>   |
| <b>2 OBJETIVOS.....</b>                                                      | <b>3</b>   |
| 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                              | 3          |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                          | <b>5</b>   |
| 3.1 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS.....             | 5          |
| 3.1.1 <i>Metodologias de Conversão Termoquímica .....</i>                    | <i>5</i>   |
| 3.2 TORREFAÇÃO.....                                                          | 9          |
| 3.2.1 <i>Componentes da Biomassa Vegetal.....</i>                            | <i>12</i>  |
| 3.2.2 <i>Efeitos da Torrefação na Composição da Biomassa .....</i>           | <i>14</i>  |
| 3.2.3 <i>Parâmetros Importantes da Biomassa Vegetal.....</i>                 | <i>16</i>  |
| 3.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV).....                                    | 23         |
| 3.3.1 <i>Objetivo e Escopo.....</i>                                          | <i>24</i>  |
| 3.3.2 <i>Análise de Inventário.....</i>                                      | <i>26</i>  |
| 3.3.3 <i>Avaliação de Impacto Ambiental do Ciclo de Vida (AICV).....</i>     | <i>27</i>  |
| 3.4 ESTADO DA ARTE .....                                                     | 31         |
| 3.4.1 <i>Estudos sobre Torrefação de Bagaço de Cana de Açúcar .....</i>      | <i>31</i>  |
| 3.4.2 <i>Estudos de ACV da Geração de Energia a Partir de Biomassa .....</i> | <i>34</i>  |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODO.....</b>                                             | <b>40</b>  |
| 4.1 MOAGEM .....                                                             | 40         |
| 4.2 PROCESSO DE TORREFAÇÃO.....                                              | 41         |
| 4.3 ANÁLISE QUÍMICA ELEMENTAR.....                                           | 43         |
| 4.4 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE .....                                    | 44         |
| 4.5 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS TOTAIS .....                              | 45         |
| 4.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA.....                                           | 46         |
| 4.7 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE LIGNOCELULÓSICOS .....                         | 47         |
| 4.7.1 <i>Determinação dos Extrativos da amostra in natura .....</i>          | <i>49</i>  |
| 4.7.2 <i>Procedimentos para a Caracterização de Lignocelulósicos .....</i>   | <i>51</i>  |

|          |                                                        |            |
|----------|--------------------------------------------------------|------------|
| 4.7.3    | <i>Determinação da Lignina Insolúvel</i> .....         | 52         |
| 4.7.4    | <i>Determinação da Lignina Solúvel</i> .....           | 53         |
| 4.7.5    | <i>Determinação dos Carboidratos</i> .....             | 53         |
| 4.7.6    | <i>Determinação de Cinzas Estruturais</i> .....        | 55         |
| 4.7.7    | <i>Redução de Massa</i> .....                          | 55         |
| 4.8      | <b>AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)</b> .....          | 56         |
| 4.8.1    | <i>Definição do Objetivo e Escopo</i> .....            | 56         |
| 4.8.2    | <i>Inventário</i> .....                                | 58         |
| 4.8.3    | <i>Avaliação dos Impactos Ambientais</i> .....         | 60         |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                    | <b>62</b>  |
| 5.1      | <b>TORREFAÇÃO</b> .....                                | 62         |
| 5.2      | <b>ANÁLISE QUÍMICA ELEMENTAR</b> .....                 | 63         |
| 5.3      | <b>TEOR DE UMIDADE</b> .....                           | 68         |
| 5.4      | <b>TEOR DE CINZAS TOTAIS</b> .....                     | 69         |
| 5.5      | <b>PODER CALORÍFICO</b> .....                          | 70         |
| 5.6      | <b>TAXA DE ENERGIA BIOMASSA</b> .....                  | 72         |
| 5.7      | <b>ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICAS DAS BIOMASSAS</b> ..... | 73         |
| 5.8      | <b>CARACTERIZAÇÃO DE LIGNOCELULÓSICOS</b> .....        | 81         |
| 5.8.1    | <i>Hemicelulose</i> .....                              | 82         |
| 5.8.2    | <i>Celulose</i> .....                                  | 84         |
| 5.8.3    | <i>Lignina</i> .....                                   | 85         |
| 5.8.4    | <i>Ácido Acético</i> .....                             | 86         |
| 5.8.5    | <i>Composição</i> .....                                | 88         |
| 5.9      | <b>AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA</b> .....                | 89         |
| 5.9.1    | <i>Inventário</i> .....                                | 89         |
| 5.9.2    | <i>Análise de Impacto Ambiental</i> .....              | 94         |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO</b> .....                                 | <b>98</b>  |
| <b>7</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                | <b>100</b> |
| <b>8</b> | <b>ANEXO A</b> .....                                   | <b>108</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Os bens e serviços gerados pelo agronegócio brasileiro somaram 1,82 trilhão de reais no ano de 2020 (Jan – Out), representando cerca de 24,6% do PIB nacional do período, segundo dados da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA, 2021). O país se destaca como o maior produtor mundial de soja e cana de açúcar, além de figurar como um dos maiores produtores de algodão, milho, arroz e café (EMBRAPA, 2020). Essa produção em larga escala, entretanto, acaba por gerar um volume expressivo de resíduos agrícolas, como é o caso do bagaço de cana de açúcar (BCA). De acordo com estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na safra de 2020/2021 foram produzidas 609 milhões de toneladas de cana de açúcar (IBGE, 2022). Levando em consideração os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019) de que cerca de 30% desse total é composta pelo BCA, estima-se que cerca de 183 milhões de toneladas desse resíduo agrícola foram gerados nessa safra.

Com uma quantidade tão substancial de resíduos, é essencial garantir que estes sejam dispostos de forma adequada, evitando impactos negativos ao meio ambiente. Historicamente, esses resíduos eram queimados, enviados a aterros sanitários ou dispostos em lixões (FOLETTTO et al., 2005). Entretanto, os preceitos da sustentabilidade tem sido cada vez mais importantes para a gestão e manejo de toda a cadeia produtiva industrial, sendo cada vez exigidos não apenas pelos clientes, mas pela própria legislação. O exemplo mais pungente disso é a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PRNS (BRASIL, 2017), que estabelece ferramentas e diretrizes para a gestão dos resíduos.

Nesse contexto, uma das possibilidades mais interessantes da PNRS está na consolidação legal da recuperação energética como alternativa ambientalmente adequada para o descarte desses resíduos. Essa já é uma realidade no agronegócio brasileiro que se firmou principalmente após a instituição do Programa Brasileiro do Álcool (PROALCOOL), criado em 1975 com o objetivo de incentivar a produção e adoção de álcool combustível

(ANDRADE, 2007). Nesse período o conceito de cogeração de energia, ou seja, a produção de duas modalidades de energia ao mesmo tempo, nesse caso, energia mecânica e térmica foi introduzido no país e tem sido aprimorado até os dias atuais. Esse cenário é particularmente expressivo na indústria sucroalcooleira brasileira, na qual o BCA é utilizado como insumo do processo, permitindo que essa indústria gere energia para alimentar o seu próprio processo produtivo. Dessa maneira, parte das usinas se tornaram energeticamente autossuficientes.

Atualmente, no Brasil, existem 578 usinas movidas a biomassa, sendo que destas 409 utilizam BCA como combustível e apenas duas usam o BCA como fonte de energia, segundo dados de 2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Em linhas gerais, apenas as usinas de cogeração de BCA possuem uma capacidade de geração instalada de 11,903 milhões de kW, o que corresponde a 6,75% da matriz energética brasileira (ANEEL, 2021).

Em meio à evolução tecnológica constante, se faz importante avaliar outros processos térmicos que possam maximizar a geração de energia e que, ao mesmo tempo, mitiguem os principais impactos ambientais da atualidade. Neste contexto, a torrefação se apresenta como uma alternativa interessante. Trata-se de um processo térmico que ocorre a relativa baixa temperatura (200 a 300°C) cujo objetivo é secar o resíduo ao mesmo tempo em que quebra as fibras de que o compõe (BASU, 2013a). O presente trabalho busca avaliar o impacto ambiental da torrefação do BCA na estrutura lignocelulósica deste resíduo, avaliando suas vantagens como pré-tratamento por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV) quando acrescentada esta etapa em uma planta padrão de cogeração de energia.

## 6 Conclusão

Com base na análise elementar, observou-se que não houve variação considerável na composição do BCA torrefatado em temperatura mais baixa (230°C), independentemente do tempo de residência. Em relação às amostras cuja torrefação ocorreu a 280°C, nota-se que houve uma alteração progressiva nos teores de carbono (aumento) e hidrogênio (diminuição) com o aumento do tempo de residência. Isso indica que há uma degradação mais significativa dos componentes da biomassa em temperaturas mais altas, nas quais, o tempo de residência é um fator importante a ser considerado.

Fica claro a partir dos testes de termogravimetria que as amostras torrefatadas a 230°C apresentam os três picos de perda de massa claramente delimitados, o que indica baixa degradação da hemicelulose. Estes resultados foram confirmados pela análise da caracterização de lignocelulósicos. Todas as análises desenvolvidas, portanto, corroboram para com a mesma conclusão de que a torrefação a temperaturas moderadas promoveu a liberação mais significativa de umidade e gases voláteis do BCA. Já os resultados de TG/DTG para as amostras de torrefação a 280°C apresentam uma diminuição do pico relativo à hemicelulose, o que mostra que houve uma grande decomposição deste componente, confirmado pela caracterização de lignocelulósicos.

Os resultados de PCI e PCS, a partir da composição elementar medida, mostram que houve um aumento substancial no poder calorífico da amostra, principalmente daquelas torrefatadas a 280°C. Estes resultados reforçam as conclusões já expressas. As análises de teor de umidade e cinzas se alinham também com essa hipótese. Além disso, conclui-se que houve aumento do poder calorífico, ou seja, que a torrefação atingiu o objetivo de aumentar a densidade energética do BCA. No entanto, ao avaliar a alteração do poder calorífico em relação a perda de massa durante o processo de torrefação, fica claro que o aumento maior do PCI em condições de torrefação severa ocorre às custas de maior perda de massa. Isso

diminui a quantidade de energia presente no BCA torrefatado, o que se reflete na quantidade de energia a ser potencialmente gerada em um ciclo de cogeração de energia.

Os resultados da ACV também reforçam essa realidade. A análise energética exposta no Anexo A mostra que a torrefação em menores temperaturas gera um aumento na geração de energia elétrica, enquanto em maiores temperaturas, uma diminuição. Os valores de índices de impacto ambiental encontrados mostram que devido a um aumento da quantidade de energia gerada, haveria um decréscimo na quantidade de poluentes emitidos por kWh elétrico gerado.

Por fim, a conclusão evidente reforçada por todos os testes realizados é a de que a torrefação a 230°C não foi capaz de iniciar a degradação significativa dos componentes lignocelulósicos do BCA, havendo apenas o início da degradação da hemicelulose e a liberação de umidade e voláteis. Este resultado era esperado conforme já consta na literatura a respeito do efeito da torrefação na biomassa lignocelulósica e seus componentes (ARIAS e colab., 2008; CHEN e KUO, 2011a; KANWAL e colab., 2019a; MAMVURA e DANHA, 2020). Já a torrefação a 280°C foi capaz de degradar principalmente a hemicelulose, embora frações de lignina e celulose tenham sido também afetadas. Estas alterações na composição da biomassa resultaram no aumento de seu poder calorífico. Entretanto, este aumento não se reflete na geração de energia elétrica a partir do sistema de cogeração, que evidencia que a degradação gerada pela torrefação a 230°C atuou, de fato, como um processo de valorização do insumo, o que não ocorreu a 280°C. A torrefação severa da biomassa acabou por degradar em excesso a biomassa, o que resultou não em um aumento da geração de energia elétrica, mas um decréscimo. Logo, em termos de parâmetros para a torrefação, conclui-se que este cenário é aquele que apresenta maiores vantagens energéticas e ambientais.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **ABNT NBR ISO 14040 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 1–22, 2014.

ANDRADE, Ednilton Tavares De. **Programa do proálcool e o etanol no brasil**. p. 127–136, 2007.

ANUKAM, Anthony e colab. **Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 66, p. 775–801, 2016.

ANUKAM, Anthony I K E. **GASIFICATION CHARACTERISTICS OF SUGARCANE BAGASSE ANTHONY IKE ANUKAM** A dissertation submitted in fulfillment of the requirements for the degree of **MASTER OF SCIENCE ( MSc )** in the Faculty of Science and Agriculture at the University of Fort Hare. n. January, 2013.

ARIAS, B. e colab. **Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass**. *Fuel Processing Technology*, v. 89, n. 2, p. 169–175, 2008.

BASU, Prabir. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction**. [S.l: s.n.], 2013a.

BASU, Prabir. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory**. 2nd. ed. New York: Elsevier, 2013b.

BERGMAN, P C a e colab. **Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations**. Energy research Centre of the Netherlands ECN ECNC05013, n. July, p. 71, 2005. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-C--05-013>>.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos. – 3. ed., reimpr. – Brasília : Câmara dos Deputados, Edições Câmara**. [S.l: s.n.], 2017.

- CAHYANTI, Margareta Novian e DODDAPANENI, Tharaka Rama Krishna C. e KIKAS, Timo. **Biomass torrefaction: An overview on process parameters, economic and environmental aspects and recent advancements**. Bioresource Technology, v. 301, n. December 2019, p. 122737, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122737>>.
- CAPOSCIUTTI, Gianluca e colab. **Experimental investigation on the air excess and air displacement influence on early stage and complete combustion gaseous emissions of a small scale fixed bed biomass boiler**. Applied Energy, v. 216, n. November 2017, p. 576–587, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.125>>.
- CARVALHO, Monica e colab. **Carbon footprint of the generation of bioelectricity from sugarcane bagasse in a sugar and ethanol industry**. International Journal of Global Warming, v. 17, n. 3, p. 235–251, 2019.
- CAVALETT, Otávio e colab. **Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil**. Clean Technologies and Environmental Policy, v. 14, n. 3, p. 399–410, 2012.
- CETESB. **Histórico e legislação de poluentes orgânicos persistentes (POPs) no Brasil**. Centro Regional da Convenção de Estocolmo sobre POPs para a América Latina e Caribe, v. 1, p. 25, 2014. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/pops/wp-content/uploads/sites/19/2018/06/Histórico-e-legislação-de-poluente-orgânicos-persistentes-POPs-no-Brasil.pdf>>.
- CHALUVADI, Suresh e UJJWAL, Amit e SINGH, R. K. **Effect of Torrefaction Prior to Biomass Size Reduction on Ethanol Production**. Waste and Biomass Valorization, v. 10, n. 12, p. 3567–3577, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12649-018-0389-4>>.
- CHANNIWALA, S. A. e PARIKH, P. P. **A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels**. Fuel, v. 81, n. 8, p. 1051–1063, 2002.
- CHEN, Wei Hsin e KUO, Po Chih. **Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis**. Energy, v. 36, n. 11, p. 6451–6460, 2011a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.022>>.
- CHEN, Wei Hsin e KUO, Po Chih. **Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass**. Energy, v. 36, n. 2, p. 803–811, 2011b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.036>>.
- CHEN, Wei Hsin e TU, Yi Jian e SHEEN, Herng Kuang. **Disruption of sugarcane**

**bagasse lignocellulosic structure by means of dilute sulfuric acid pretreatment with microwave-assisted heating.** Applied Energy, v. 88, n. 8, p. 2726–2734, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.027>>.

CHRISTOFOROU, Elias A e FOKAIDES, Paris A. **Life cycle assessment ( LCA ) of olive husk torrefaction.** Renewable Energy, v. 90, p. 257–266, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.022>>.

CNA, Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. **Pib do agronegócio avança novamente em outubro.** 2021.

CONAB. **Perfil do setor do açúcar e etanol no Brasil.** Companhia Nacional de Abastecimento, v. 1, p. 1–67, 2019.

CONAG, Angelique T. e colab. **Energy densification of sugarcane bagasse through torrefaction under minimized oxidative atmosphere.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 5, n. 6, p. 5411–5419, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.10.032>>.

ČUČEK, Lidija e KLEMESŠ, Jiří Jaromír e KRAVANJA, Zdravko. **Overview of environmental footprints.** Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability, p. 131–193, 2015.

DANIYANTO e colab. **Torrefaction of Indonesian sugar-cane bagasse to improve bio-syngas quality for gasification process.** Energy Procedia, v. 68, p. 157–166, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.244>>.

EL-SAYED, Saad A. e EL-BAZ, Amro A. e NOSEIR, Emad H. **Sesame and broad bean plant residue: thermogravimetric investigation and devolatilization kinetics analysis during the decomposition in an inert atmosphere.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 40, n. 9, p. 1–18, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40430-018-1356-5>>.

EMBRAPA. **Embrapa em números.** . Brasília. DF: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/embrapa-em-numeros>>.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook : Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment.** European Commission, p. 115, 2010.

FOLEGATTI-MATSUURA, Marília I. S. e PICOLI, Juliana Ferreira. **Life Cycle Inventories of Agriculture, Forestry and Animal Husbandry - Brazil.** Sustainable Recycling Industries, n. May, p. 1–143, 2018.

- FOLETTTO, Edson Luiz e colab. **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz**. Química Nova, v. 28, n. 6, p. 1055–1060, 2005.
- FOSTER, P e colab. 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. T. AND H. L. M. (EDS. ). (Org.). . Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contributi ed. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2008. p. 228–237.
- GAURAV, Gaurav e colab. **Recent progress of scientific research on life cycle assessment**. Materials Today: Proceedings, v. 47, p. 3161–3170, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.208>>.
- GIANNITRAPANI, Marco e colab. **Sulphur dioxide in Europe: Statistical relationships between emissions and measured concentrations**. Atmospheric Environment, v. 40, n. 14, p. 2524–2532, 2006.
- GRANADOS, D. A. e VELÁSQUEZ, H. I. e CHEJNE, F. **Energetic and exergetic evaluation of residual biomass in a torrefaction process**. Energy, v. 74, n. C, p. 181–189, 2014.
- GUELPA, Elisa e colab. **SOCRATCES Project title : SOLar Calcium-looping integRAtion for Thermo- Chemical Energy Storage . Power cycles : schemes , models , analysis**. n. 727348, p. 1–75, 2020.
- GUERRA, João Paulo Macedo e colab. **Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA**. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 19, n. 4, p. 814–825, 2014.
- GUINÉE, J B e UDO DE HAES, H A e HUPPES, G. **Quantitative Life Cycle Assessment of Products**. Journal of Cleaner Production, v. 1, n. 7, p. 3–13, 1993.
- GUINÉE, Jeroen B. e colab. **Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards**. III: Scientific background, n. May, p. 692, 2002a. Disponível em: <<http://www.gbv.de/dms/hbz/toc/ht013470560.pdf>>.
- GUINÉE, Jeroen B. e colab. **Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards - Part 2-b**. 2002b.
- HAMES, B e colab. **Preparation of Samples for Compositional Analysis: TP-510-42620**. . [S.l: s.n.], 2008.
- IBGE. **Indicadores IBGE - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, Estatística da Produção Agrícola**. Ibge, p. 148, 2022. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=72415>>.

- JAIN, Ravi K. e CUI, Zengdi e DOMEN, Jeremy K. Environmental impact of mining. *Environmental Impact of Mining and Mineral Processing*. 1. ed. Oxford, United Kingdom and Waltham, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 2016. p. 53–157.
- KANWAL, Sumaira e colab. **Effect of torrefaction conditions on the physicochemical characterization of agricultural waste (sugarcane bagasse)**. *Waste Management*, v. 88, p. 280–290, 2019a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.053>>.
- KANWAL, Sumaira e colab. **Effect of torrefaction conditions on the physicochemical characterization of agricultural waste (sugarcane bagasse)**. *Waste Management*, v. 88, p. 280–290, 2019b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.053>>.
- KHATRI, Poonam e PANDIT, Aniruddha B. **Systematic review of life cycle assessments applied to sugarcane bagasse utilization alternatives**. *Biomass and Bioenergy*, v. 158, n. January, p. 106365, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106365>>.
- KUYPERS, Marcel M.M. e MARCHANT, Hannah K. e KARTAL, Boran. **The microbial nitrogen-cycling network**. *Nature Reviews Microbiology*, v. 16, n. 5, p. 263–276, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>>.
- LOPES SILVA, Diogo Aparecido e colab. **Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 32, p. 532–547, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.056>>.
- MACHIN, Einara Blanco e colab. **Biomass integrated gasification-gas turbine combined cycle (BIG/GTCC) implementation in the Brazilian sugarcane industry: Economic and environmental appraisal**. *Renewable Energy*, v. 172, p. 529–540, 2021.
- MAMVURA, T. A. e DANHA, G. **Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production**. *Heliyon*, v. 6, n. 3, p. e03531, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03531>>.
- MANATURA, Kanit. **Inert torrefaction of sugarcane bagasse to improve its fuel properties**. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 19, n. March, p. 100623, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100623>>.
- MENDES, Natalia Crespo e BUENO, Cristiane e OMETTO, Aldo Roberto. **Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos**. *Production*, v. 26, n. 1, p. 160–175, 2015.
- MILES, TR e colab. **Alkali deposits found in biomass power plants. A preliminary investigation of their extent and nature**. Report of the National Renewable Energy Laboratory, v. NREL/TZ-2-, n. TP-433-8142, 1995.

- MOHAMMADI, Fateme e colab. **Life cycle assessment (LCA) of the energetic use of bagasse in Iranian sugar industry**. *Renewable Energy*, v. 145, p. 1870–1882, 2020.  
Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.023>>.
- MORAN, Michael J e SHAPIRO, Howard N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics - SI edition**. 5th. ed. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd., 2006.
- MORTARI, D. A. e colab. **Study of Thermal Decomposition and Ignition Temperature of Bagasse, Coal and Their Blends**. *Revista de Engenharia Térmica*, v. 9, n. 1–2, p. 81, 2010.
- NHUCHHEN, Daya e BASU, Prabir e ACHARYA, Bishnu. **A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction**. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, v. 2014, p. 1–56, 2014.
- NOCQUET, Timothée e colab. **Volatile species release during torrefaction of biomass and its macromolecular constituents: Part 2 - Modeling study**. *Energy*, v. 72, p. 188–194, 2014.
- PACH, M. e ZANZI, R. e BJÖRNBOM, E. **Torrefied biomass a substitute for wood and charcoal**. 6th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, n. May, p. 6, 2002.
- PARK, Junyeong e colab. **Transformation of lignocellulosic biomass during torrefaction**. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 100, p. 199–206, 2013.  
Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2012.12.024>>.
- PEDROSO, Daniel Travieso e colab. **Technical assessment of the Biomass Integrated Gasification/Gas Turbine Combined Cycle (BIG/GTCC) incorporation in the sugarcane industry**. *Renewable Energy*, v. 114, p. 464–479, 2017.
- PERKINELMER. **2400 Series II CHNS/O Elemental Analysis**. . [S.l: s.n.], 2011.
- PERRY, Robert H. e GREEN, Don W. e MALONEY, James O. **Perry's Chemical Engineers Handbook**. [S.l: s.n.], 2018.
- PIMCHUAI, Anuphon e DUTTA, Animesh e BASU, Prabir. **Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties**. *Energy and Fuels*, v. 24, n. 9, p. 4638–4645, 2010.
- PRINS, Mark J. e PTASINSKI, Krzysztof J. e JANSSEN, Frans J.J.G. **More efficient biomass gasification via torrefaction**. *Energy*, v. 31, n. 15, p. 3458–3470, 2006a.
- PRINS, Mark J. e PTASINSKI, Krzysztof J. e JANSSEN, Frans J.J.G. **Torrefaction of wood. Part 1. Weight loss kinetics**. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 77, n.

1, p. 28–34, 2006b.

RODRIGUES, Guilherme e MARCHETO, Otávio. **Análises Térmicas**. Caracterização de Materiais, p. 1–47, 2009. Disponível em:

<<https://pt.scribd.com/document/39600262/Apostila-termogravimetrica>>.

SÁ, Ívero e MARTINHO, Marcelo e NOGUEIRA, Ana Rita. Especificação de Cr(VI) em fertilizante orgânico por meio de microextração líquido-líquido dispersiva. 2017, Águas de Lindóia: [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/pops/wp-content/uploads/sites/19/2018/06/Histórico-e-legislação-de-poluentes-orgânicos-persistentes-POPs-no-Brasil.pdf>>.

SEABRA, Joaquim E. A. e colab. **Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use**. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 6, n. 3, p. 246–256, 2011.

SHANKAR, Jaya e colab. **GC Analysis of Volatiles and Other Products from Biomass Torrefaction Process**. Advanced Gas Chromatography - Progress in Agricultural, Biomedical and Industrial Applications, n. March, 2012.

SHIROSAKI MARÇAL DE SOUZA, Luri e colab. **Evaluating and ranking secondary data sources to be used in the Brazilian LCA database – “SICV Brasil”**. Sustainable Production and Consumption, v. 26, p. 160–171, 2021.

SILVA, Fábio C e colab. **Manejo De N Fertilizantes Para a Cana-De-Açúcar Com Colheita Crua , No Contexto Ecológico , Por Um Modelo De Simulação**. p. 249–253, 2006.

SINGH, Anoop e PANT, Deepak e OLSEN, Sting I. **Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources**. 1. ed. London: Springer, 2013. v. 36.

SLUITER, A. e HAMES, B. e colab. **Determination of Ash in Biomass: TP-510-42622**. . [S.l: s.n.], 2008.

SLUITER, A. e RUIZ, R. e colab. **Determination of Extractives in Biomass: TP-510-42619**. . [S.l: s.n.], 2008.

SLUITER, A. e colab. **Determination of structural carbohydrates and lignin in Biomass: TP-510-42618**. Laboratory Analytical Procedure (LAP). [S.l: s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/gen/fy13/42618.pdf>>.

SLUITER, A e colab. **Determination of Extractives in Biomass: TP-510-42619**. . [S.l: s.n.], 2008.

THENGANE, Sonal K. e colab. **Life cycle assessment of rice husk torrefaction and prospects for decentralized facilities at rice mills**. Journal of Cleaner Production, v. 275,

p. 123177, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123177>>.

TUMULURU, Jaya S e colab. A Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties. 2011, [S.l: s.n.], 2011.

UNICA, União da Cana de Açúcar. **BIOELETRICIDADE EM NÚMEROS – setembro/2020 1**. 2020.

VAN DE VELDEN, Manon e colab. **Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction**. Renewable Energy, v. 35, n. 1, p. 232–242, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.019>>.

WERNET, Gregor e colab. **The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology**. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 21, n. 9, p. 1218–1230, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>>.

WOLFOVA, M. e colab. **Comparing of the external bearing wall using three cultural perspectives in the life cycle impact assessment**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 385, n. 1, 2018.