

gabrielle

**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**Avaliação de Ciclo de Vida de uma Planta de Gaseificação:
Estudo de Caso da Palha e Sabugo de Milho**

**Autora: Marcella Haack de Arruda Dutra
Orientador: Edgar Amaral Silveira**

**Brasília, DF
2023**



Marcella Haack de Arruda Dutra

**Avaliação de Ciclo de Vida de uma Planta de Gaseificação: Estudo de Caso da
Palha e Sabugo de Milho**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao curso de graduação em
Engenharia de Energia da Universidade de
Brasília, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia de Energia

Orientador: Edgar Amaral Silveira

**Brasília, DF
2023**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Haack, Marcella.

Avaliação do Ciclo de Vida de uma Planta de
Gaseificação: Um Estudo de Caso da Palha e do Sabugo
de Milho / Marcella Haack. Brasília: UnB, 2023. 92 p. : il.
; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2023. Orientação: Edgar Amaral
Silveira.

1. Biomassa residual de milho. 2. Gaseificação. 3. Avaliação do
Ciclo de Vida. Amaral, Edgar. II. Título.

CDU Classificação



**REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS
DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA**

Marcella Haack

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação 21/07/2023) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Adjunto A: Edgar Amaral Silveira, UnB/ FT
Orientador

Prof. Adjunto A: Juliana Petrocchi Rodrigues, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. Adjunto A: Maria Vitoria Duarte Ferrari, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2023

Resumo

O panorama energético mundial atual demonstra um aumento da demanda energética, fato relacionado ao crescimento da população humana, urbanização e modernização. O aquecimento global e as alterações climáticas estão diretamente relacionadas com esse aumento da demanda energética e com a queima de combustíveis fósseis. Dessa forma, há uma busca pela redução do uso e dependência de combustíveis fósseis. Para isso, governos estão recorrendo a planos de ação para acelerar a participação de renováveis na matriz energética de seus respectivos países. Destaca-se o uso de biomassa e uma oportunidade é a biomassa residual da cultura do milho, tendo em vista o caráter agrícola do Brasil, país classificado como 3º maior produtor de milho do mundo. Para utilizar biomassa residual de milho como matéria-prima, é necessário avaliar tecnologias de conversão de energia e selecionar a forma mais eficiente, que possua menor impacto ambiental. A rota mais comum para o uso de biomassa é a combustão direta, seguida pela gaseificação, carbonização e pirólise. A gaseificação ocorre em altas temperaturas e tem como produto principal combustíveis gasosos. Diante desse contexto, o objetivo do trabalho é realizar uma avaliação energética e ambiental do processo de gaseificação como rota de valorização de biomassa residual (palha e sabugo de milho) da Região Centro-Oeste no Brasil. Para isso, foram estabelecidos: (i) a caracterização das biomassas (palha, sabugo de milho e do *blend*) a partir da literatura; (ii) o design do experimento utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta e o modelo Composto de Face Centrada (CCD); (iii) Inventário de Ciclo de Vida a partir da simulação do processo de gaseificação; (iv) Valores das Categorias de Impacto (Potencial de Aquecimento Global – GWP e Potencial de Acidificação – AP) a partir do modelo tecnológico do gaseificador no software *Sphera-GaBi*. O desenho do experimento (DoE) possui 2 variáveis independentes (V/B e %Palha de Milho) e 6 variáveis de resposta (PCI, EFG, %H₂, %CO, GWP e AP). Ao realizar otimização do processo, foi possível observar que: (a) O maior percentual de H₂ (38,5%) e o menor percentual de CO (7,3%) pertencem a biomassa sabugo de milho; (b) Tanto para o Potencial de Aquecimento Global ou Potencial de Acidificação, a maior presença de vapor (V/B =1) como agente gaseificante gera mais emissões nas 3 biomassas analisadas, destacando-se a palha de milho com média de 2,41 kgde CO₂eq. e o sabugo de milho com 0,002481 kg de SO₂eq. Dessa forma, foi possível concluir que a condição ótima para a gaseificação de biomassa de milho possui temperatura de gaseificação 600°C, proporção V/B=0,6188 e uma amostra de biomassa composta por 25,5% de palha de milho e 74,5% de sabugo de milho, mostrando uma produção de H₂= 36,6% e GWP = 2,40578 kg CO₂ eq.

Palavras-chave: Biomassa residual de milho. Gaseificação. Avaliação de Ciclo de Vida. MSR

Abstract

The current world energy landscape demonstrates an increase in energy demand, a fact related to human population growth, urbanization and modernization. Global warming and climate change are directly related to this increase in energy demand and the burning of fossil fuels. Thus, there is a search to reduce the use and dependence on fossil fuels. To this end, the government is resorting to action plans to accelerate the participation of renewables in the energy matrix of their respective countries. The use of biomass stands out as an opportunity exists is the residual biomass of the corn crop, in due to Brazil's agricultural nature, a country ranked as the 3rd largest producer of corn in the world. In order to use residual corn biomass as feedstock, it is necessary to evaluate energy conversion technologies and select the most efficient form and which has the lowest environmental impact. The most common route for using biomass is direct combustion, followed by gasification, carbonization and pyrolysis. Gasification occurs at high temperatures and its main product is gaseous fuels. Given this context, the goal of this academic work is to carry out an environmental energy and assessment of the gasification process as a route for valuing residual biomass (corn straw and cob) in the Midwest Region of Brazil. In this matter, the following were established: (i) the characterization of the biomass (corn husk, corn cob and blend) from the literature; (ii) the design of the experiment using the Response Surface Methodology and the Centered Face Design (CCD) model; (iii) Life Cycle Inventory based on the simulation of the steam gasification; (iv) Values of the Impact Categories studied (Global Warming Potential (GWP) and Acidification Potential (AP)) based on the technological model of the gasifier in the Sphera-GaBi software. The experiment design (DoE) has 2 independent variables (V/B and % Corn Straw) and 6 response variables (LHV, CGE, %H₂, %CO, GWP and AP). With the optimization process, it was possible to observe that: (a) The highest percentage of H₂ (38.5%) and the lowest percentage of CO (7.3%) belong to corn cob biomass; (b) For both Global Warming Potential and Acidification Potential, the greater presence of steam (V/B = 1) as a gasifying agent generates more emissions of kg CO₂eq and kg SO₂ eq in the 3 biomasses analyzed, with emphasis on corn husk with an average of 2.41 kg of CO₂eq. and corn on the cob with 0.002481 kg of SO₂eq. Thus, it was possible to conclude that the optimal condition for the gasification of corn biomass has a gasification temperature of 600°C, V/B ratio=0.6188 and a biomass sample composed of 25.5% corn husk and 74.5% of corn cob, showing a production of H₂ = 36.64% and GWP = 2.40578 kg CO₂ eq.

Keywords: Corn residual biomass. Gasification. Life Cycle Assessment. RSM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Participação das renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE)..... | 19 |
| Figura 2 – Classificação da biomassa..... | 20 |
| Figura 3 – Participação de cada Região na produção de milho no país de 2020 a 2022 | 24 |
| Figura 4 – Estrutura do milho..... | 25 |
| Figura 5 – Rotas tecnológicas para produção de bioenergia..... | 27 |
| Figura 6 – Sequências de etapas da gaseificação..... | 29 |
| Figura 7 – Esquema do gaseificador <i>Downdraft</i> | 30 |
| Figura 8 – Ciclo de Vida de um produto..... | 32 |
| Figura 9 – Estrutura metodológica de ACV..... | 34 |
| Figura 10 – Limites de Fronteira ACV..... | 36 |
| Figura 11 – Etapas do Inventário de Ciclo de Vida..... | 38 |
| Figura 12 – Planejamento do Experimento..... | 41 |
| Figura 13 – Planejamento composto central para três fatores..... | 48 |
| Figura 14 – Fluxograma de Trabalho TCC 2..... | 52 |
| Figura 15 – Pontos Centrais e Axiais no CCD..... | 57 |
| Figura 16 – Modelos Polinomiais no Design Expert..... | 58 |
| Figura 17 – Modelo de gaseificação via software EES..... | 59 |
| Figura 18 – Delimitação das fronteiras do sistema estudado..... | 63 |
| Figura 19 – Fluxos de entradas e saídas do modelo de Gaseificador no Gabi..... | 64 |
| Figura 20 – Gráfico de Superfícies 3D..... | 78 |
| Figura 21 – Gráficos Previsto <i>versus</i> Real..... | 81 |
| Figura 22 – Ponto ótimo..... | 82 |

Lista de gráficos

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 – Potencial de Aquecimento Global..... | 75 |
| Gráfico 2 – Potencial de Acidificação..... | 76 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Sumário de estudos da literatura envolvendo ACV de processos termoquímicos de biomassas residuais..... | 16 |
| Tabela 2 – Emissões de GEE no Brasil 2019 e 2020 (tCO ₂ - GWP)..... | 18 |
| Tabela 3 – Os 5 maiores produtores mundiais de milho..... | 23 |
| Tabela 4 – Coeficiente Técnico de resíduos provenientes da cultura do milho..... | 26 |
| Tabela 5 – Normas que regem a ACV..... | 33 |
| Tabela 6 – Opções de Bases de Dados..... | 34 |
| Tabela 7 – Métodos de AICV e a sua origem..... | 40 |
| Tabela 8 – Categorias de Impactos Ambientais..... | 41 |
| Tabela 9 – Softwares de simulação de ACV..... | 44 |
| Tabela 10 – Opções de Bases de Dados..... | 45 |
| Tabela 11 – Caracterização das biomassas de milho..... | 53 |
| Tabela 12 – Razão Molar..... | 54 |
| Tabela 13 – Fórmula química do combustível..... | 55 |
| Tabela 14 – Desenho do Experimento..... | 55 |
| Tabela 15 – Parâmetros para a simulação no EES..... | 60 |
| Tabela 16 – Inventário de Ciclo de Vida..... | 65 |
| Tabela 17 – Resultados da modelagem de gaseificação..... | 70 |
| Tabela 18 – Coeficientes das equações de predição..... | 77 |
| Tabela 19 – Modelos Polinomiais..... | 79 |
| Tabela 20 – Valores previstos de respostas na condição ótima..... | 83 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|-------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACV | Avaliação do Ciclo de Vida |
| AICV | Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida |
| APUD | Do latim "citado por" |
| CF | Carbono Fixo |
| CGE | <i>Cold Gas Efficiency</i> |
| EES | <i>Engineering Equation Solver</i> |
| EGF | Eficiência do Gás Frio |
| EPA | <i>Environmental Protection Agency</i> |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| EUA | Estados Unidos da América |
| GEE | Gases de efeito estufa |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| ICV | Inventário de Ciclo de Vida |
| IEA | <i>International Energy Agency</i> |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> , ou Organização Internacional para Padronização, em português |
| LCA | <i>Life Cycle Assessment</i> |
| LSPA | Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| MV | Materiais Voláteis |
| NBR | Norma Brasileira |
| OIE | Oferta Interna de Energia |
| PCI | Poder Calorífico Inferior |

| | |
|-------------|---|
| SEEG | Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa |
| TCC | Trabalho de Conclusão de Curso |
| USA | <i>United States of America</i> |
| USDA | <i>United States Departmente of Agriculture</i> |
| °C | Graus Celsius |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 Introdução | 12 |
| 1.1 Motivação | 13 |
| 1.1.1 Objetivo geral..... | 13 |
| 1.1.2 Objetivo específico..... | 14 |
| 1.2 Organização do trabalho..... | 14 |
| 2 Estado da Arte | 15 |
| 2.1 Revisão Bibliográfica | 16 |
| 2.1.1 Contexto Energético..... | 16 |
| 2.1.2 Biomassa | 19 |
| 2.1.3 Palha e sabugo de milho..... | 21 |
| 2.1.4 Processos termoquímicos | 24 |
| 2.1.5 Gaseificação..... | 26 |
| 2.1.6 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) | 28 |
| 2.1.6.1 Definição de objetivo e escopo..... | 31 |
| 2.1.6.2 Análise de Inventário | 33 |
| 2.1.6.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) | 35 |
| 2.1.6.4 Ferramentas de apoio ao ACV e Base de Dados | 38 |
| 2.1.7 Otimização do Processo da Gaseificação | 39 |
| 2.1.7.1 Planejamento de experimento | 39 |
| 2.1.7.2 Metodologia de Superfície de Resposta | 41 |
| 3 Materiais e Métodos | 44 |
| 3.1 Escolha da Biomassa | 45 |
| 3.2 Desenho do Experimento (DoE)..... | 47 |
| 3.3 Gaseificador | 50 |
| 3.4 Avaliação de Ciclo de Vida | 53 |
| 3.4.1 Escopo..... | 53 |
| 3.4.2 Fronteiras do Sistema e Unidade Funcional..... | 53 |
| 3.4.3 Inventário do Ciclo de Vida..... | 54 |
| 4 Resultados e Discussões | 58 |
| 4.1 Poder Calorífico Inferior e Eficiência do Gás Frio | 59 |
| 4.2 Percentual de emissão de gás hidrogênio e monóxido de carbono | 60 |
| 4.3 Categorias de Impacto Ambientais: Potencial de Aquecimento Global e Potencial de Acidificação | 61 |
| 4.4 Resultados MSR e Correlação dos Dados | 63 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 4.5 Análise de Otimização | 69 |
| 5 Conclusão | 71 |
| Referências | 73 |

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o panorama energético mundial demonstra um aumento na demanda energética, fato relacionado ao crescimento da população humana, urbanização e modernização (FREITAS *et al.*, 2020). A questão energética pode estar atrelada a fatores políticos, tomando-se como exemplo, a invasão da Federação Russa à Ucrânia, que trouxe consequências no mercado de energia mundial e resultando em uma crise energética global sem precedentes (*INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2022*). Para acompanhar essa demanda energética, reduzir a dependência de suprimentos externos e contornar as problemáticas envolvidas com o uso de combustíveis fósseis (limitações de disponibilidade futura, emissão de gases danosos à Terra, entre outros) é necessário buscar alternativas (ASIF; MUNEER, 2007). Trazendo para a situação presente, governos vêm tentando proteger os consumidores dos preços mais altos da energia e reduzir a dependência de suprimentos russos. Toma-se como exemplo a produção de hidrogênio (H₂) que está ganhando um enorme interesse de pesquisa em todo o mundo principalmente pela sua propriedade de combustível mais limpo (CHEN *et al.*, 2020). A vantagem de utilizar biomassa é por sua fonte ser de origem renovável capaz de substituir ou complementar os combustíveis fósseis, sem que haja grandes modificações nas tecnologias utilizadas (FRIEDRICH, 2015).

O desafio da redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) para combater as alterações climáticas pode ser abordado através de uma variedade de estratégias. Como por exemplo, a melhoria das tecnologias existentes ou o desenvolvimento de novas tecnologias mais ecológicas que possam complementar ou substituir as atuais (COSTA, 2019). Segundo o Relatório Síntese do MME e EPE (2022), a participação de renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil é de 44,7%, enquanto no mundo esse número cai para 14,1%. A Repartição da OIE brasileira de 2021 consiste em: biomassa de cana (16,4%), hidráulica (11,0%), lenha e carvão vegetal (8,7%) e outras renováveis (8,7%).

Ao buscar alternativas renováveis para a matriz energética brasileira, destaca-se o uso de biomassa que pode ser convertida em biocombustível de forma líquida, sólida ou gasosa e que estão disponíveis em áreas rurais, indústrias, agroindústrias e podem ser utilizadas para suprir as necessidades energéticas locais e regionais (FRIEDRICH, 2015). Diante de várias rotas de conversão, há uma subdivisão em 2

grandes categorias: a rota bioquímica e termoquímica. A rota mais comum para o uso de biomassa é a combustão direta, seguida pela gaseificação, carbonização e pirólise (BASU, 2018). A rota de gaseificação é uma técnica eficaz e método limpo para produzir gás enriquecido com hidrogênio (CHEN *et al.*, 2020).

Consiste em uma rota de conversão que ocorre em altas temperaturas (600 - 1200°C) e na presença de um agente gaseificador (vapor, ar, oxigênio ou uma mistura), transformando a biomassa em combustíveis gasosos (PARASCANU *et al.*, 2021). Para utilizar uma biomassa específica para produção de biocombustível via gaseificação, é necessário investigar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do processo condicionado a diferentes parâmetros operacionais (ASIF; MUNEER, 2007).

Uma das culturas mais cultivadas em todo o mundo é o milho, uma biomassa amilácea que recebe esse nome devido ao seu principal componente químico, o amido (VAZ JÚNIOR, 2020). O sabugo e a palha do milho são subprodutos que podem ser gerados durante o processamento industrial, especialmente quando o objetivo é a produção de milho verde em conserva, e nesses casos, eles apresentam ótimas oportunidades para serem utilizados na geração de energia. Aproveitar esses resíduos pode contribuir para descentralizar a geração de energia, resultando em uma redução de investimentos em linhas de transmissão e minimizando as perdas de energia devido a distâncias menores (MARAFON *et al.*, 2016).

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma análise técnica e ambiental da gaseificação de resíduos de biomassa do milho. A originalidade do estudo está contemplada na associação da modelagem numérica (modelo de equilíbrio termoquímico) do processo de gaseificação, da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida e da análise estatística (Metodologia de Superfície de Resposta) para a obtenção de modelos matemáticos que descrevam a qualidade do gás produzido (Poder Calorífico Inferior, Eficiência de Gás Frio e conteúdo de H₂) e o impacto ambiental associado (Potencial de Aquecimento Global e Acidificação).

1.1 MOTIVAÇÃO

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é realizar uma avaliação energética e ambiental do processo de gaseificação como rota de valorização de biomassa residual (palha e

sabugo de milho) da Região Centro-Oeste no Brasil.

1.1.2 Objetivo específico

- Revisão bibliográfica do estado da arte e situação atual de alternativas tecnológicas da produção de biocombustíveis de 2ª geração e da Metodologia Avaliação do Ciclo de Vida;
- Estabelecer as propriedades dos resíduos de milho (sabugo, palha e blend) a partir da literatura;
- Determinar um desenho de experimentos (DoE) que permita a utilização da Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) para otimização do processo de gaseificação
- Simular os balanços mássicos e energéticos do processo de gaseificação à vapor com um modelo de equilíbrio termodinâmico desenvolvido no software *EES* para as condições estabelecidas no DoE.
- Realizar o Inventário de Ciclo de Vida a partir dos resultados do software *EES*;
- Construir o modelo tecnológico da planta de gaseificação utilizando o software de Avaliação de Ciclo de Vida *Sphera-GaBi*;
- Realizar a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para as Categorias de Impacto Potencial de Aquecimento Global e Acidificação.
- Encontrar o ponto otimizado do processo de gaseificação visando uma maior qualidade do gás produzido com um menor impacto ambiental;

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No presente capítulo é feito o enquadramento do tema e são apresentadas as motivações para a realização deste trabalho, sendo também feita a apresentação dos objetivos da dissertação e um resumo da estrutura do documento.

No capítulo 2 é apresentado o Estado da Arte incluindo a revisão bibliográfica, contextualização sobre os assuntos abordados e estudos semelhantes.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados ao longo do estudo, tais como a caracterização da biomassa, desenho do experimento,

Metodologia de Superfície de Resposta e a descrição detalhada de todos os processos estudados.

No capítulo 4 é feita a análise e discussão e resultados. No capítulo 5 estabelece-se a conclusão.

2 ESTADO DA ARTE

Para analisar a viabilidade energética e ambiental da gaseificação de biomassa existem muitos trabalhos publicados e que utilizaram como ferramenta a Análise do Ciclo de Vida (ACV), abordando assim questões relacionadas aos impactos ambientais produzidos durante o Ciclo de Vida destes combustíveis. A Tabela 1 apresenta um sumário de estudos que investigaram a Avaliação de Ciclo de Vida de rotas termoquímicas aplicadas para conversão de resíduos de biomassa em biocombustíveis.

Tabela 1 – Sumário de estudos da literatura envolvendo ACV de processos termoquímicos de biomassas residuais

| Matéria-prima | Tecnologia de conversão | Software | Base de dados | Referência |
|----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------------|
| Biomassa lenho-celulósica | Compressão e liquefação | <i>SimaPro 7</i> | <i>CML 2000</i> | Coelho (2008) |
| Bagaço de cana-de-açúcar | Gaseificação | <i>SimaPro 7</i> | <i>Eco-Indicador 99</i> | Renó (2011) |
| Salgueiro | Torrefação e Gaseificação | <i>GaBi Education</i> | <i>ELCD</i> | Oliveira (2013) |
| Microalgas | Gaseificação, hidrólise e fermentação | <i>SimaPro 8</i> | <i>ecoinvent 3</i> | Costa (2019) |
| Casca da Castanha de caju | Pirólise e Gaseificação | <i>GaBi 5.0</i> | Não menciona | Freitas <i>et al.</i> (2020) |
| Biomassa residual de milho | Gaseificação | <i>SimaPro</i> | <i>ecoinvent</i> | Aseffe <i>et al.</i> (2021) |

Fonte: Autora (2023).

É possível inferir da Tabela 1 que pouco trabalhos contemplaram o estudo da biomassa residual de milho. O estudo de Aseffe *et al.* (2021) possui semelhanças ao abordar a gaseificação da biomassa de milho com a presença de um agente gaseificante (ar) e realizar balanço energético e ACV. No entanto, há diferenças como o tipo de agente gaseificante e a utilização dos valores obtidos na ACV dentro da Metodologia de Superfície de Resposta, visando a obtenção de um ponto otimizando levando em consideração o desempenho ambiental e a qualidade do gás gerado.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Contexto Energético

O contexto energético mundial está marcado pelo rápido desenvolvimento tecnológico e industrial, fato que afeta a humanidade, deixando algumas preocupações como o esgotamento dos recursos energéticos fósseis e a deterioração do meio ambiente (ALAUDDIN *et al.*, 2010). Há uma maior demanda energética relacionada a fatores como urbanização e crescimento populacional (FREITAS *et al.*, 2020). Esse aumento de demanda energética tem como consequência mudanças climáticas motivadas pelas atividades humanas, em particular as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), com impacto direto no meio ambiente (ASIF; MUNEER, 2007). Em 2021, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 445,4 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO₂-eq), sendo a maior parte (197,8 Mt CO₂-eq) gerada no setor de transportes (MME; EPE, 2022). Em termos de emissões por habitante, cada brasileiro que produziu e consumiu energia em 2021 emitiu em média 1,9 t CO₂-eq, ou seja, o equivalente a 13% de um americano, 32% de um cidadão da União Europeia e 27% de um chinês, de acordo com os últimos dados divulgados pela Agência Internacional de Energia (siga IEA em inglês) para o ano de 2019 (MME; EPE, 2022). Olhando para as emissões globais, o Brasil ocupa o quinto lugar entre os maiores poluidores climáticos com cerca de 3,2% do total mundial, ficando atrás apenas de China, EUA, Rússia e Índia, segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2021).

Tabela 2 – Emissões de GEE no Brasil 2019 e 2020 (tCO₂ - GWP)

| Setores | 2019 | % | 2020 | % | Varição 2019-2020 |
|------------------------------------|---------------|------|---------------|------|-------------------|
| Agropecuária | 562.987.702 | 29% | 577.022.998 | 27% | 2.5% |
| Energia | 412.466.747 | 21% | 393.705.260 | 18% | -4.5% |
| Processos Industriais | 99.472.616 | 5% | 99.964.389 | 5% | 0.5% |
| Resíduos | 90.399.714 | 5% | 92.047.812 | 4% | 1.8% |
| Mudança de uso da Terra e Floresta | 806.996.124 | 41% | 997.923.296 | 46% | 23.7% |
| Total de Emissões Brutas | 1.972.322.903 | 100% | 2.160.663.775 | 100% | 9.5% |
| Total de Emissões Líquidas | 1.336.613.309 | - | 1.524.954.161 | - | 14.1% |

Fonte: SEEG (2021)

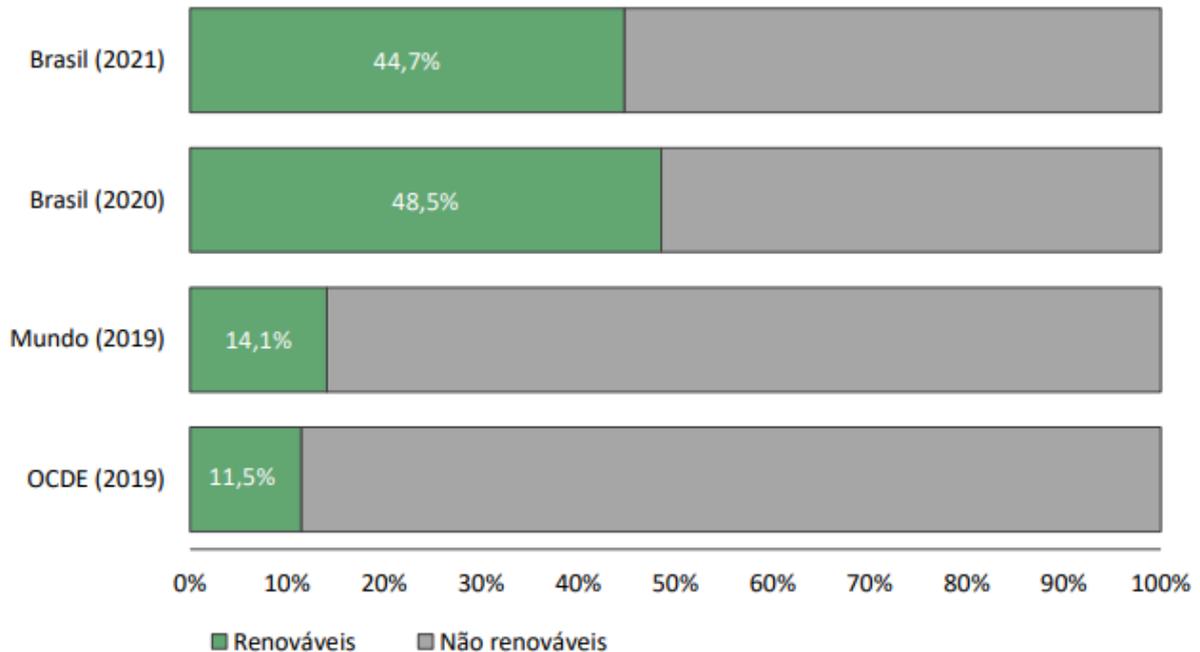
Analisando a Tabela 2, quando se considera as emissões líquidas, ou seja, descontando as remoções (o carbono sequestrado) por florestas secundárias, áreas protegidas e terras indígenas, a participação da Mudança de Uso da Terra e Floresta cai para 24% (362 MtCO₂-eq). Em seguida vêm a agropecuária, com 27% das emissões brutas (577 MtCO₂-eq), o setor de energia, com 18% (394 MtCO₂-eq), e os processos industriais, com 5% do total (100 MtCO₂-eq), quase empatado com o setor de resíduos, que detém 4% das emissões brutas (92 MtCO₂ eq) (SEEG, 2021). A partir da Tabela 2, é possível observar que, dentro dos setores enunciados, o setor de energia foi o único com uma redução de 4,5% de emissões de GEE. A explicação pode ser descrita pelo Relatório (SEEG, 2021):

O principal fator a explicar a elevação foi o desmatamento, em especial na Amazônia e no Cerrado. Os gases de efeito estufa lançados na atmosfera pelas mudanças do uso da terra aumentaram 23,7%, o que mais do que compensou a queda expressiva verificada no setor de energia, que na esteira da pandemia e da estagnação econômica viu suas emissões regressarem ao patamar de 2011.

Figura 1 – Participação das renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE)

Participação das renováveis na OIE

Fonte: Agência Internacional de Energia (AIE) e EPE para o Brasil. Elaboração: EPE



Fonte: Balanço Energético Nacional - BEN (2022)

A participação da energia renovável no Brasil (44,7%) é maior do que em comparação com a matriz energética mundial (14,1%), conforme a Figura 1. A participação das renováveis na matriz energética em 2021 foi marcada por uma queda da oferta de energia hidráulica, associada à escassez hídrica/menor quantidade de chuvas e ao acionamento das usinas termelétricas (MME; EPE, 2022).

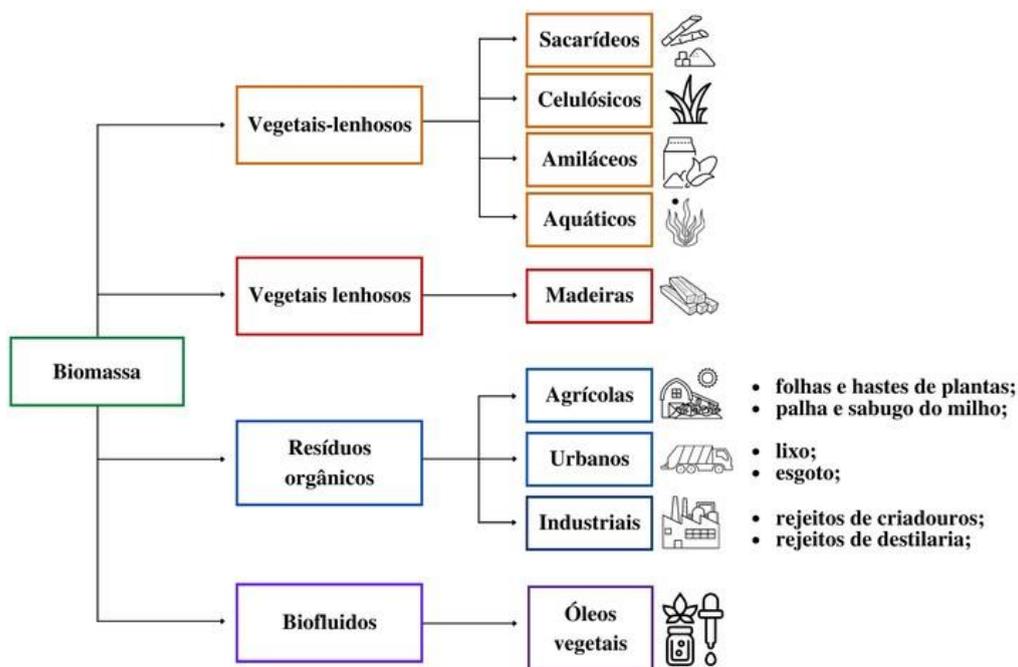
De toda forma, os combustíveis fósseis não só estão infligindo enormes impactos ambientais no meio ambiente, mas também o seu custo está em crescimento, enquanto a energia gerada a partir de fontes renováveis está em queda e é abundante, inesgotável e amplamente disponível (ASIF; MUNEER, 2007). Diante desse cenário, entram as energias renováveis como fonte alternativa de energia, descritas por FRIEDRICH (2015) como:

“Energias renováveis são energias alternativas ao modelo energético tradicional, tanto pela sua disponibilidade (presente e futura) garantida, como pelo seu menor impacto ambiental, diferente dos combustíveis fósseis que precisam de milhares de anos para se formar e agridem consideravelmente o meio ambiente.”

2.1.2 Biomassa

Tendo em vista a participação da energia renovável no Brasil apresentada na seção anterior e o caráter agroindustrial do Brasil, tem-se a biomassa como uma das opções de matéria-prima. O termo biomassa é utilizado para denominar o grupo de produtos energéticos e matérias-primas renováveis, originados a partir da matéria orgânica formada por via biológica (MARAFON *et al.*, 2016). A biomassa pode ser obtida a partir de diferentes fontes, sendo essas vegetais lenhosos, não-lenhosos, resíduos orgânicos e/ou biofluidos, conforme a Figura 2 abaixo mostra.

Figura 2 – Classificação da biomassa



Fonte: Adaptado de Cortez *et al* (2008)

A biomassa proveniente de resíduos vegetais vem principalmente do campo, da madeira e de seus resíduos. Os resíduos agrícolas são gerados na fase da colheita, constituídos basicamente de palha, folhas e caules e têm um poder calorífico médio de 15,7 MJ/kg de matéria seca (CORTEZ; LORA; OLIVARES GÓMEZ, 2008). Há também os resíduos agroindustriais gerados na fase do beneficiamento de produtos agrícolas e florestais, atualmente utilizados como ração animal ou até mesmo adubação do solo. Por fim, os resíduos sólidos urbanos são obtidos dos resíduos domiciliares e dos resíduos comerciais enquanto a biomassa proveniente de biofluidos pode ser obtida utilizando óleos vegetais, como mamona e soja (CORTEZ; LORA; OLIVARES GÓMEZ, 2008).

Por meio da biomassa é possível obter diversas formas de energia mediante diferentes processos de conversão e a definição deste processo está relacionada a diversos fatores. Parascanu *et al.* (2021) afirma que a composição da biomassa, seu grau de umidade e o tipo de produto final desejado possuem influência considerável na escolha da tecnologia de conversão. Deve-se levar em consideração também que a potencialidade de qualquer combustível depende de características termoquímicas relacionadas ao Poder Calorífico Inferior (PCI), como por exemplo (MARAFFON *et al.*, 2016):

- Composição elementar;
- Densidade;
- Granulometria;
- Teor de cinzas.

A biomassa pode ser utilizada diretamente para geração de calor ou de energia elétrica ou transformada em biocombustíveis sólidos tais como briquetes e péletes, líquidos como etanol e biodiesel, ou gasosos, a exemplo do biogás e gás de síntese (DIAS *et al.*, 2012). No entanto, a utilização da biomassa, assim como qualquer processo industrial, possui algumas barreiras para sua utilização. Dessa forma, busca-se transformar a biomassa para a forma líquida ou gasosa, pois ambas possuem maior densidade energética e mais facilidade no manuseio e transporte enquanto a biomassa sólida, por exemplo, possui certos empecilhos em suas características: volume, baixa densidade de energia e forma inconveniente (BASU, 2018).

A biomassa, ao ser utilizada como combustível, é comumente considerada como combustível neutro em carbono. Isso está relacionado à absorção e emissão de CO₂, pois a biomassa libera o CO₂ que absorveu da atmosfera no passado recente enquanto o combustível fóssil libera CO₂ absorvido há milhões de anos (BASU, 2018). No entanto, assim como o combustível fóssil, a biomassa possui emissões indiretas intrínsecas ao transporte, ao processamento e à preparação. A partir dessa informação, destaca-se a importância da realização de uma Avaliação de Ciclo de Vida buscando avaliar o desempenho ambiental de ações diretas e indiretas dentro da cadeia produtiva.

2.1.3 Palha e sabugo de milho

Entre as culturas mais produzidas do mundo está o milho, que consiste em uma biomassa amilácea nomeada em razão de seu principal constituinte químico, o amido (VAZ JÚNIOR, 2020). O milho é uma planta da família das gramíneas originada do México e cultivado em todos os continentes. Mundialmente, 1.168.390.000 toneladas de milho foram produzidas no ano de 2022, segundo o Relatório do *USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE* (2023), sofrendo uma queda expressiva de 4,15% na produção mundial em relação ao ano anterior.

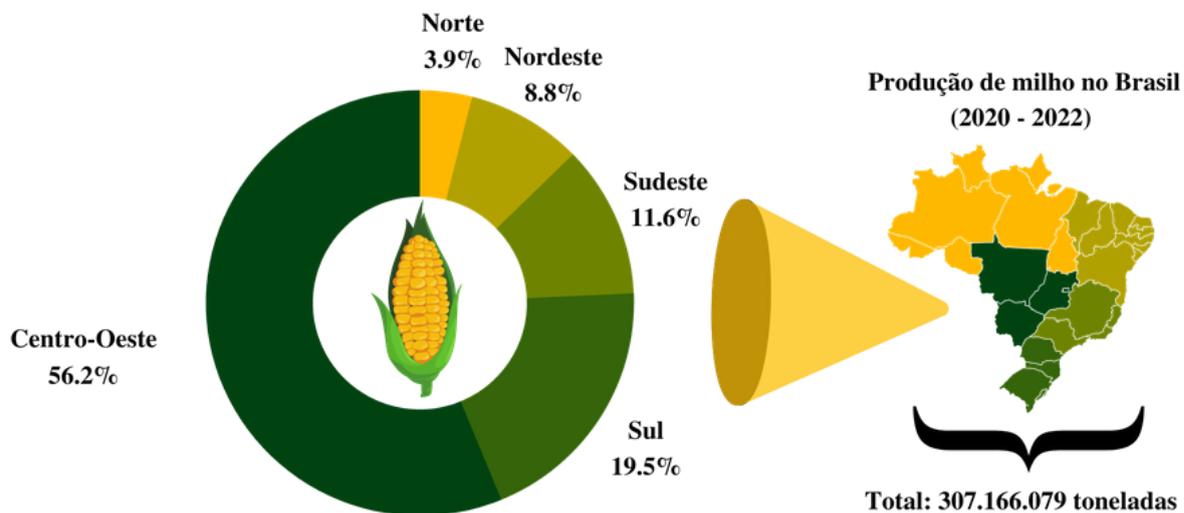
Tabela 3 – Os 5 maiores produtores mundiais de milho.

| País | Safra 2021/22 | Safra 2022/23 | Variação % | Participação mundial (2022) |
|----------------------------|---------------|---------------|------------|-----------------------------|
| Estados Unidos da América | 382.893.000 | 353.836.000 | -8,21% | 30,28% |
| República Popular da China | 272.552.000 | 274.000.000 | 0,53% | 23,45% |
| Brasil | 116.000.000 | 126.000.000 | 7,94% | 10,78% |
| Argentina | 51.500.000 | 55.000.000 | 6,36% | 4,71% |
| Índia | 33.600.000 | 32.000.000 | -5,00% | 2,74% |

Fonte: USDA (2022)

A Tabela 3 mostra que o Brasil é o 3º maior produtor mundial de milho, possuindo uma participação de 10,78%, tendo, à sua frente, somente os Estados Unidos da América e a China.

Figura 3 – Participação de cada Região na produção de milho no país de 2020 a 2022



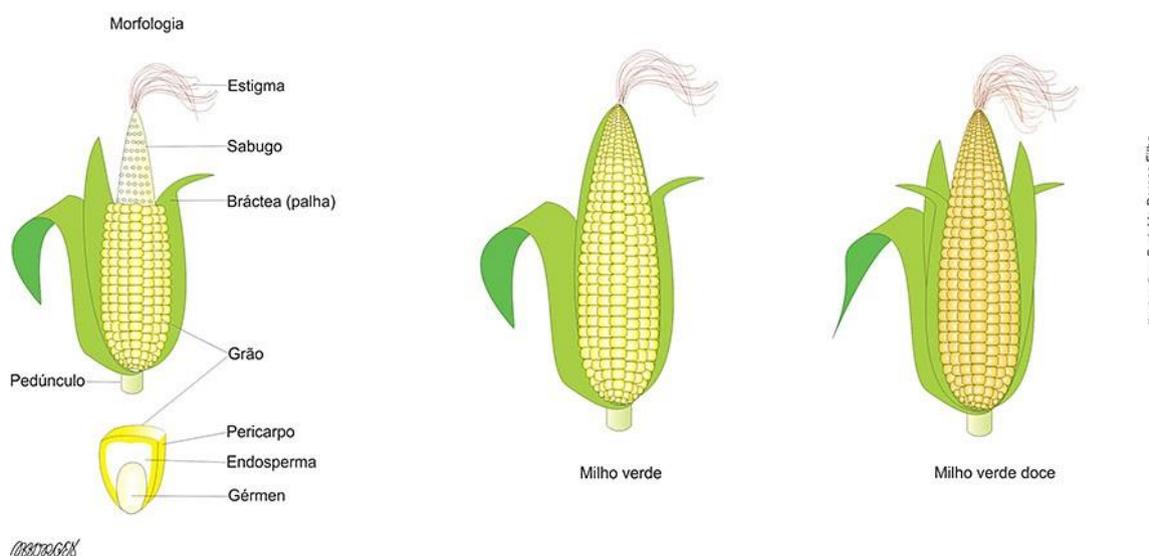
Fonte: IBGE - SIDRA - LSPA (2022)

Ao utilizar o Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) (IBGE, 2022) no segmento de Levantamento Sistemático de Produção Agrícola (LSPA), obtiveram-se os dados da produção de milho no Brasil por Região nos últimos 3 anos (2020 a 2022), mostrados na Figura 3. Com uma produção de 172.666.647 de toneladas e representando mais de 50% da produção do Brasil, o Centro-Oeste possui papel central na cultura de milho, seguido pela Região Sul, com participação de 19,51% e quase 60 milhões de toneladas, menos da metade produzida pela Região Centro-Oeste. As menores participações são das Regiões Norte e Nordeste, com pouco mais de 12 e 26 milhões de toneladas, respectivamente. Vale salientar que, dentro do Centro-Oeste, o estado do Mato Grosso ganha destaque como maior produtor de milho do Brasil, sendo responsável por 34% da produção de milho de 2020 a 2022 (IBGE, 2022).

A geração de resíduo do milho pode ser dividida em sabugo, folha, colmo (caule) e palha (cobertura da espiga). Paes, Teixeira e Martins (2008) afirmam que:

“A palha de milho é considerada um resíduo agrícola, geralmente incinerado ou utilizado como cama nos criadouros de aves nas propriedades rurais brasileiras, sendo um material abundante, porém pouco aproveitado de forma a gerar renda, exceto quando destinado à produção do artesanato ”

Figura 4 – Estrutura do milho



Fonte: Centro de Qualidade em Horticultura da Ceagesp (2020)

O sabugo e a palha do milho são resíduos que podem ser gerados no processamento industrial quando a finalidade é a produção de milho verde em conserva e, nesse caso, com melhores possibilidades de serem utilizados para a geração de energia. Seja em um caso seja em outro, a caracterização energética destes resíduos é indispensável para a análise do potencial na geração de energia (VALE; DANTAS; ZAMBRZYCKI, 2013). A Tabela 4 enuncia as diferentes proporções de geração de resíduos de acordo com a literatura disponível.

Tabela 4 – Coeficiente Técnico de resíduos provenientes da cultura do milho

| Biomassa | Proporção | Referência Bibliográfica |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------|
| | 0,2 t/t grãos colhidos | Dias <i>et al.</i> (2012) |
| Palha de milho | 0,06 t/t grãos colhidos | Silva <i>et al.</i> (2022) |
| | 0,2 t/t grãos colhidos | Rocha <i>et al.</i> (2017) |
| | 0,3 a 0,9 t/t grãos colhidos | Dias <i>et al.</i> (2012) |
| | 0,22 t/t grãos colhidos | Júnior <i>et al.</i> (2020) |
| Sabugo de milho | 0,14 t/t grãos colhidos | Silva <i>et al.</i> (2022) |
| | 0,18 t/t grãos colhidos | Rocha <i>et al.</i> (2017) |

Fonte: Autora (2023)

Há grandes diferenças nos rendimentos de resíduos da biomassa de milho, fato que se deve a condições edafoclimáticas (relativas ao solo e ao clima), à espécie da planta cultivada e também ao mecanismo de colheita (ASEFFE *et al.*, 2021). A partir dos dados de produção de milho no Brasil nos últimos 3 anos (Figura 3) e dos valores médios de geração de resíduos extraídos da Tabela 4 (palha como 0,15 e sabugo como 0,28 t/t grão colhido), pode-se afirmar que, só no Centro-Oeste, houve uma geração de 264.695.188 de toneladas de palha de milho e de 491.987.795 toneladas de sabugo, ambos com potencial energético a ser explorado. O aproveitamento desses resíduos pode contribuir para a descentralização da geração, reduzindo investimentos em linhas de transmissão e perdas de energia pela menor distância (MARAFON *et al.*, 2016).

2.1.4 Processos termoquímicos

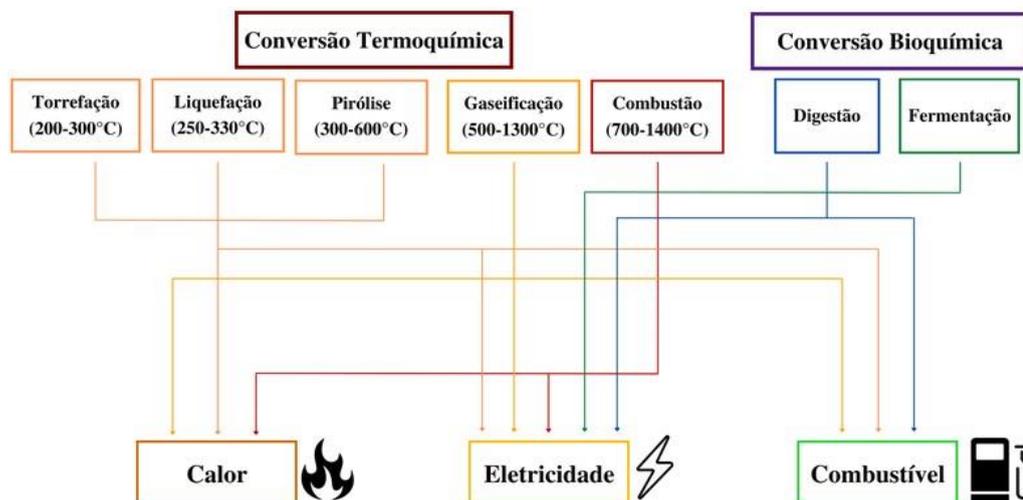
Conforme enunciado no tópico anterior, há um potencial enorme de

aproveitamento energético de biomassa residual, como os resíduos provenientes da cultura milho no Brasil, 3º maior produtor mundial. Aplicando diferentes tecnologias, pode-se transformar estes biocombustíveis em energia nas formas mecânica, térmica ou elétrica, as quais podem ser utilizadas de diversas maneiras para suprir as necessidades das atividades humanas (SAWIN *et al.*, 2012 apud DIAS *et al.*, 2012). Para isso, é necessário averiguar qual ou quais tecnologias de conversão são as melhores para geração de energia baseada nas características da biomassa. Segundo FRIEDRICH (2015), os principais fatores que determinam o processo de conversão são o tipo de biomassa, a forma desejada de energia, as normas ambientais e as condições econômicas.

Basu (2018) afirma haver 2 grandes classificações de rotas:

- A rota termoquímica visa converter toda a biomassa em gases, que são então sintetizados nos produtos químicos desejados ou usados diretamente;
- A rota bioquímica converte grandes moléculas de biomassa a partir de sua quebra em moléculas menores por bactérias ou enzimas.

Figura 5 – Rotas tecnológicas para produção de bioenergia



Fonte: Adaptado de BASU (2018)

A Figura 5 mostra as diferentes tecnologias de conversão e seus possíveis produtos. Observam-se também diferentes temperaturas em cada processo termoquímico. Esse é um dos parâmetros que varia, podendo também haver variação na duração, tempo de permanência e taxa de aquecimento (UBANDO *et al.*, 2019).

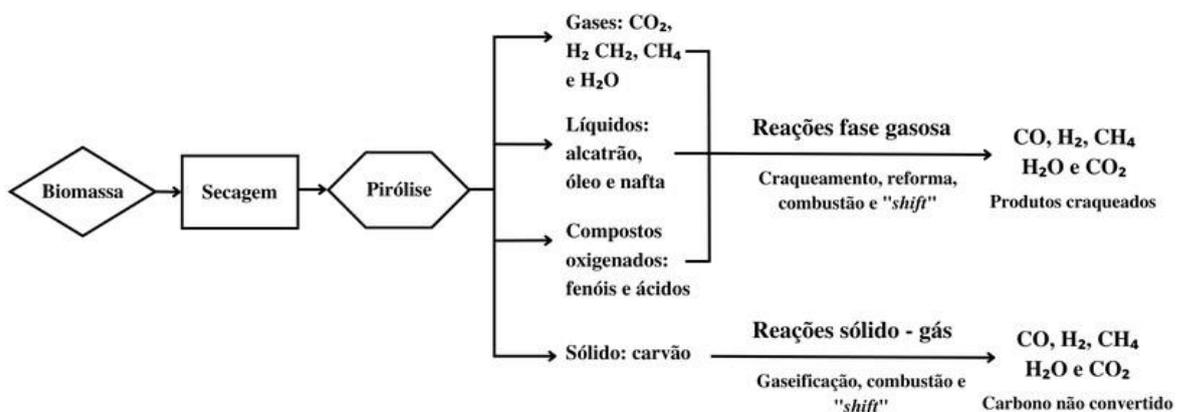
2.1.5 Gaseificação

Dentro dos processos de conversão termoquímica citados, tem-se a gaseificação. Segundo Basu (2018), a gaseificação consiste em um processo químico que converte materiais carbonáceos como biomassa em combustíveis gasosos convenientes e úteis ou em matéria-prima química. Molino *et al.* (2018) afirma que:

“A gaseificação é como uma extensão da pirólise, mas com o objetivo de otimizar o rendimento gasoso. Sua faixa de temperatura (400 a 1000 °C) e o tempo de residência (30 a 90 minutos) são usados para produzir a mistura gasosa, enquanto o biocarvão (ou *biochar*) ou o resíduo sólido (coprodutos), estão presentes após a conversão da biomassa.”

A gaseificação diferencia-se da combustão e da pirólise tanto pela quantidade de oxidante usado quanto pelos produtos de interesse gerados, pois a pirólise é efetuada sem oxidante e a combustão, com excesso desse produto (OLIVEIRA, 2013). O gás resultante da oxidação parcial na gaseificação é conhecido como gás de síntese (*syngas*), uma mistura de gases de hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO), com pequenas quantidades de dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O), metano (CH₄), hidrocarbonetos e gás nitrogênio (N₂) (FRIEDRICH, 2015). O gás de síntese é uma opção muito interessante para a utilização dos gases provenientes da gaseificação, pois possui potencial de aplicação para a produção de diversos compostos químicos, tais como o gás natural ou os biocombustíveis líquidos, a exemplo do diesel ou gasolina sintética, dos aldeídos e do metanol (OLIVEIRA, 2013).

Figura 6 – Sequências de etapas da gaseificação

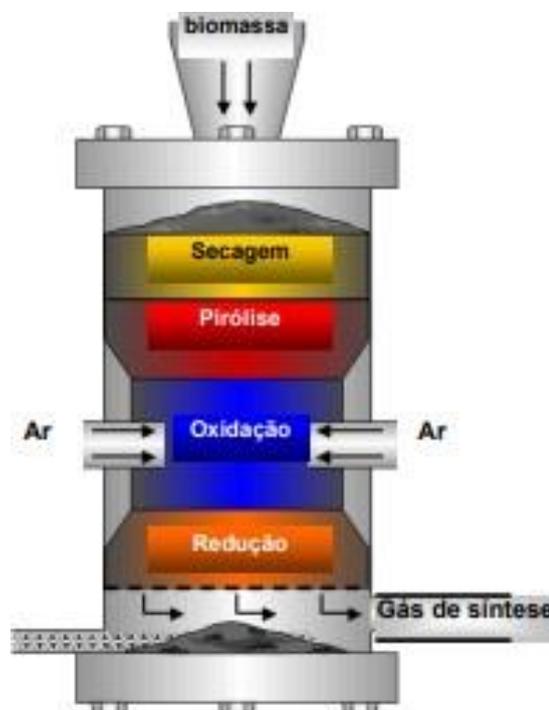


Fonte: BASU 2018

Segundo Renó (2011) e a Figura 6, as etapas da gaseificação são:

- Pirólise ou decomposição térmica, que se desenvolve a temperaturas próximas de 600°C;
- Oxidação de parte do carbono fixo do combustível, processo que constitui a fonte de energia térmica para o processo de volatilização e gaseificação;
- Gaseificação propriamente dita, que inclui reações heterogêneas entre os gases e o coque residual, assim como reações homogêneas entre os produtos já formados;
- Craqueamento do alcatrão – processo de destruição térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão com a obtenção de CO, CO₂, CH₄ e outros gases como produtos.
- Oxidação parcial dos produtos da pirólise.

Figura 7 – Esquema do gaseificador *Downdraft*



Fonte: OLOFSSON *et al.* (2005) *apud* RENÓ (2011)

A Figura 7 mostra um gaseificador, equipamento utilizado no processo de gaseificação. Existem vários tipos de gaseificadores, sendo estes categorizados em 4

tipos principais por Alauddin *et al.* (2010): leito fixo, leito móvel, leito fluidizado e fluxo arrastado, funcionando com diferenças de temperatura e pressão. O gaseificador mostrado na Figura 7 consiste em um gaseificador de leito fixo co-corrente (“*downdraft*”). Dependendo da direção do fluxo do ar e da biomassa, os gaseificadores de leito fixo são classificados em: contracorrente (“*updraft*”), co-corrente (“*downdraft*”) e fluxo cruzado (“*cross-flow*”) (RENÓ, 2011).

No gaseificador co-corrente (“*Downdraft*”) a alimentação de biomassa é feita pelo topo. O ar pode ser fornecido ao sistema pelo topo ou pela lateral, enquanto a extração do gás é feita pelo fundo. Os gases deixam o equipamento após passarem pelas zonas quentes, onde o alcatrão contido nos gases é submetido ao craqueamento (RENÓ, 2011).

Tendo em vista que a gaseificação objetiva a geração de combustíveis gasosos, as motivações para tal, no ponto de vista energético, são descritas por Basu (2018) como:

- Aumentar o poder calorífico do combustível rejeitando componentes não combustíveis como nitrogênio e água;
- Remover o enxofre do gás combustível de modo que não seja liberado na atmosfera quando o gás é queimado;
- Aumentar a proporção de massa de hidrogênio para carbono (H/C) no combustível;
- Reduzir o teor de oxigênio do combustível.

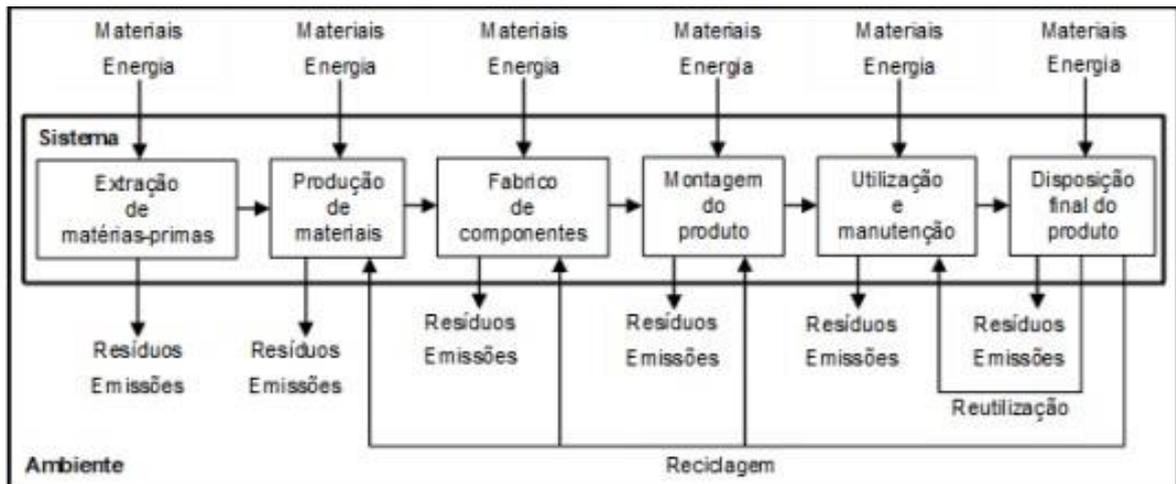
Além disso, o rendimento e a composição do gás de síntese e o desempenho da gaseificação dependem de condições operacionais, que incluem taxa de aquecimento, pressão, temperatura, agente de gaseificação e tecnologia (MOLINO *et al.*, 2018 apud UBANDO *et al.*, 2019).

2.1.6 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação de Ciclo de Vida (ou *Life Cycle Assessment* na nomenclatura inglesa) é uma metodologia que permite realizar a avaliação dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais associados a um sistema ou produto, podendo compreender as etapas que vão desde a retirada das matérias-primas da natureza

que entram no sistema produtivo (o berço ou *cradle*), até a disposição do produto final (o túmulo ou *grave*) (OLIVEIRA, 2013). É uma ferramenta que identifica e quantifica a energia e materiais utilizados nos *inputs* e *outputs* de um sistema, juntamente com os resíduos e emissões liberados para o ambiente, e que permite estimar o impacto energético e ambiental causado (COSTA, 2019).

Figura 8 – Ciclo de Vida de um produto



Fonte: COSTA (2019)

A ferramenta ACV surge a partir das Normas ISO 14000 (*International Organization for Standardization*), padronizados pelas normas ISO 14040 e ISO 14044 e se constitui como instrumento que permite o desenvolvimento de critérios e procedimentos com objetivo de avaliar o impacto ambiental de produtos e processos (OLIVEIRA, 2013). Com a ACV é possível apontar com clareza a origem das maiores contribuições da degradação ambiental, pois esta considera os impactos ambientais de um produto ou processo em todo seu ciclo de vida (SILVEIRA, 2015). As Normas estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Normas que regem a ACV

| ABNT/CB-38 - Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental | Descrição | Validade a partir de |
|---|--|-----------------------------|
| ABNT NBR ISO 14040:2009 | descreve os princípios e a estrutura para se conduzir e relatar estudos de ACV e inclui certos requisitos mínimos. | 21/06/2009 |
| ABNT NBR ISO 14044:2009 | especifica requisitos e provê orientações para a avaliação do ciclo de vida (ACV) | 21/06/2009 |

Fonte: ABNT (2009)

A NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) (Tabela 5) estabelece que a Avaliação do Ciclo de Vida deve incluir definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados. Essa estrutura (Figura 9) possui fases interdependentes e intercomunicantes, havendo resultados de uma fase complementando a forma como as outras fases são implementadas e vice-versa (COSTA, 2019).

Figura 9 – Estrutura metodológica de ACV



Fonte: ABNT (2009)

A Avaliação do Ciclo de Vida e sua estrutura metodológica (Figura 9) são interessantes pois, segundo a ABNT (2009), a ACV pode ajudar:

- Na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos em vários pontos de seu ciclo de vida;
- Na tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não governamentais (por exemplo, planejamento estratégico, definição de prioridades, projeto ou reprojeto de produtos ou processos);
- Na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição;
- No marketing (por exemplo, uma declaração ambiental, um programa de rotulagem ecológica ou uma declaração ambiental de produto).

Silveira (2015) afirma que:

“É importante salientar que a ACV não deve ser considerada apenas como a única ferramenta na tomada de decisão ambiental em uma indústria, governo ou instituição, ela pode ser utilizada integrada a inúmeras outras ferramentas de gestão ambiental ou também subsidiá-las como design sustentável, rotulagem ambiental, análise do consumo de energia e materiais, bem como análise de custo-benefício.”

2.1.6.1 Definição de objetivo e escopo

A ABNT (2009) descreve os princípios e a estrutura para se conduzir e relatar estudos de ACV. Dentre eles, é necessário que na fase de definição dos objetivos sejam enunciados os seguintes tópicos:

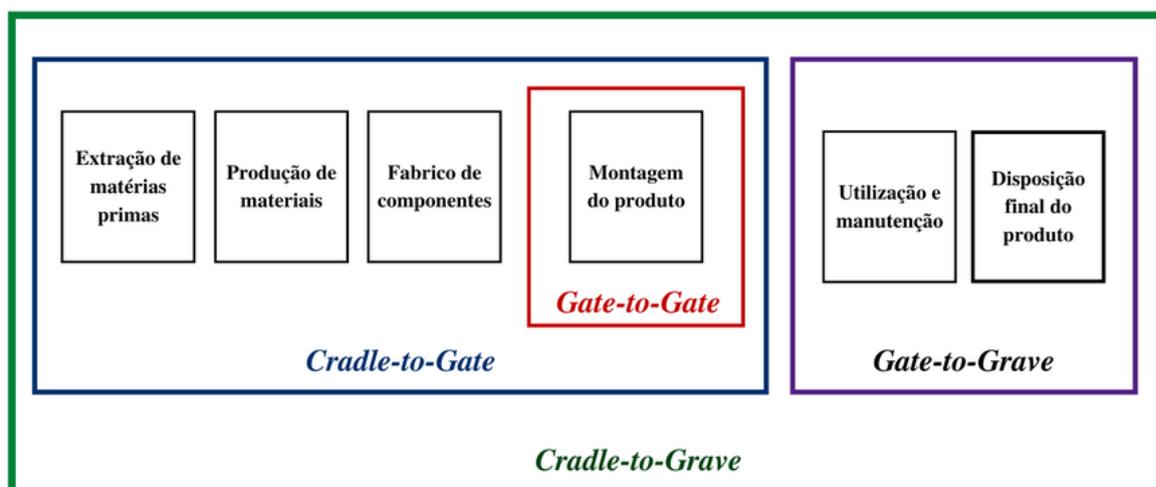
- Aplicação pretendida: a utilização que se pretende dar aos resultados do estudo;
- As razões para a execução do estudo;
- Público-Alvo: a que tipo de audiência se destina;
- Se há a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

Com relação à definição do escopo de uma ACV, deve-se considerar e claramente descrever as seguintes etapas:

- Sistema de produto ou processo a ser estudado (I);
- Função do sistema de produto (II);
- Unidade funcional (III):
- Fronteiras ou limites do sistema (IV):
- Procedimento de Alocação (V);
- Tipos de Impacto e Metodologia de Avaliação de Impactos e Interpretação Subsequente (VI).

Sistemas de produto (I) são compostos de processos elementares (menor elemento considerado), desempenhando uma ou mais funções definidas (II) e que modelam o ciclo de vida de um produto. A unidade funcional (III) é uma medida da função do sistema em estudo e tem como propósito fornecer uma unidade de referência que permita relacionar as entradas e saídas dos processos. Essa referência é necessária para assegurar a comparabilidade dos resultados do ACV, particularmente quando vários sistemas são avaliados, de modo a garantir que as comparações são feitas sob uma base comum (COSTA, 2019).

Figura 10 – Limites de Fronteira ACV



Fonte: ABNT (2009)

As fronteiras ou limites do Sistema (IV) definem os processos elementares a serem incluídos no sistema. A Norma ISO enuncia as classificações mais comuns para os limites de fronteira, estão representadas na Figura 10 e são definidas como:

- *Cradle-to-Grave*, caso se pretenda analisar o ciclo de vida completo;
- *Gate-to-Gate*, caso se considere apenas um processo;
- *Cradle-to-Gate*, caso se analise desde a extração de matérias-primas até ao final do processo de fabricação ou montagem;
- *Gate-to-Grave*, caso apenas se considerem as fases de utilização e fim de vida.

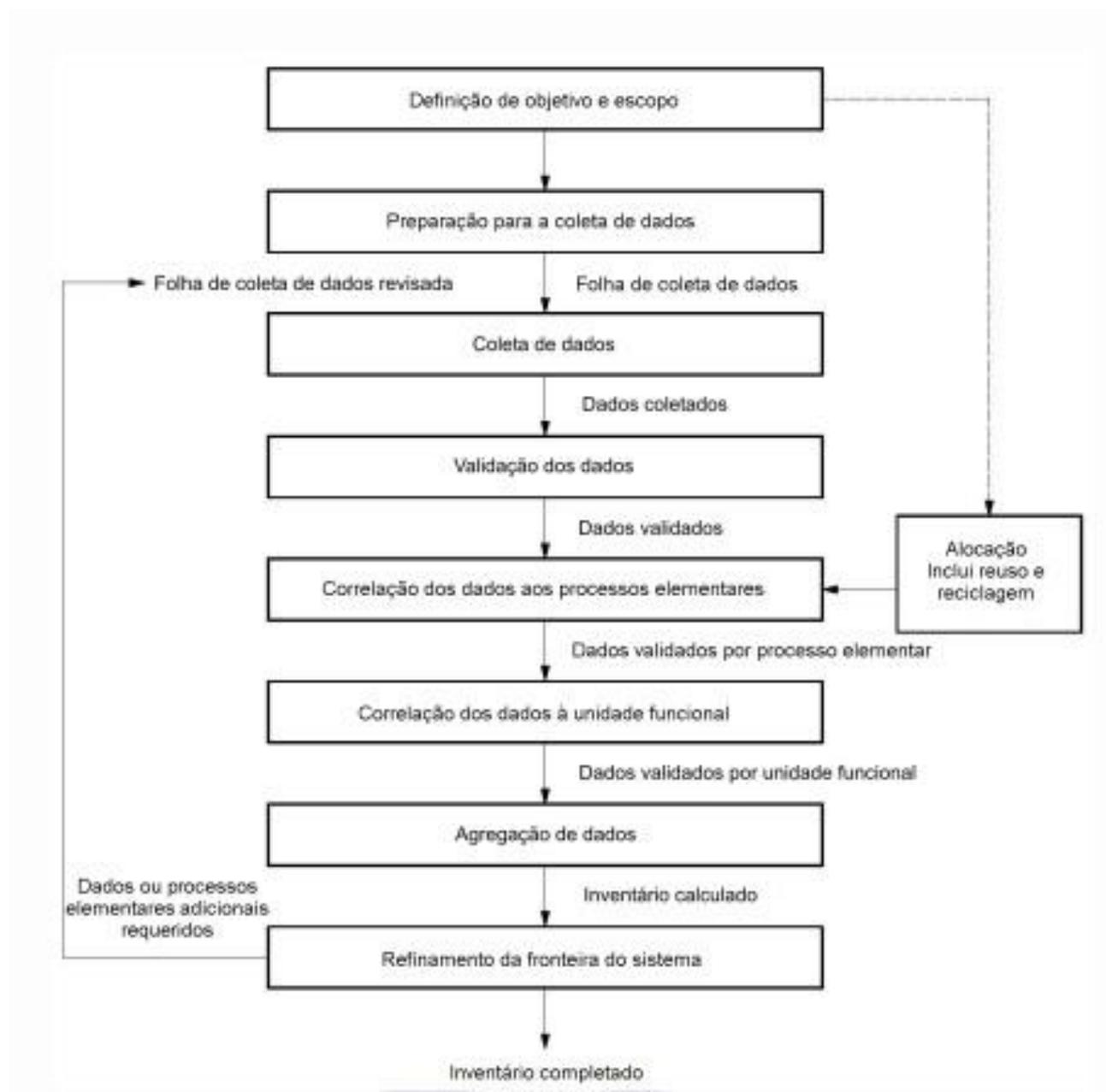
A Norma ISO 14040 afirma que os critérios utilizados no estabelecimento da fronteira do sistema são importantes para o grau de confiança nos resultados de um estudo e para a possibilidade de se atingir seu objetivo. As atividades que ocorrem fora dos “portões” (aquisição de matéria-prima, transporte, destinação final dos resíduos e etc.) são geralmente negligenciadas por ocorrerem além dos limites físicos da indústria e, muitas vezes, representam as principais fontes de impactos ambientais (SILVEIRA, 2015).

O procedimento de alocação (V) trata de uma organização dos sistemas pois dificilmente haverá processos com entradas e saídas únicas, sendo frequentes sistemas que envolvem múltiplos produtos e sistemas de reciclagem. Para isso, é necessário realizar a divisão de processos elementares, adicionando subprocessos ou possivelmente expandir o sistema de produto (ABNT, 2009).

2.1.6.2 Análise de Inventário

A análise de inventário é um processo iterativo que envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo que permitam quantificar as entradas e saídas relevantes dos vários processos de um sistema (COSTA, 2019). Essas entradas e saídas podem incluir o uso de recursos e liberações no ar, na água e no solo associados com o sistema. Podem ser feitas interpretações desses dados, dependendo dos objetivos e do escopo da ACV (ABNT, 2009).

Figura 11 – Etapas do Inventário de Ciclo de Vida



Fonte: ABNT (2009)

A Figura 11 possui uma comunicação de etapas definidas na Seção de Definição de Objetivo e Escopo (2.1.6.1) e etapas de concretização do inventário como:

- Coleta de dados;
- Validação dos dados;
- Correlação dos dados a processos elementares ou unidade funcional;

- Agregação de dados.

2.1.6.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é a terceira fase da ACV e tem como finalidade avaliar a relevância dos possíveis impactos ambientais a partir da informação recolhida e processada na análise de inventário. Este processo envolve a associação de dados de inventário com impactos ambientais específicos e a tentativa de compreender estes impactos (ABNT, 2009). Mendes (2013) afirma que a fase AICV provê informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento da significância ambiental desses resultados.

Tabela 6 – Métodos de AICV e a sua origem

| Método | Desenvolvido por | País de origem |
|--------------------------|------------------------------------|----------------|
| <i>CML2002</i> | <i>CML</i> | Holanda |
| <i>Eco-indicator 99</i> | <i>Pré</i> | Holanda |
| <i>EDIP97 - EDIP2003</i> | <i>DTU</i> | Dinamarca |
| <i>EPS 2000</i> | <i>IVL</i> | Suécia |
| <i>Impact 2002+</i> | <i>EPFL</i> | Suíça |
| <i>LIME</i> | <i>AIST</i> | Japão |
| <i>LUCAS</i> | <i>CIRAIG</i> | Canadá |
| <i>ReCipe</i> | <i>Execução + PRé + CML + RIVM</i> | Holanda |
| <i>Swiss Ecotoxicity</i> | <i>E2 + ESU-services</i> | Suíça |
| <i>TRACI</i> | <i>US EPA</i> | EUA |
| <i>MEEuP</i> | <i>VhK</i> | Holanda |

Fonte: JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION - EC JCR (2010)

Para realizar a AICV é necessário estabelecer um método para avaliar as categorias de impacto (Tabela 7). Alguns métodos foram enunciados na Tabela 6 e é possível observar que a maioria dos métodos são desenvolvidos na Europa.

Tabela 7 – Categorias de Impactos Ambientais

| Categoria de Impacto | Escala | Classificação | Fator de Caracterização | Descrição do Fator de Caracterização |
|-----------------------------------|---------------|--|--|--|
| Aquecimento Global | Global | Dióxido de Carbono (CO ₂) | Potencial de Aquecimento Global (GWP) | Converte para dados de ICV em equivalente dióxido de carbono (kg CO ₂ eq) |
| | | Dióxido de Nitrogênio (NO ₂) | | |
| | | Metano (CH ₄) | | |
| | | Clorofluorcarbonos (CFC _s) | | |
| | | Hidroclorofluorcarbonos (HCFC _s) | | |
| Depleção de Ozônio Estratosférico | Global | Brometo de Metil (CH ₃ Br) | Potencial de Depleção de Ozônio Estratosférico | Converte dados de ICV em equivalentes tricolorfluormetano (kg CFC - 11 eq) |
| | | Clorofluorcarbonos (CFC _s) | | |
| | | Hidroclorofluorcarbonos (HCFC _s) | | |
| | | Halons | | |
| Acidificação | Regional | Óxidos de Enxofre (SO _x) | Potencial de Acidificação | Converte dados de ICV em equivalente íons de hidrogênio (H ⁺) |
| | | Óxidos de Nitrogênio (NO _x) | | |
| | Local | Ácido Hidroclorídrico (HCl) | | |
| | | Ácido Hidrofluorídrico (HF) | | |
| | | Amônia (NH ₄) | | |
| Eutrofização | Local | Fosfato (PO ₄) | Potencial de Eutrofização | Converte dados de ICV em equivalentes fosfatos (PO ₄) |
| | | Óxido de Nitrogênio (NO _x) | | |
| Oxidação Fotoquímica | Local | Nitratos de Amônia | Potencial de Criação de Oxidante Químico | Converte dados de ICV em equivalentes etano (C ₂ H ₆) |
| | | Hidrocarbonetos não metano | | |
| Toxicidade | Local | Químicos tóxicos com um | LC ₅₀ | Converte dados |

| | | | | |
|----------------------|----------|--|-----------------------------------|---|
| Terrestre | | registro de concentração letal para roedores | | LC ₅₀ em equivalentes |
| Toxicidade Aquática | Local | Químicos tóxicos com um registro de concentração letal para peixes | LC ₅₀ | Converte dados LC ₅₀ em equivalentes |
| Depleção de Recursos | Local | Quantidade de minerais usados | Potencial de Depleção de Recursos | Converte dados de ICV em razão da quantidade de recurso versus quantidade de recursos deixados em reserva |
| | Regional | Quantidade de combustíveis fósseis usados | | |
| | Global | Quantidade de combustíveis fósseis usados | | |
| Uso do Solo | Local | Quantidade depositada num aterro | Resíduo Sólido | Converte massa de resíduo sólido em volume usando uma densidade estimada |
| | Regional | | | |
| | Global | | | |
| Saúde Humana | Local | Total liberado para o ar, água e solo | LC ₅₀ | Converte dados LC ₅₀ em equivalentes |
| | Regional | | | |
| | Global | | | |

Fonte: USA Environmental Protection Agency (2006).

A Tabela 7 traz exemplos de categorias de problemas ambientais normalmente utilizadas, suas respectivas escalas, classificações, fatores de caracterização e a descrição desses fatores que são comumente utilizados para indicar resultados dos impactos ambientais. Segundo Renó (2011) :

“A seleção e a definição das categorias ambientais devem levar em consideração as preocupações ambientais identificadas no objetivo e no escopo do estudo. Os requisitos e critérios para a seleção e definição das categorias são:

As categorias devem ser definidas com base no conhecimento científico, de forma clara e transparente,

As categorias devem explicitar o(s) foco(s) do(s) problema(s) ambiental(is) em estudo representando tanto as preocupações do estudo quanto efeitos cientificamente observáveis sobre os recursos, ambiente natural ou saúde humana.

As categorias devem permitir a clara identificação dos dados apropriados a serem coletados do inventário e que levam em consideração o foco de preocupação ambiental.”

2.1.6.4 Ferramentas de apoio ao ACV e Base de Dados

Para realizar um ACV é possível utilizar ferramentas de apoio como softwares especializados que podem apresentar análise de impactos e interpretação dos resultados através de gráficos, fluxogramas e Tabelas.

Tabela 8 – Softwares de simulação de ACV

| Opções de softwares de simulação para Avaliação de Ciclo de Vida | País |
|--|----------|
| <i>SimaPro</i> | Holanda |
| <i>openLCA</i> | Alemanha |
| <i>GaBi</i> | Alemanha |
| <i>Umberto LCA+</i> | Alemanha |

Fonte: Autora (2023)

A Tabela 8 apresenta os softwares mais utilizados para a Avaliação de Ciclo de Vida, todos desenvolvidos em países europeus. Em destaque, a Alemanha, que desenvolveu três dos softwares mais utilizados. Atualmente, o SimaPro é o software ACV líder mundial escolhido pela indústria, institutos de pesquisa e consultores em mais de 80 países e o *openLCA* é o único software ACV gratuito e de código aberto que pode ser usado para avaliações ecológicas, sociais e econômicas profissionais do ciclo de vida.

Tabela 9 – Opções de Bases de Dados

| Nome | País |
|---|----------------|
| <i>Chinese Life Cycle Database (CLCD)</i> | China |
| <i>Ecoivent</i> | Suíça |
| European Reference Life-Cycle Database (ELCD) | União Europeia |
| GaBi database | Alemanha |
| <i>Inventory Database for Environmental Analysis (IDEA)</i> | Japão |
| Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil) | Brasil |
| <i>U.S. Life Cycle Inventory Database (USLCI)</i> | Estados Unidos |

Fonte: Autora (2023)

A partir da Tabela de opções de bases de dados (Tabela 9), observa-se a presença de bases de dados específicas para países, como China, Estados Unidos e Brasil. O SICV Brasil é um banco de dados criado para abrigar Inventários do Ciclo de Vida (ICVs) de produtos nacionais. Há outras bases de dados mais completas como ecoinvent e *GaBi Database*.

2.1.7 Otimização do Processo da Gaseificação

Para a otimização de processos, um bom desempenho operacional e redução de custos, tempo e matéria-prima, necessita-se de um bom planejamento de experimentos, utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta, uma técnica sequencial eficiente para o desenvolvimento de processos (MONTGOMERY; EXECUÇÃOGER, 2021). A Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) é uma das ferramentas de otimização eficazes que se destina a otimizar as funções objetivas de um processo/experiência de computação (MONDAL, 2022).

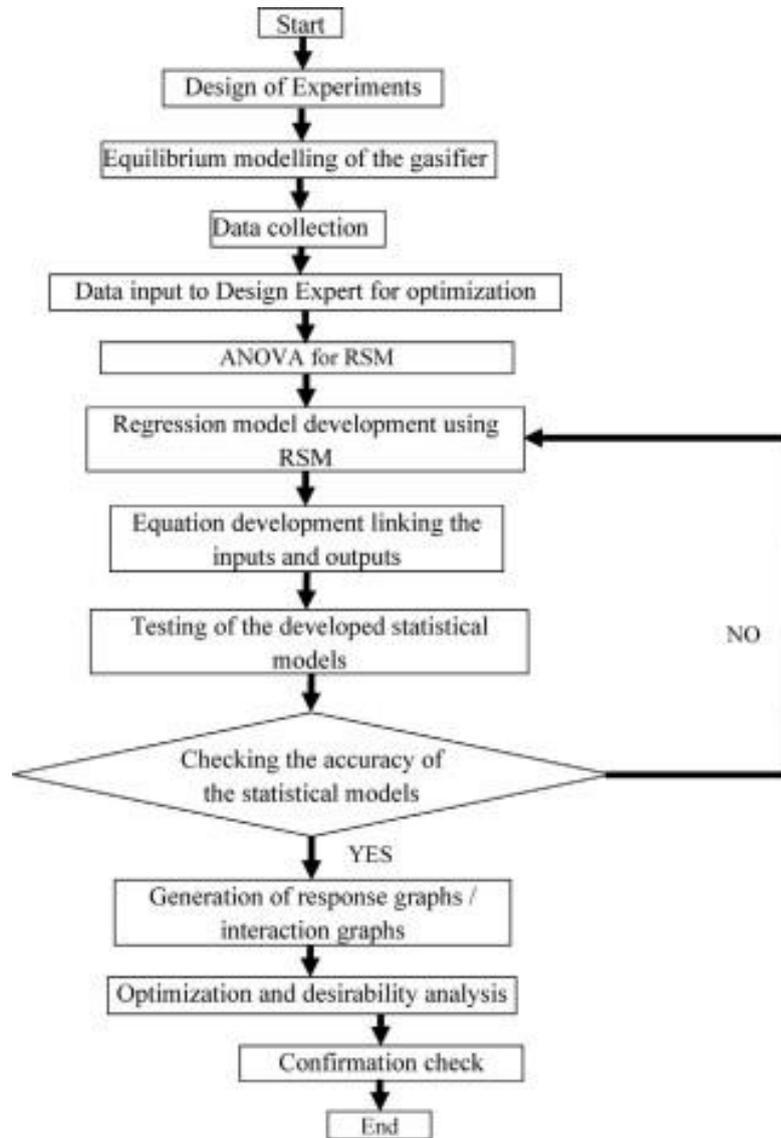
2.1.7.1 Planejamento de experimento

De acordo com Montgomery e Execuçãoger (2021), o planejamento experimental (DoE, do inglês *Design of Experiments*) é um teste, ou série de testes,

em que são feitas mudanças propositais nas variáveis de entrada de um processo, com finalidade de observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída. O planejamento do experimento é dado por 7 etapas:

1. Reconhecimento e relato do problema;
2. Escolha dos fatores e dos níveis;
3. Seleção da variável resposta;
4. Escolha do planejamento experimental;
5. Realização dos dados;
6. Análise dos dados;
7. Conclusões e recomendações.

Figura 12 – Planejamento do Experimento



Fonte: MONDAL (2022).

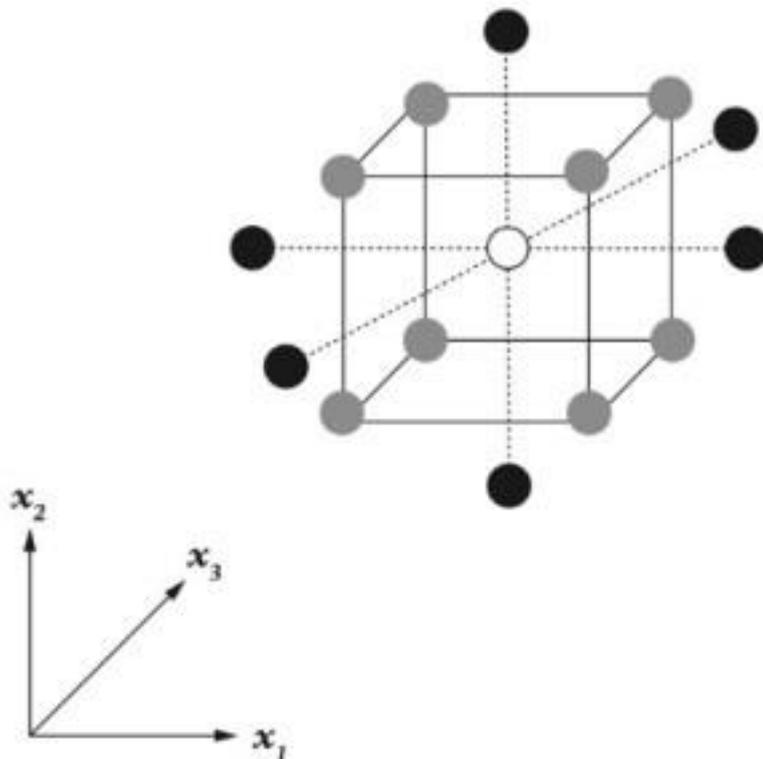
O diagrama de fluxo geral do planejamento do experimento incluindo as 7 etapas mencionadas anteriormente é mostrado na Figura 12. Essas etapas serão abordadas mais detalhadamente na Seção 3.

2.1.7.2 Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) (do inglês *Response Surface Methodology*) é uma técnica de otimização baseada em planejamentos fatoriais desenvolvida por Box e Wilson em 1951. Consiste em uma tática bem reconhecida utilizada na otimização da exploração de processos em aplicações de engenharia que

estima o provável efeito de variáveis fatoriais sobre o rendimento do produto para auxiliar nas características estatísticas e matemáticas (CHEN *et al.*, 2020). Dentro dos projetos de MSR, existe um arranjo específico conhecido como o arranjo composto central ou de face centrada (CCD - *Central Composite Design*). Segundo Veza *et al.* (2023), para o arranjo CCD, os extremos de um planejamento fatorial são ± 1 , enquanto aqueles em um projeto de “estrela” são $\pm\alpha$ em que $|\alpha| > 1$. O valor do parâmetro α é estabelecido com base nas possibilidades de cálculo e na precisão necessária da estimativa de resposta de superfície. O caso de três fatores é mostrado na Figura 13, no qual as bolas cinzas são a parte cúbica dos ensaios de um fatorial 2^3 , as bolas pretas representam a parte em estrela e a brancas o ponto central.

Figura 13 – Planejamento composto central para três fatores



Fonte: MONTGOMERY; EXECUÇÃO GER (2021).

Ao comparar os resultados da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) com dados reais, é fundamental avaliar a precisão, exatidão e confiabilidade usando uma variedade de indicadores. A Análise de Variância (ANOVA) de um arranjo CCD

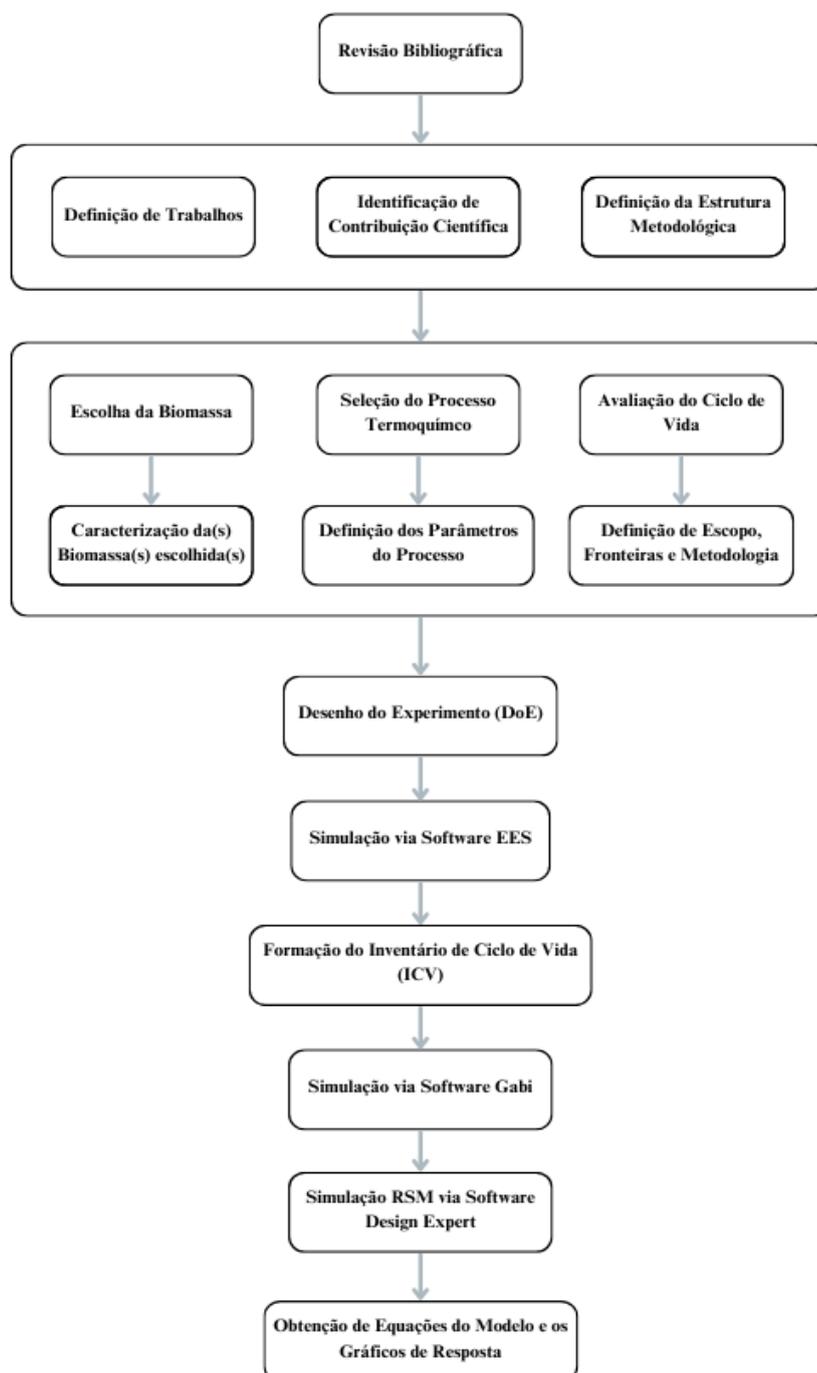
consiste em muitos parâmetros indicativos para determinar a aceitabilidade/viabilidade dos resultados. Segundo Mondal (2022), são eles:

- Valor F é a fração entre a variância transversal e a variância dentro do conjunto de dados. O maior valor F é preferido, pois significa mais aceitabilidade dos resultados;
- Valor p (valor probabilístico) indica a possibilidade de resultados em relação à precisão. Em contraste com o valor F, o valor p mais baixo ($p = 0,05$) é preferido;
- Coeficiente de Regressão (R^2) e Coeficiente de Regressão Ajustado (R^2 adj): R^2 representa a proporção da variância no dependente variável que o modelo MSR explica, com valores que variam de 0 a 1. Maiores valores de R^2 indicam um melhor ajuste do modelo. R^2 adj leva em consideração o tamanho da amostra e a quantidade de variáveis no modelo MSR.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia usada nesse trabalho para atingir os objetivos gerais e específicos citados nas Seções 1.1.1 e 1.1.2 é representada na Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma de Trabalho TCC 2



Fonte: Autora (2023)

3.1 ESCOLHA DA BIOMASSA

As biomassas utilizadas para a simulação são biomassas residuais agrícola (palha de milho) e agroindustrial (sabugo de milho). A escolha dessas biomassas foi baseada em sua produção expressiva no Brasil, tendo em vista o potencial da produção citado na Seção 2.1.3 e as proporções de resíduos citadas na Seção 4. Além de analisar as biomassas e suas características individualmente, foi estudada também uma biomassa conjunta, um *blend* da palha e do sabugo de milho, baseando-se em valores médios retirados da literatura, conforme a Tabela 11.

Tabela 11 – Caracterização das biomassas de milho

| Biomassa | Análise Elementar (%) | | | | Análise Imediata (%) | | | Referência |
|-----------------|-----------------------|-------|-------|------|----------------------|--------|--------|--|
| | C | H | O | N | CZ | MV | CF | |
| Palha de milho | 48,8 | 6,41 | 44,1 | 0,65 | 4,96 | 68,86 | 17,54 | Soka e Oyekola (2020) |
| Sabugo de milho | 42,75 | 5,64 | 50,34 | 1,21 | 1,6 | 83,11 | 15,27 | Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (2019) |
| <i>Blend</i> | 45,775 | 6,025 | 47,22 | 0,93 | 3,28 | 75,985 | 16,405 | Soka e Oyekola (2020) e Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (2019) |

Fonte: Autora (2023)

A partir dos dados da Tabela 11 e da massa molar dos elementos carbono (C = 12,01 g/mol), hidrogênio (H = 1,007 g/mol) e oxigênio (O = 16,6 g/mol), foi possível definir as fórmulas dos combustíveis (Tabela 13) das biomassas estudadas, considerando 100 g de biomassa e utilizando as razões H/C e O/C, conforme valores enunciados na Tabela 12 e equações abaixo.

$$C_{mol} = \text{MassaMolar}(C) \times \text{Massa}(C) \quad (1)$$

$$H_{mol} = \text{MassaMolar}(H) \times \text{Massa}(H) \quad (2)$$

$$O_{mol} = \text{MassaMolar}(O) \times \text{Massa}(O) \quad (3)$$

Tabela 12 – Razão Molar

| Razão Molar e Proporção | Palha de milho | Sabugo de milho | Blend |
|-------------------------|----------------|-----------------|--------|
| C_{mol} | 4,0633 | 3,5595 | 3,8114 |
| H_{mol} | 6,3654 | 5,6008 | 5,9831 |
| O_{mol} | 2,6566 | 3,0325 | 2,8445 |
| H/C | 1,5665 | 1,5734 | 1,5697 |
| O/C | 0,6538 | 0,8519 | 0,7463 |

Fonte: Autora (2023)

A Tabela 12 traz as razões entre carbono e oxigênio e carbono e hidrogênio. Segundo McKendry (2002), a maior proporção de oxigênio e hidrogênio, em comparação com o carbono, reduz o valor energético de um combustível, devido à menor energia contida nas ligações carbono-oxigênio e carbono-hidrogênio, do que nas ligações carbono-carbono.

Tabela 13 – Fórmula química do combustível

| Biomassa | Fórmula Combustível |
|-----------------|----------------------|
| Palha de milho | $C_{1,566}H_{0,653}$ |
| Sabugo de milho | $C_{1,573}H_{0,851}$ |
| Blend | $C_{1,569}H_{0,746}$ |

Fonte: Autora (2023)

A Tabela 13 traz as fórmulas químicas de cada combustível a ser estudado, a partir dos dados da Tabela 11, 12 e Equações 1, 2 e 3.

3.2 DESENHO DO EXPERIMENTO (DOE)

Para a otimização do combustível gasoso proveniente da gaseificação, foi realizado o Desenho do Experimento (Design of Experiment – DoE) baseando-se na Metodologia de Superfície de Resposta e o arranjo Arranjo Central Composto (RSM-CCD) com $\alpha = 1$. Nele, foram estabelecidas 2 variáveis independentes e 6 variáveis de resposta, conforme Tabela 14.

Tabela 14 – Desenho do Experimento

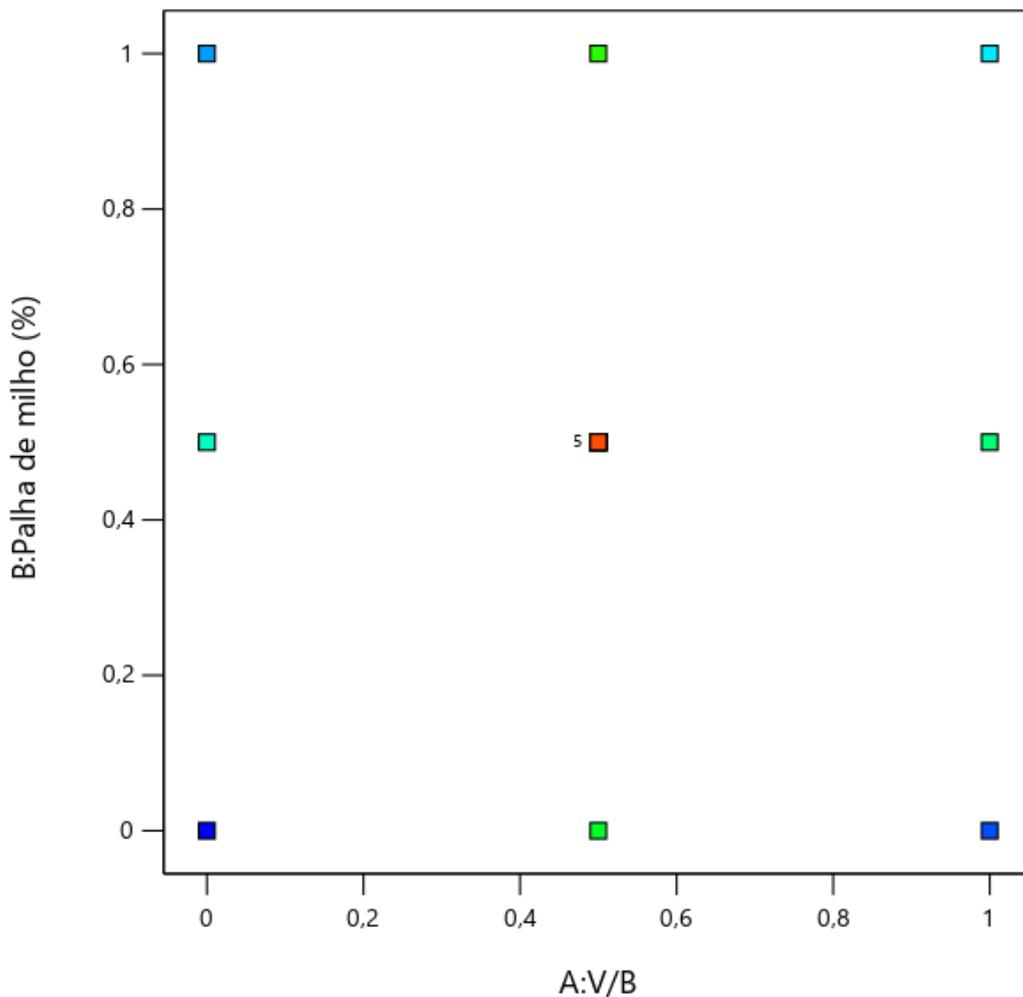
| Variáveis independentes | | V/B | % Palha de milho | | | |
|-------------------------|-----|------------------|------------------|------------------------|-----------------------|--|
| | | (A) | (B) | | | |
| α | -1 | 0 | 0% | | | |
| | 0 | 37,5 | 50% | | | |
| | +1 | 75 | 100% | | | |
| Modelos de Respostas | | | | | | |
| R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | |
| PCI | EGF | H ₂ % | CO% | GWP | AP | |
| kJ/Nm ³ | % | % | % | kg CO ₂ -eq | kg SO ₂ eq | |

Fonte: *Design Expert* (2023)

A Tabela 14 mostra que primeira variável (A) é o agente gaseificador (vapor) e sua proporção no sistema, denominada proporção vapor para biomassa (V/B) ou *Steam to Biomass Ratio*. Foram definidos três valores para essa proporção: V/B = 0; V/B = 0,5; V/B = 1. Dessa forma os fluxos de vapor variam de 0 (zero) a 75 kg/h. A segunda variável (B) corresponde ao tipo de biomassa: 100% palha de milho; *blend* 50% palha e 50% sabugo de milho e 100% sabugo de milho. As fórmulas combustíveis a serem utilizadas estão descritas na Tabela 13. Com relação às variáveis de respostas ou modelos de respostas, este trabalho utiliza seis variáveis de resposta (PCI, EGF, Energia Térmica, H₂% , CO₂%, GWP e AP) para avaliar a influência das variáveis independentes (A e B). O software *Design Expert* 13 é especificamente dedicado à realização de projetos de experimentos e, ao inserir esses dados é

possível otimizar numericamente o processo de gaseificação focando na produção de hidrogênio ou gás de alto poder calorífico a ser queimado enquanto reduz as emissões de CO₂. Por fim, os dados acerca do ponto otimizado de proporção de biomassa e V/B são introduzidos novamente no software *EES* e *Gabi* para corroborar resultados do ponto otimizado.

Figura 15 – Pontos Centrais e Axiais no CCD



Fonte: Design Expert 13 (2023)

A Figura 15 mostra o design de experimento com um conjunto de pontos centrais (*center points*) e, adicionalmente, apresenta um grupo de níveis extras denominados de Pontos Axiais. Esse design caracteriza o Arranjo Composto Central CCD com $\alpha=1$. A Tabela 14 apresenta uma matriz de design gerada juntamente ao design do CCD. Foram realizadas 13 execuções (ou *Runs* na nomenclatura inglesa), porém cinco delas possuem valores iguais (execuções 1, 4, 6, 12 e 13) resultando em 9 execuções

de valores de variáveis e respostas diferentes.

Figura 16 – Modelos Polinomiais no Design Expert

Fit Summary

Response 1: LHV

| | Source | Sequential p-value | Lack of Fit p-value | Adjusted R ² | Predicted R ² | |
|--|------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|------------------|
| | Linear | < 0.0001 | | 0,9513 | 0,9248 | |
| | 2FI | 0,9968 | | 0,9416 | 0,8669 | |
| | Quadratic | < 0.0001 | | 0,9999 | 0,9995 | Suggested |
| | Cubic | 0,0593 | | 1,0000 | 1,0000 | Aliased |

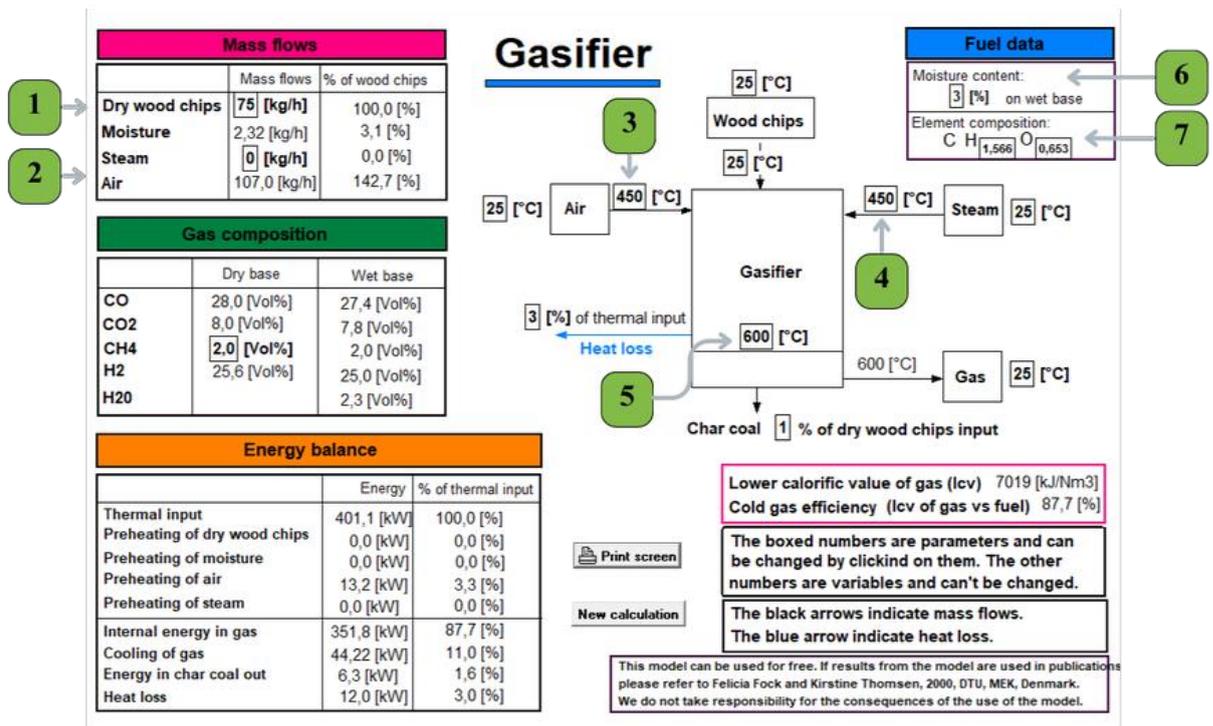
Fonte: *Design Expert* (2023)

Ao ser executado o DoE definido, o software possibilita a identificação de qual modelo polinomial escolher, descrevendo a relação entre as variáveis independentes e as respostas por meio de termos polinomiais. Essa escolha do modelo polinomial mais adequado é feita baseada nos parâmetros de indicativos para determinar aceitabilidade citados na Seção 2.1.7.2, conforme demonstra o *print* da tela do Software *Design Expert* na Figura 16. O software indica em negrito e rotula como “Sugerido” o modelo polinomial que melhor atende aos critérios especificados, ou seja, que melhor descreve a relação entre as variáveis independentes e as respostas (Figura 16). O software também exibe um aviso sobre modelos com erros ou *alias*. Nesse caso, as estimativas de mínimos quadrados não serão únicas, o que pode resultar em plotagens de contorno com formas enganosas.

3.3 GASEIFICADOR

Com o modelo tecnológico definido, a simulação da gaseificação foi realizada utilizando um modelo de equilíbrio termodinâmico desenvolvido com o software *EES* (*Engineering Equation Solver*) por Fock *et al.* (2000). Este modelo (Figura 17) é usado para simular processos de gaseificação de plantas do tipo *downdraft* e pode ser usado para biomassa residual de milho pois não se baseia em uma planta específica, podendo variar os dados de entrada como fluxo de massa (1), fluxo de vapor (2), temperatura do ar (3), do vapor (4), gaseificador (5), teor de umidade (6), e composição do combustível a ser analisado (7).

Figura 17 – Modelo de gaseificação via software EES.



Fonte: EES (2023)

Todos os parâmetros descritos na Tabela 15 têm potencial para interferir nos resultados da simulação, alguns com maior potencial e outros, menor. Segundo Mondal (2022 *apud* LAMAS *et al.*, 2023), o pré-aquecimento do vapor não influencia

significativamente na produção gás hidrogênio proveniente da gaseificação de resíduos sólidos urbanos em comparação com a temperatura de gaseificação e proporção V/B. Portanto, o pré-aquecimento do ar e do vapor foi estabelecido fixo em 450 °C. Da mesma forma, a temperatura de gaseificação foi fixada em 600 °C tendo em vista o estudo de Moghtaderi (2007) o qual afirma que cerca de 600 °C define a temperatura mais baixa na qual a reação pode ser realizada sem grandes penalidades em termos de rendimento de hidrogênio:

Tabela 15 – Parâmetros para a simulação no EES

| Parâmetro | Valor |
|------------------------------------|--------------|
| Fluxo de massa | 75 kg/h |
| Fluxo de vapor | 0-75 kg/h |
| Temperatura do Ar | 450°C |
| Temperatura do Vapor | 450°C |
| Temperatura do Gaseificador | 600°C |
| Teor de Umidade | 3% |
| Perda de Calor | 3% |
| Composição combustível | Tabela 13 |

Fonte: Autora (2023)

Ao estabelecer os parâmetros fixos e os variáveis na Seção 3.2 e utilizar os parâmetros de entrada no software EES descritos na Tabela 15, foi possível obter dados como a composição do gás resultante da gaseificação (gás de síntese ou syngas), Poder Calorífico Inferior (PCI) (*Low Heating Value* em inglês) e a Eficiência de Gás Frio (EGF) (*Cold Gas Efficiency*). Esses dados foram utilizados posteriormente no software *Gabi* e *Design Expert* para avaliar o desempenho do processo de gaseificação e encontrar o ponto ótimo de proporção de biomassa e V/B. O PCI e a EGF foram encontrados via software *EES* e podem ser determinados pela Equações 4 e 5. O PCI consiste na quantidade de calor gerada pela combustão completa menos o calor latente armazenado na água vaporizada enquanto a EGF é a relação entre a energia química que sai do reator, o gás de síntese (ou syngas) e a energia química que entra no reator, a biomassa.

$$PCI_{biomassa} = PCS - h_{fg}(9H + U) \quad (4)$$

$$EFG = \frac{Q_{syngas} \times PCI_{syngas}}{m_{bio} \times PCI_{bio}} \quad (5)$$

Nas equações acima, PCS é o Poder Calorífico Superior, U descreve a umidade da biomassa, h_{fg} é o calor específico de 2,4 MJ/kg e H é o percentual de hidrogênio no combustível. A Eficiência do Gás Frio (EGF) foi definida em função da vazão de gás de síntese (Q_{syngas}) em $kg \cdot h^{-1}$, o fluxo mássico de biomassa (m_{bio}) em $kg \cdot h^{-1}$, e o Poder Calorífico Inferior (PCI_{bio}) em $kJ \cdot kg^{-1}$.

3.4 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

3.4.1 Escopo

O presente estudo avaliou o desempenho ambiental da gaseificação da biomassa de milho através da aplicação do Ciclo de Vida Avaliação (ACV). O impacto ambiental do sistema de gaseificação da palha, sabugo de milho e *blend* foi estimado usando a ferramenta de software *GaBi* e pela aplicação da metodologia CML 2001. O método descreve os impactos das emissões de poluição usando Categorias de Impacto Ambiental (Tabela 8) e os calcula usando a Equação 6, onde E_i é a massa de composto i emitida para o ar e PP_i é a potencial de poluição do composto i (ZANG *et al.*2022).

$$\text{Contribuição da poluição} = \sum PP_i \times E_i \quad (6)$$

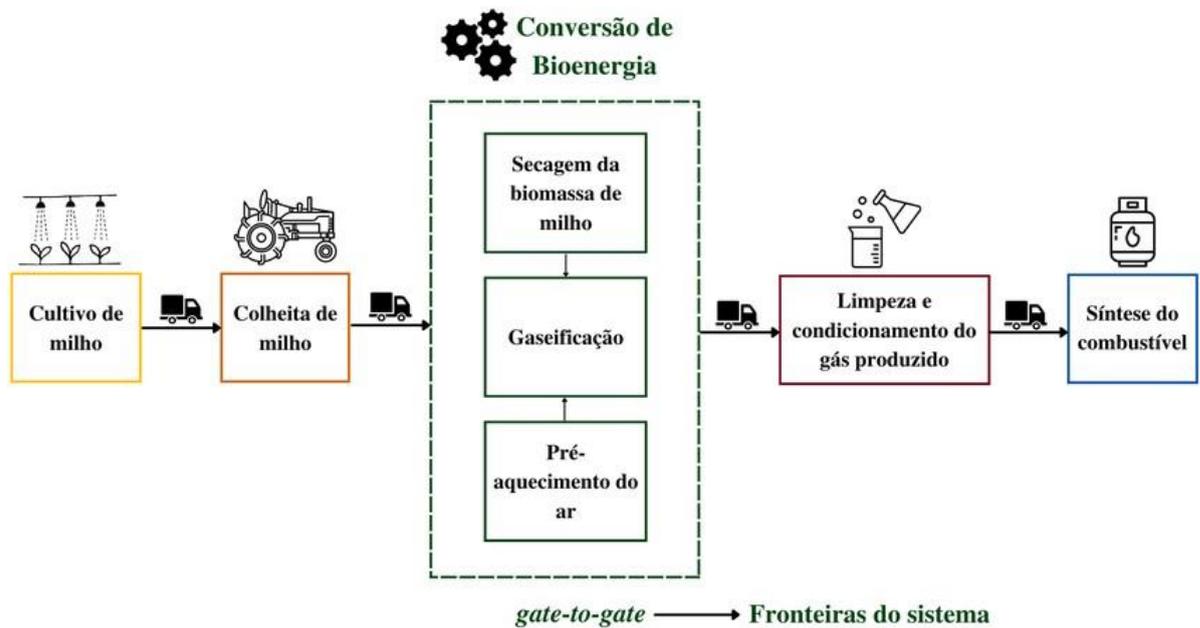
As seguintes categorias de impacto foram examinadas:

- Potencial de Aquecimento Global ou *Global Warming Potential* (GWP), que convertidos de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) em equivalente de dióxido de carbono (kg CO₂ eq);
- Potencial de Acidificação ou *Acidification Potential* (AP), que converte dados de ICV em equivalente de dióxido de enxofre (kg SO₂ eq).

3.4.2 Fronteiras do Sistema e Unidade Funcional

A unidade funcional definida para o fluxo de massa da biomassa e do vapor é [kg/h] e o estudo foi limitado a uma análise portão-a-portão ou *gate-to-gate* na nomenclatura inglesa, consistindo em apenas um processo elementar, conforme ilustrado na Figura 10 e Figura 18.

Figura 18 – Delimitação das fronteiras do sistema estudado

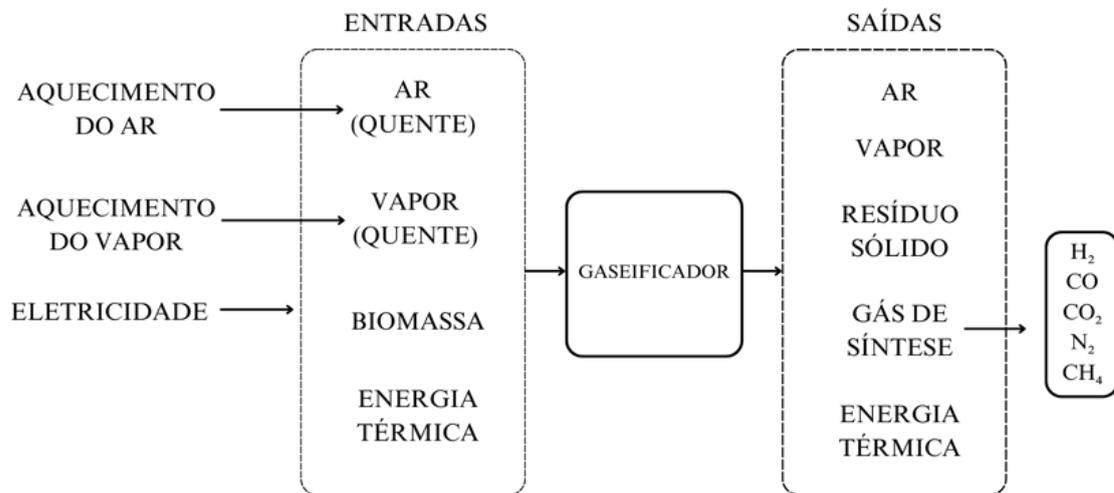


Fonte: Autora (2023)

A Figura 18 mostra alguns processos do ciclo de vida do uso da biomassa de milho e, para a análise do presente estudo, há um processo elementar (gaseificação) e dois processos auxiliares: a secagem prévia da biomassa de milho e o pré-aquecimento do ar, ambos relacionados à retirada da umidade dos componentes.

3.4.3 Inventário do Ciclo de Vida

A base de dados selecionada foi a base de dados embutida no software *Gabi*, *Gabi Database* que compreende cobertura de dados para ACV de transportes, energia, biocombustíveis, bomba de irrigação, entre outros (Gabi Software, 2014). Ao elaborar o Inventário de Ciclo de Vida, os impactos ambientais a serem calculados serão baseados em planos, processos, entradas e saídas para o sistema estudado e elaborado no software *GaBi*, conforme Figura 19. Para determinar os valores de entrada e saída no Software *GaBi*, foram utilizadas as informações extraídas da simulação do gaseificador no EES elaborado por Fock *et al.* (2000).

Figura 19 – Fluxos de entradas e saídas do modelo de Gaseificador no Gabi

Fonte: Autora (2023)

Os dados coletados para o Inventário de Ciclo de Vida incluiu as entradas e transferência de massa e energia necessária para:

1. Aquecimento do Ar (*Heating of air*);
2. Aquecimento do Vapor (*Heating of steam*);
3. Eletricidade.

A Figura 19 mostra as entradas do sistema como: o ar aquecido, o vapor aquecido, a matéria-prima, e a demanda de energia térmica. As saídas consistem no ar e vapor resfriados, o gás resultante, resíduo sólido gerado (carvão) e a energia térmica liberada. Os resultados dos cenários examinados incluíram os impactos ambientais dos processos acima referidos e quantificados na Tabela 16.

Tabela 16 – Inventário de Ciclo de Vida

| | Execuç | Execuçã |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <i>Parameter</i> | <i>Value</i> |
| husk | 0,500 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 0,500 | 1,000 | 0,500 | 1,000 |
| cob | 0,500 | 1,000 | 1,000 | 0,000 | 1,000 | 0,500 | 0,000 | 0,500 | 0,000 |
| Heating of air | | | | | | | | | |
| air | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 |
| heat | 0,139 | 0,134 | 0,144 | 0,158 | 0,134 | 0,139 | 0,144 | 0,154 | 0,149 |
| Heating of steam | | | | | | | | | |
| heat | 0,446 | 0,499 | 0,000 | 0,000 | 1,032 | 0,931 | 0,850 | 0,000 | 0,408 |
| steam | 0,500 | 0,500 | 0,000 | 0,000 | 1,040 | 1,040 | 1,040 | 0,000 | 0,500 |
| Gasifier - inputs | | | | | | | | | |
| steam | 0,500 | 0,500 | 0,000 | 0,000 | 1,040 | 1,040 | 1,040 | 0,000 | 0,500 |
| air | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 |
| vapour_in | 1,158 | 0,993 | 1,071 | 1,427 | 0,988 | 1,143 | 1,301 | 1,248 | 1,326 |
| hybrid blend | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Thermal energy | 4,800 | 4,800 | 4,800 | 4,800 | 4,800 | 4,800 | 4,800 | 4,800 | 4,800 |
| Gasifier – outputs | | | | | | | | | |
| heat | 0,528 | 0,475 | 0,475 | 0,576 | 0,475 | 0,528 | 0,576 | 0,528 | 0,576 |
| charcoal | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 |
| h2 | 0,077 | 0,070 | 0,048 | 0,055 | 0,080 | 0,088 | 0,096 | 0,052 | 0,083 |
| co | 0,410 | 0,344 | 0,650 | 0,842 | 0,208 | 0,250 | 0,297 | 0,745 | 0,480 |
| co2 | 0,948 | 0,953 | 0,481 | 0,376 | 1,164 | 1,194 | 1,219 | 0,430 | 0,936 |

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| n2 | 0,888 | 0,762 | 0,822 | 1,094 | 0,757 | 0,877 | 0,998 | 0,958 | 1,017 |
| ch4 | 0,035 | 0,031 | 0,028 | 0,034 | 0,033 | 0,036 | 0,040 | 0,031 | 0,038 |
| vapour_out | 0,321 | 0,353 | 0,063 | 0,045 | 0,807 | 0,758 | 0,713 | 0,053 | 0,293 |

Fonte: Excel e *EES* (2023)

Acerca da Tabela 16 acima, vale ressaltar que a obtenção dos valores foi feita mediante a utilização de resultados extraídos do modelo de gaseificador no software *EES* e realizando a devida conversão de unidades.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela a seguir (Tabela 17) consiste em um compilado das execuções ou *Runs* feitas juntamente com as variáveis independentes ($A = V/B$ e $B = \%$ de palha de milho) e variáveis de respostas obtidas a partir dos softwares *EES* ($R1 = PCI$; $R2 = EGF$; $R3 = H_2\%$; $R4 = CO\%$) e *Gabi* ($R5 = GWP$ e $R6 = AP$).

Tabela 17 – Resultados da modelagem de gaseificação

| Execução | Variáveis independentes | | Resultados de Respostas | | | | | |
|----------|-------------------------|-----|-------------------------|------|------|------|--------|---------|
| | A | B | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 |
| 1 | 0,5 | 0,5 | 6223 | 86 | 35,2 | 13,5 | 2,3464 | 0,00246 |
| 2 | 0,5 | 0 | 6141 | 85,2 | 35,6 | 12,5 | 2,2432 | 0,00248 |
| 3 | 0 | 0 | 6877 | 86,5 | 26,5 | 26,1 | 1,6492 | 0,00226 |
| 4 | 0,5 | 0,5 | 6223 | 86 | 35,2 | 13,5 | 2,3464 | 0,00246 |
| 5 | 0 | 1 | 7019 | 87,7 | 25,6 | 28 | 1,7133 | 0,00226 |
| 6 | 0,5 | 0,5 | 6223 | 86 | 35,2 | 13,5 | 2,3464 | 0,00246 |
| 7 | 1 | 0 | 5789 | 84 | 38,5 | 7,3 | 2,5516 | 0,00272 |
| 8 | 1 | 0,5 | 5864 | 84,8 | 38,5 | 7,9 | 2,6581 | 0,00268 |
| 9 | 1 | 1 | 5932 | 85,6 | 38,3 | 8,6 | 2,7892 | 0,00265 |
| 10 | 0 | 0,5 | 6953 | 87,2 | 26,1 | 27,1 | 1,6829 | 0,00226 |
| 11 | 0,5 | 1 | 6298 | 86,6 | 34,8 | 14,5 | 2,4163 | 0,00245 |

| | | | | | | | | |
|----|-----|-----|------|----|------|------|--------|---------|
| 12 | 0,5 | 0,5 | 6223 | 86 | 35,2 | 13,5 | 2,3464 | 0,00246 |
| 13 | 0,5 | 0,5 | 6223 | 86 | 35,2 | 13,5 | 2,3464 | 0,00246 |

Fonte: *Design Expert 13* (2023)

4.1 PODER CALORÍFICO INFERIOR E EFICIÊNCIA DO GÁS FRIO

O PCI consiste na quantidade de calor gerada pela combustão completa menos o calor latente armazenado na água vaporizada. Adicionalmente, o PCI do gás resultante da gaseificação (gás de síntese) depende da quantidade de H₂ e CO dado que o valor de CH₄ foi mantido constante (2%) durante a simulação no *EES*. Há uma variação de valores de PCI de 5789 a 7019 kJ/Nm³ (*Execuções 7 e 5*, respectivamente) e é possível observar uma queda à medida que a proporção V/B aumenta, comportamento apresentado em todas as três amostras de biomassa. Com relação ao maior valor de PCI (7019 kJ/Nm³), tem-se a biomassa 100% palha de milho e proporção V/B=0, enquanto o ponto de menor PCI (5789 kJ/Nm³) é a biomassa 100% de sabugo de milho e com V/B = 1. Li *et al.* (2018) também realizou a análise da gaseificação da palha de milho e obteve resultados semelhantes com PCI de 5240 kJ/Nm³. Ele também analisou a palha de arroz que resultou também em 5240 kJ/Nm³. Lamas *et al.* (2023) elaborou um artigo acerca da co-gaseificação de resíduos sólidos urbanos com vapor como agente gaseificante e obteve valores de PCI entre 4642 e 5072 kJ/Nm³. A autora também afirma que há a diminuição tanto de PCI quanto de EGF com um aumento de V/B, atribuído principalmente à redução de CO.

A Eficiência de Gás Frio (EGF), do inglês *Cold Gas Efficiency* é a relação entre a energia química que sai do reator, o gás de síntese (ou *syngas*) e a energia química que entra no reator, a biomassa. Nota-se também uma queda de eficiência à medida que a proporção V/B é elevada a 1, assim como o PCI, atribuído principalmente à redução de CO. Há uma queda de 87,7% a 84%, sendo o maior valor correspondente a palha de milho com V/B = 0 (*Execução 5*) e o menor, ao sabugo com V/B = 1 (*Execução 7*). Assim como para PCI, os maiores valores de EGF são pertencentes à palha de milho (média de 86,6%) enquanto os menores valores são do sabugo com um valor médio de 85,2%. No artigo de Chen *et al.* (2022) é realizada a análise da co-

gaseificação da biomassa e é mostrado o efeito da proporção de combustível misturado na Eficiência de Gás Frio. Quando a biomassa representa menos de 25%, a EGF é basicamente mantida em cerca de 75%. Quando o conteúdo de biomassa atinge cerca de 50%, a eficiência do gás frio aumenta rapidamente até o valor máximo de 79,5%.

4.2 PERCENTUAL DE EMISSÃO DE GÁS HIDROGÊNIO E MONÓXIDO DE CARBONO

O percentual de H₂ consiste na relação entre a quantidade de H₂ em mol/kg presente no gás produzido na gaseificação o qual inclui H₂, CH₄, CO, N₂ e CO₂ em sua composição. É possível observar que, à medida que a proporção V/B aumenta, o percentual de H₂ aumenta nas 3 biomassas estudadas. Há uma variação de 25,6% a 38,5%, representando um aumento médio de 50,39% de percentual de H₂ presente no gás produzido na gaseificação. Ao relacionar os tipos de biomassa e o percentual de H₂, nota-se a diminuição de H₂ ao aumentar a proporção de palha de milho presente na biomassa. O menor valor percentual de H₂ (*Execução 5*) corresponde a biomassa 100% palha de milho e V/B = 0 enquanto o maior valor de H₂ (*Execução 8*) corresponde a biomassa 100% sabugo de milho com proporção V/B = 1. No estudo de Lamas *et al.* (2023), há um comportamento similar no qual o aumento da proporção de resíduos sólidos urbanos (RSU) no blend reduziu o H₂% em cerca de 19,42% e o valor médio de H₂ é 36,1%, enquanto no presente estudo o valor médio é 35,2%. Li *et al.* (2018) obteve o valor de 15,2% para percentual de H₂ enquanto Chen *et al.* (2020) realizou a gaseificação de resíduos sólidos urbanos e obteve valor médio de 23% de H₂.

O percentual de monóxido de carbono, assim como o gás hidrogênio, corresponde a uma quantidade de CO em mol/kg presente no gás produzido na gaseificação. Há um aumento no percentual de CO juntamente ao aumento da presença de palha de milho na biomassa, o que difere de H₂ que é reduzido com o aumento percentual da palha de milho. Dado que ambos os gases estão presentes na composição do gás resultante da gaseificação, é coerente uma relação inversamente proporcional entre eles. Da mesma forma, enquanto o H₂% aumenta com aumento de V/B, para CO o percentual diminui com o aumento da presença do agente gaseificante. O maior valor de monóxido de carbono corresponde ao *Execução 5* com

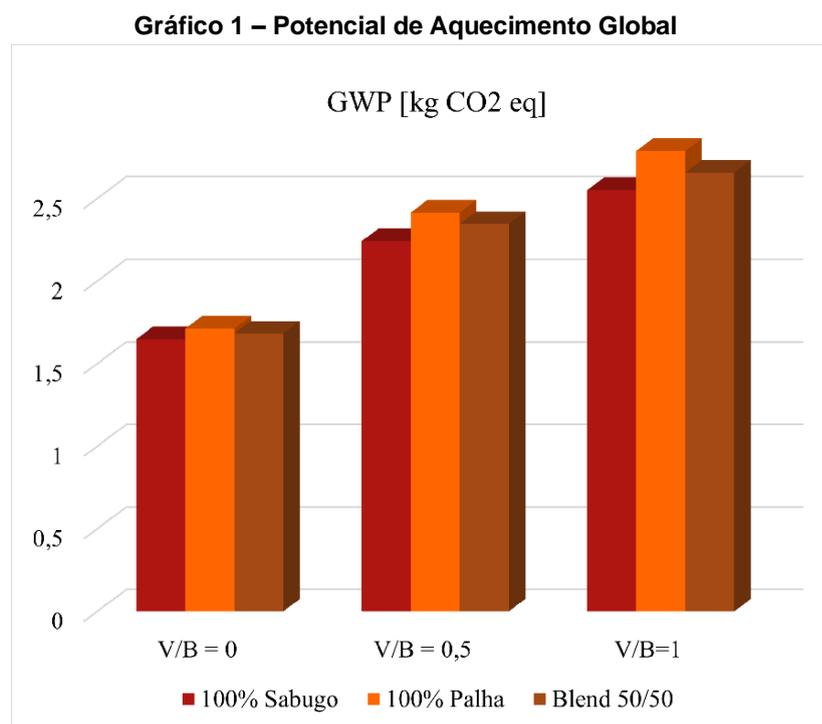
28% e o menor valor, o *Execução 7* com 7,3%. Em comparação com a literatura, Zhou *et al.* (2022) apresentou um artigo cujo percentual de emissão de CO é de 28,63% e 31,54% para palha de milho em uma gaseificação química em looping, enquanto para Li *et al.* (2018), a gaseificação em um modelo *downdraft* obteve para a palha de milho 5,3% de CO e a palha de arroz, 24,8%. Chen *et al.* (2022) obteve valor médio de 35% de CO na gaseificação de resíduos sólidos.

4.3 CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAIS: POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL E POTENCIALDE ACIDIFICAÇÃO

As possíveis Categorias de Impacto foram enunciadas na Tabela 8 e foram selecionadas duas para serem analisadas via software *Gabi*:

- Aquecimento Global cujo fator de caracterização é Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential - GWP*); e
- Acidificação cujo fator de caracterização é o Potencial de Acidificação (*Acidification Potential - AP*).

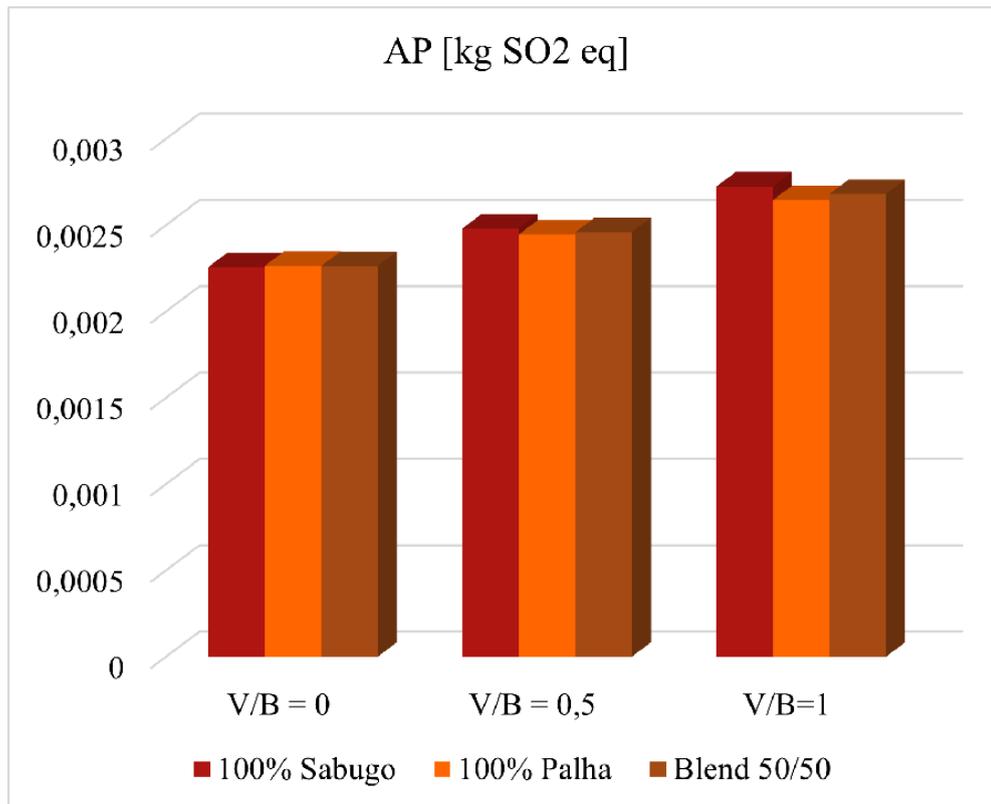
O Potencial de Aquecimento Global ou GWP converte dados de ICV em equivalente de dióxido de carbono (kg CO₂-eq) e os valores de emissões baseados nas variáveis independentes (biomassas e proporção V/B) estão descritos no Gráfico 1. A maior presença de vapor (V/B =1) como agente gaseificante gera mais emissões de CO₂-eq nas 3 biomassas analisadas. Não obstante, a maior presença de palha de milho na biomassa também ocasiona mais emissões, um aumento de 7,71% (média de 2,24 para sabugo e 2,41 kg CO₂-eq para palha). Nota-se um padrão de aumento de emissões de gases poluentes (CO₂ e CO) ao aumentar da presença de palha de milho na biomassa, conforme Gráfico 1. A título de comparação de resultados, Valente, Iribarren e Dufour (2019) realizaram uma análise de hidrogênio a partir gaseificação de biomassa (BG_H₂) contra hidrogênio convencional a partir de vapor de gás natural reformando (SMR_H₂) e obteve 0,18 kg CO₂-eq para BG_H₂ e 11.43 kg CO₂-eq para SMR_H₂. Ozturk, Ayol e Tezer (2023) obtiveram valores maiores comparado aos da biomassa de milho, com GWP = 38.79 kg CO₂eq e AP = 0.49 kg SO₂eq para a gaseificação de bagaço de azeitona.



Fonte: Gabi e Excel (2023)

Acerca dos valores resultantes do Potencial de Acidificação em kg de SO₂ eq (Gráfico 2), não há uma grande variação das emissões diante das três biomassas ou das três proporções de V/B. Por exemplo, dentro de V/B = 0, a diferença entre o maior e o menor valor é de $6,4 \times 10^{-6}$ kg de SO₂-eq. Diante das três biomassas, sabugo de milho possui o maior valor (0,002481kg de SO₂-eq) enquanto a palha possui o menor valor, com uma diferença de 1,4% entre os dois. Em comparação com a literatura, os valores de AP no artigo de Valente, Iribarren e Dufour (2019) foram de 0,0145 kg SO₂-eq para a gaseificação de biomassa e 0,0186 kg SO₂-eq para vapor de gás natural reformando, valores similares aos encontrados no presente trabalho.

Gráfico 2 – Potencial de Acidificação



Fonte: Gabi e Excel (2023)

4.4 RESULTADOS MSR E CORRELAÇÃO DOS DADOS

Os resultados simulados que compuseram o design de experimento (DoE) (Tabela 17) para obter os modelos de predição para as variáveis de respostas usando uma abordagem estatística para determinar qual polinômio se encaixa na equação considerando os modelos possíveis. A equação geral é dada por:

$$R = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_{12} AB + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2$$

Os fatores A e B correspondem às variáveis independentes (A = V/B e B = tipo de biomassa) enquanto R é o modelo de respostas PCI (R1), EGF (R2), H2 (R3), CO (R4), GWP (R5) e AP (R6). Os coeficientes β são mostrados na Tabela 18 e representam as constantes para cada equação modelo determinada.

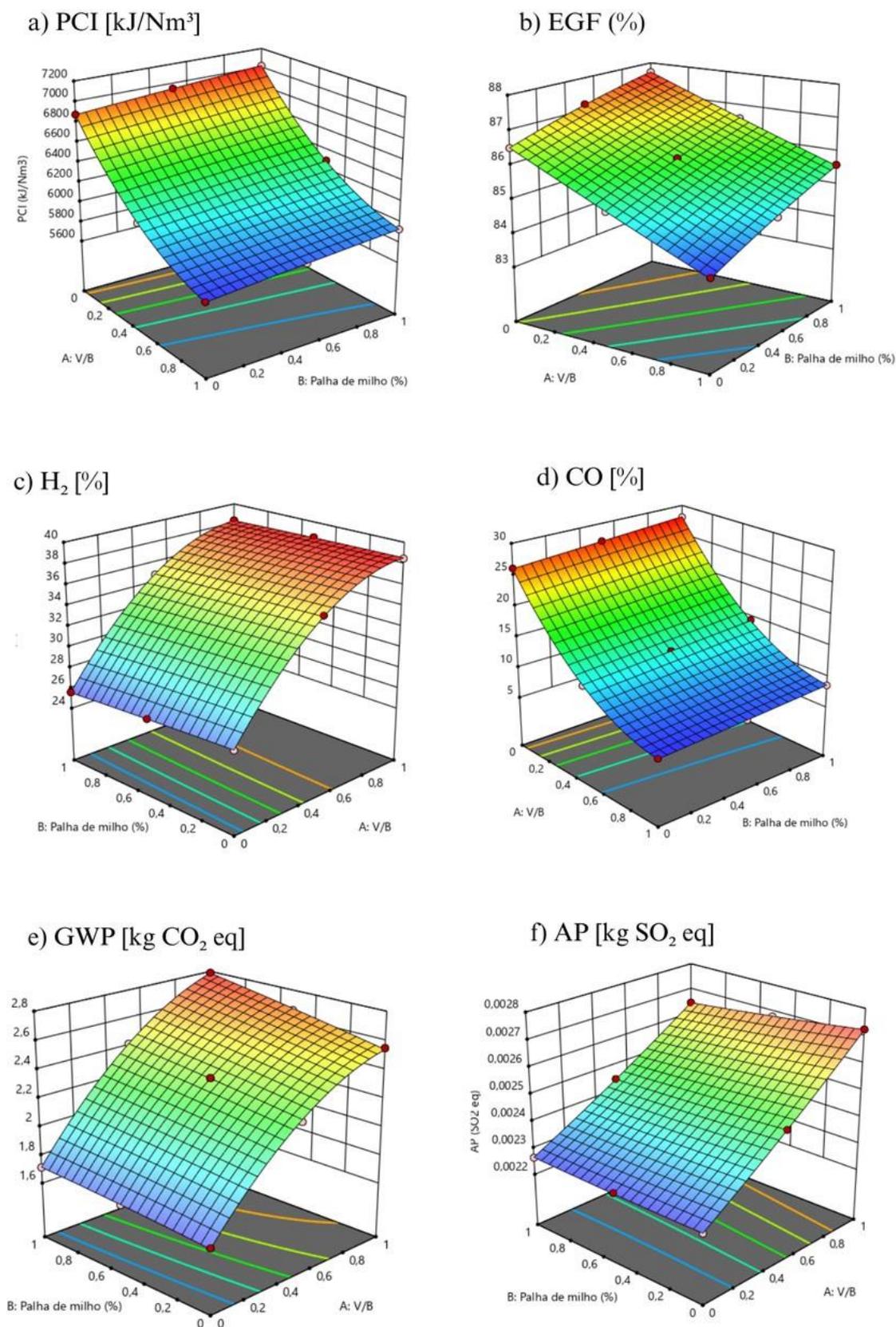
Tabela 18 – Coeficientes das equações de predição

| Coeficientes | PCI | EGF | H ₂ | CO | GWP | AP | Coded Factors |
|--------------|----------|---------|----------------|--------------------------|----------|----------------------------|------------------|
| β_0 | 6223,1 | 85,9931 | 35,21 | 13,5 | 2,3434 | 0,00246 | |
| β_1 | -544 | -1,1667 | 6,1833 | -9,56667 | 0,4923 | 0,00021 | x A |
| β_2 | 73,6667 | 0,7 | -0,3167 | 0,8667 | 0,0791 | -1,7812 x 10 ⁻⁵ | x B |
| β_{12} | 0,25 | 0,1 | 0,175 | -0,15 | 0,0433 | -2,1238 x 10 ⁻⁵ | x AB |
| β_{11} | 185,138 | 0,0241 | -2,93621 | 4 | -0,16528 | 1,0899 x 10 ⁻⁵ | x A ² |
| β_{22} | -3,86207 | 0,1792 | -0,03620 | 1,38 X 10 ⁻¹⁵ | -0,0061 | 3,1346 x 10 ⁻⁶ | x B ² |

Fonte: *Design Expert* (2023)

Cada equação de predição para cada variável de resposta (R1 a R6) gera um gráfico de superfície 3D, conforme Figura 20. Observa-se as diferentes curvaturas obtidas e que o ponto mais elevado de PCI e EGF pertence a biomassa palha de milho e com V/B = 0 (Gráficos 20 a) e b)). Nota-se também o comportamento dos gráficos dos gases analisados, com aumento de H₂% à medida que V/B aumenta, enquanto o CO% diminui. Por fim, os Gráficos 20 e) e f) de Categorias de Impacto Ambiental indicam o maior ponto de GWP sendo Palha de Milho e V/B = 1 e maior ponto de AP, sabugo com V/B =1.

Figura 20 – Gráfico de Superfícies 3D



Fonte: Design Expert (2023)

Ao integrar os resultados de resposta (PCI, EGF, H₂%, CO%, GWP e AP), a base de dados estatísticos no software *Design-Expert* sugeriu um modelo matemático com o maior grau polinomial (sem *alias*) que descrevesse melhor a relação entre as variáveis independentes e a resposta desejada. Os parâmetros utilizados para determinar o melhor modelo polinomial são R² Previsto e R² ajustado, enunciados na Tabela 19. É possível observar também que um modelo Quadrático foi alcançado para todas as seis respostas do modelo considerando o mais alto modelo polinomial e o modelo não foi *aliased* (comprometido). Os valores R² Previsto e R² Ajustado estão em razoável concordância tendo em vista a diferença menor que 0,2 entre eles e a proximidade dos valores ao valor máximo (R² = 1) também demonstra a precisão do modelo estabelecido.

Tabela 19 – Modelos Polinomiais

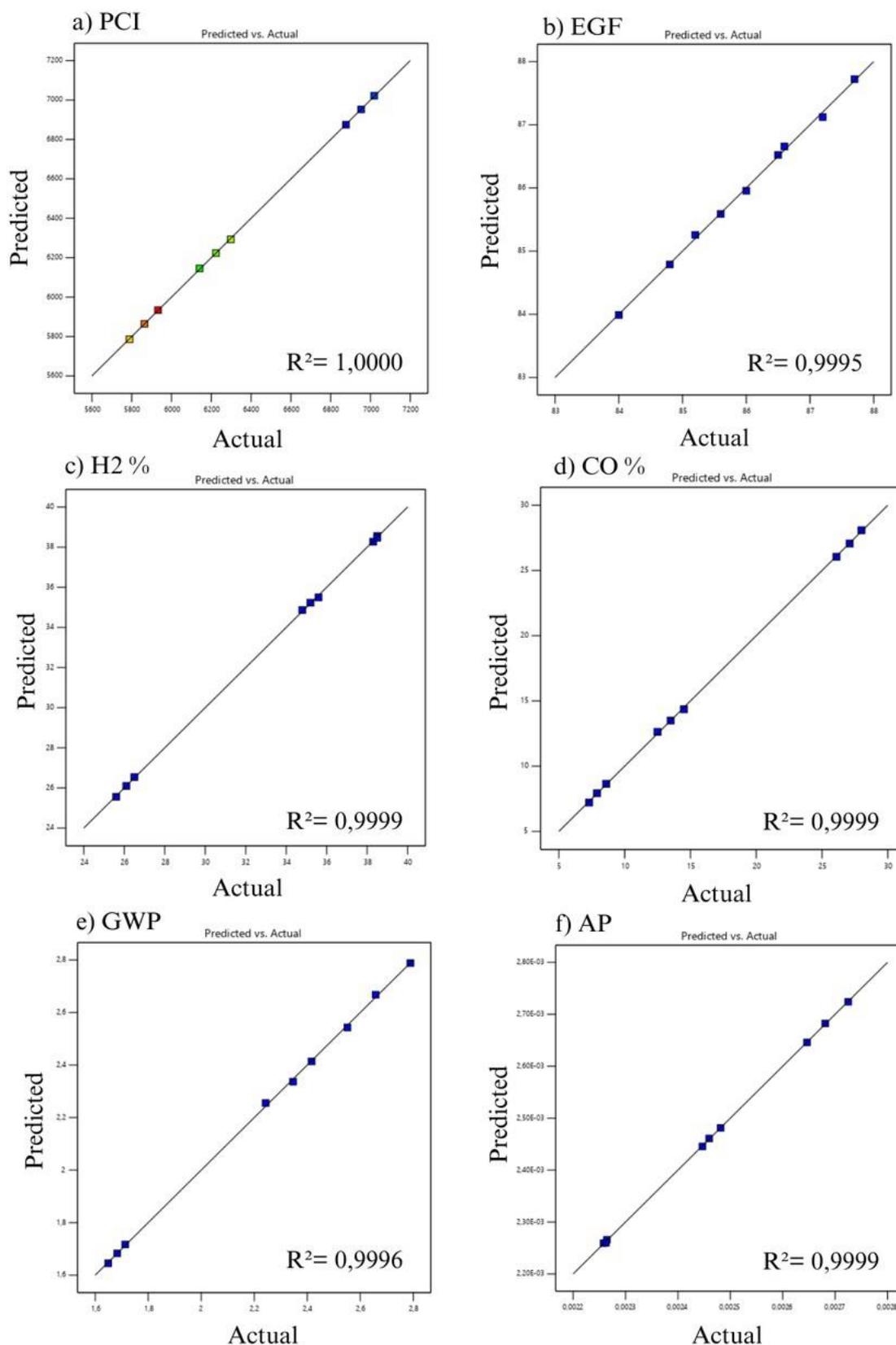
| Modelo | R ² ajustado | R ² previsto | Modelo Polinomial Soma dos Quadrados |
|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| PCI | 0,9999 | 0,9996 | Quadrático |
| EGF | 0,9992 | 0,9959 | Quadrático |
| H ₂ | 0,9998 | 0,9990 | Quadrático |
| CO | 0,9998 | 0,9990 | Quadrático |
| GWP | 0,9994 | 0,9971 | Quadrático |
| AP | 0,9999 | 0,9994 | Quadrático |

Fonte: *Design Expert 13* (2023)

Em um gráfico “*Predicted vs Actual*”, o eixo vertical representa os valores previstos ou estimados pelo modelo, enquanto o eixo horizontal representa os valores reais ou observados nas simulações no EES ou *Gabi*. O Gráfico 21 a) de PCI mostra o maior valor de R² chegando a 1, enquanto o menor valor pertence a EGF com R² = 0,9986 (Gráfico 21b)). No estudo de Mansur *et al.* (2020), os valores de resposta previstos e reais de ambas as co-gaseificações são mostrados no modelo Quadrático

e e os valores de R² foram 0,98 e 0,89 para as duas amostras (*blend* carvão/serradura e carvão/paletes de madeira), próximos aos valores encontrados para a biomassa de milho. Um bom modelo estatístico tende a produzir pontos próximos à linha de 45 graus, onde os valores previstos e os valores reais são iguais. Caso contrário, se os pontos se afastarem da linha de 45 graus, indica que o modelo está subestimando ou superestimando os valores reais.

Figura 21 – Gráficos Previsto versus Real



Fonte: Design Expert 13 (2023).

4.5 ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO

Diante da determinação dos modelos polinomiais, da qualidade do modelo estabelecida pelos valores de R^2 Previsto e R^2 Ajustado e o conjunto de gráficos 21, é possível otimizar numericamente o processo de gaseificação focando na produção de hidrogênio e na redução das emissões de CO, CO₂: e SO₂. O modelo de otimização busca uma combinação de níveis de fatores que satisfaçam simultaneamente os critérios colocados em cada uma das respostas e fatores. Na ferramenta de confirmação (*Confirmation Location*) foi selecionada a comparação com um intervalo dois lados com nível de confiança de 95%. Na Figura 22, vê-se os valores das variáveis independentes encontrados pelo software e classificados como ponto ótimo.

Figura 22 – Ponto ótimo

Confirmation Location #1

| | V/B | Palha de milho |
|--|----------|----------------|
| | 0,618838 | 0,255071 |

Confirmation

Two-sided Confidence = 95%

Fonte: *Design Expert 13* (2023)

A otimização foi feita, baseando-se em 2 objetivos que foram inseridos no software: maximizar a geração de H₂ (buscando um gás de melhor qualidade) e reduzir impacto ambiental (menor emissão de gases CO, kg CO₂-eq e kg SO₂-eq). A Figura 22 mostra que, a partir da análise estatística por meio do software *Design Expert*, o ponto otimizado consiste na biomassa composta por 25,5% palha de milho, 74,5% de sabugo de milho e presença de agente gaseificante com uma razão V/B = 0,6188. Ao inserir os valores da condição ótima nos softwares *EES* e *Gabi*, obteve-se os valores descritos na Tabela 20. Nota-se que a variação entre os valores reais e previstos vai de 0,05% até 3,26%, mantendo-se abaixo de 5%, conforme o

nível de confiança estabelecido pelo software e indicado na Figura 22.

Tabela 20 – Valores previstos de respostas na condição ótima

| Parâmetro | Valores previstos | Valores reais | Variação % |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|
| PCI (kJ/Nm³) | 6067,22 | 6083 | 0,26% |
| EGF (%) | 85,34 | 85,3 | 0,05% |
| H₂ (%) | 36,6402 | 36,4 | 0,66% |
| CO (%) | 11,0451 | 11,4 | 3,26% |
| GWP (kg CO₂-eq) | 2,40578 | 2,42886 | 0,96% |
| AP (kg SO₂-eq) | 0,002522 | 0,002526 | 0,17% |

Fonte: *Design Expert 13* (2023)

5 CONCLUSÃO

Ainda que seja um desafio lidar com biomassa residual de milho, o investimento em maneiras de tratar e utilizar essa matéria-prima para produzir energia, calor e combustíveis é essencial para a transição para uma matriz energética mais renovável. Os resultados obtidos para as três amostras de biomassas mostram o potencial energético que existe no uso de biomassa residual agrícola e agroindustrial no contexto do Brasil, 3º maior produtor de milho do mundo. Realizou-se análise dessas três biomassas (palha, sabugo e *blend*) em três cenários com diferentes proporções vapor para biomassa (V/B), sendo o vapor o agente gaseificante.

Foi utilizado o modelo do gaseificador no software *EES*, seguido do software *Gabi* e por fim o software *Design Expert* para auxiliar na comparação de todas as variáveis independentes e valores de resposta, de forma a facilitar a visualização e análise das interações. É possível verificar a influência que cada parâmetro (composição da biomassa e proporção V/B) apresenta na composição do gás síntese e categorias de impacto (Potencial de Aquecimento Global e Potencial de Acidificação) e outros valores de resposta. Verificou-se que:

- Há uma queda de Poder Calorífico Superior à medida que a proporção V/B aumenta, comportamento apresentado em todas as três amostras de biomassa. Quanto maior o PCI, maior é o potencial energético da biomassa. Nesse caso, a amostra 100% palha de milho e proporção V/B = 0 ganhou destaque com 7019 kJ/Nm³;
- A Eficiência do Gás Frio apresenta um comportamento semelhante ao PCI, com queda de EGF ao aumentar V/B e com a palha de milho com o maior valor percentual (87,7%) e com ausência de vapor (V/B = 0);
- Com relação a emissão de gases, enquanto para H₂ o percentual aumenta com aumento de V/B, para CO o percentual diminui com a presença do agente gaseificante, eles são inversamente proporcionais, dado que ambos participam da composição do gás de síntese.
- O maior percentual de H₂ (38,5%) e o menor percentual de CO (7,3%) pertencem a biomassa 100% sabugo de milho.

- Tanto para o Potencial de Aquecimento Global ou Potencial de Acidificação, a maior presença de vapor ($V/B = 1$) como agente gaseificante gera mais emissões de kg CO₂-eq e kg SO₂-eq nas 3 biomassas analisadas, destacando-se a palha de milho com média de 2,41 kg de CO₂-eq e o sabugo de milho com 0,002481 kg de SO₂-eq

Dentro de software *Design Expert* o modelo trabalhado foi verificado mostrando uma boa concordância entre os resultados experimentais e previstos com $R^2 > 0,9$ e a definição do modelo polinomial quadrático para todos os 6 valores de resposta. Também é possível visualizar a qualidade do modelo nos gráficos *Predicted vs Actual* nos quais pontos estão próximos à linha de 45 graus, onde os valores previstos e os valores reais são iguais.

Diante das interações entre as variáveis e respostas e a validação do modelo, foi possível encontrar o ponto de otimização buscando (i) maximizar a produção de gás H₂ e (ii) melhor desempenho ambiental. Como resultado, foram estabelecidas as condições ótimas: temperatura de gaseificação 600°C com proporção $V/B = 0,6188$ e uma amostra de biomassa composta por 25,5% de palha de milho e 74,5% de sabugo de milho, mostrando uma produção de H₂ = 36,64% (Previsto) e GWP = 2,40578 kg CO₂-eq (Previsto). A condição ótima foi inserida nos softwares *EES* e *Gabi* para avaliação e a diferença entre os valores Previstos e Reais está abaixo de 5%, confirmando a qualidade do modelo e dos resultados.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a utilização de novas simulações e avaliações da gaseificação de biomassa, como:

1. Impacto no rendimento energético e desempenho ambiental da gaseificação envolvendo pré-tratamento da biomassa, como a desidratação;
2. Adição ou mudança de variáveis independentes, como a variação da temperatura de gaseificação ou a presença ou ausência de agente gaseificante (ar ou vapor);
3. Avaliação de Ciclo de Vida da gaseificação da biomassa com expansão dos limites de fronteira (berço ao túmulo);
4. Avaliação de Ciclo de Vida da gaseificação da biomassa com outros ou mais Categorias de Impacto a serem avaliadas.
5. Gaseificação de outras biomassas residuais e seus impactos e potenciais como casca de arroz e casca de café.

REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação de Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009. Acesso em: 21/12/2022.

ALAUDDIN, Z. A. B. Z. *et al.* Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 2852 – 2862, 2010. ISSN 1364-0321. Acesso em: 30/01/2023.

Anais eletrônicos. ISSN 2594-6307. Disponível em: <<https://proceedings.science/enemp-2019/papers/caracterizacao-do-sabugo-de-milho-e-composicao-do-bio-oleo-produzido-no-processo-de-pirolise-rapida-em-reator-de-leito-f?lang=pt-br>>. Acesso em: 25 fev. 2023.

ASEFFE, J. A. M. *et al.* The corn cob gasification-based renewable energy recovery in the life cycle environmental performance of seed-corn supply chain: An Ecuadorian case study. **Renewable Energy**, Elsevier Ltd, v. 163, p. 1523 – 1535, 2021. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.053>.

ASIF, M.; MUNEER, T. Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier Ltd, Edinburgh, v. 11, n. 7, p. 1388 – 1413, Setembro 2007. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032106000049>. Acesso em: 16 de Agosto de 2022.

BASU, P. (ed.). **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory**. 3. ed. [S.l.]: Elsevier Inc., 2018. 555 p. ISBN 978-0-12-812992-0.

CHEN, G. *et al.* Hydrogen-rich syngas production from municipal solid waste gasification through the application of central composite design: An optimization study. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, p. 33260 – 3273, 2020. ISSN 0360-3199.

CHEN, J. *et al.* Effect of the blend ratio on the co-gasification of biomass and coal in a bubbling fluidized bed with CFD-DEM. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, p. 22328 – 22339, 2022. ISSN 0360-3199.

COELHO, A. F. D. de S. **Avaliação de Ciclo de Vida da produção e utilização de hidrogénio com base em biomassa lenho-celulósica para Portugal**. 2008. 69 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão de Ambiente) — Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, XXXIX., 2019, Belém-Pará.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; OLIVARES GÓMEZ, E. (org.). **Biomassa para**

energia. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. 733 p. ISBN 978-85-268-0783-9. Acesso em: 11 de janeiro.

COSTA, F. M. **Análise de ciclo de vida para a produção de biocombustíveis a partir de biomassa**. 2019. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa.

DIAS, J. M. C. de S. *et al.* Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. **Embrapa Agroenergia. Documentos, 013**, Brasília, DF, Outubro 2012. ISSN 2177-4439. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/952626>. Acesso em: 14/11/2022.

ENGEVISTA, v. 19, n. 1, p. 217 – 235, Janeiro 2017. ISSN 2317-6717.

FOCK, F. *et al.* Modelling a biomass gasification system by means of “EES”. In: SOCIETY,

FREITAS, L. S. *et al.* Gaseificação e pirólise da casca da castanha de caju (ccc) em estudos de avaliação do ciclo de vida (acv) para fins energéticos. **Ambiente: Gestão e Desenvolvimento**, Fortaleza, v. 1, novembro 2020. ISSN 1981-4127. Disponível em: <https://periodicos.uerr.edu.br/index.php/ambiente/article/view/950/609>. Acesso em: 18/07/2022.

FREITAS, L. S. *et al.* Gaseificação e pirólise da casca da castanha de caju (ccc) em estudos de avaliação do ciclo de vida (acv) para fins energéticos. **Ambiente: Gestão e Desenvolvimento**, Fortaleza, v. 1, novembro 2020. ISSN 1981-4127. Disponível em: <https://periodicos.uerr.edu.br/index.php/ambiente/article/view/950/609>. Acesso em: 18/07/2022.

FRIEDRICH, L. **Gaseificação de resíduos agroindustriais para geração de gás de síntese e aumento do poder calorífico em função da glicerina**. 2015. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE).

Sphera GaBi Software. Disponível em < <https://sphera.com/your-path-to-sustainability/> >. Acesso em: 15 de março de 2023.

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática**. 2022. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/pmc/brasil>. Acesso em: 07/05/2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Atualização do mercado de energias renováveis: Perspectivas para 2022 e 2023**. Paris, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-may-2022>. Acesso em: 11 de Setembro de 2022.

LAMAS, G. C. *et al.* Efeito da torrefação na co-gaseificação intensificada por vapor de uma mistura de floresta urbana e resíduos de aterro: H₂ produção e CO₂ mitigação de emissões. **International Journal of Hydrogen Energy**, Abril 2023. ISSN 0360-3199. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923015343>.

- LI, C. *et al.* Multi-criteria optimization for a biomass gasification-integrated combined cooling, heating, and power system based on life-cycle assessment. **Energy Conversion and Management**, v. 178, p. 383 – 399, 2018. ISSN 0196-8904.
- MANSUR, F. Z. *et al.* Co-gasification between coal/sawdust and coal/ wood pellet: A parametric study using response surface methodology. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, p. 15963 – 15976, 2020. ISSN 0360-3199.
- MARAFON, A. C. *et al.* Uso da Biomassa para a Geração de Energia. **Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos**, 211, Aracaju, Dezembro 2016. ISSN 1678-1953.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 37 – 46, 2002. ISSN 0960-8524. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3).
- MENDES, N. C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida**: análise e subsídios para a aplicação no Brasil. 2013. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Escola de Engenharia de São Carlos.
- MME; EPE. **Balanco Energético Nacional**: Relatório Síntese 2022. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>.
- MOGHTADERI, B. Effects of controlling parameters on production of hydrogen by catalytic steam gasification of biomass at low temperatures. **Fuel**, v. 86, p. 2422 – 2430, Outubro 2007. ISSN 0016-2361.
- MOLINO, A. *et al.* Biofuels Production by Biomass Gasification: A Review. **Energies**, v. 11, n. 811, 2018. Disponível em: doi:10.3390/en11040811.
- MONDAL, P. From municipal solid waste (MSW) to hydrogen: performance optimization of a fixed bed gasifier using Box-Benken method. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, p. 20064 – 20075, Maio 2022. ISSN 0360-3199.
- MONTGOMERY, D. C.; EXECUÇÃO GER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 7. ed. [S.l.]: LTC, 2021. 416 p. ISBN 9788521637332.
- OLIVEIRA, G. C. **Avaliação do ciclo da vida da produção de biomassa torrefada para a gaseificação**. 2013. 78 p. Dissertação ((Mestrado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília) — Departamento de Engenharia Mecânica.
- OZTURK, M. U.; AYOL, A.; TEZER, O. Life cycle assessment of olive pomace gasification for an up-draft fixed bed gasifier system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, p. 23339 – 23347, 2023. ISSN 0360-3199.
- PAES, M. C. D.; TEIXEIRA, F. F.; MARTINS, I. S. Composição química da palha de milho com qualidade para artesanato. In: ENERGIA, E. (org.). **Embrapa Milho e Sorgo**. [S.l.:s.n.], 2008.

PARASCANU, M. *et al.* Life cycle assessment of electricity generation from combustion and gasification of biomass in Mexico. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 72

RENÓ, M. L. G. **Avaliação do Balanço Energético e dos Impactos Ambientais do Processo de Produção de Metanol a partir do Bagaço de Cana-de-Açúcar, utilizando a ACV**. 2011. 198 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Itajubá.

Results in Engineering, v. 18, p. 101 – 213, 2023. ISSN 2590-1230.

ROCHA, M. S. R. dos S.; ALMEIDA, R. M. R. G.; CRUZ, A. J. G. da. Avaliação do potencial energético de resíduos agroindustriais provenientes de diferentes regiões brasileiras.

S. S. (Ed.). **SIMS 2000 Conference**. [S.l.: s.n.], 2000.

SAWIN, J. L. *et al.* **Renewables 2012 Global Status Report**. Paris, 2012. Disponível em: https://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR2012_low%20res_FINAL.pdf. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

SEEG. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970 - 2020**. [S.l.], 2021. Disponível em: <http://seeg.eco.br/documentos-analiticos>. Acesso em: 30 de janeiro de 2023.

SILVA, R. L. da; OLIVI, J. B.; SILVA, A. M. P. da. Corn harvest residues for co-generation assessment: availability at Mato Grosso do Sul State, and energy characteristics. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente - RAMA**, v. 15, n. 1, 2022. ISSN 2176-9168. Disponível em: DOI:10.17765/2176-9168:2022v15n1e8635.

SILVEIRA, E. A. **Caracterização dos fluxos energéticos e gases de efeito estufa em instalações “offshore”**. 2015. 135 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) — Universidade de Brasília.

SOKA, O.; OYEKOLA, O. A feasibility assessment of the production of char using the slow pyrolysis process. **Heliyon**, Elsevier Ltd, v. 6, 2020. ISSN 2405-8440. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04346>.

UBANDO, A. T. *et al.* A comprehensive review of life cycle assessment (LCA) of microalgal and lignocellulosic bioenergy products from thermochemical processes. **Bioresource Technology**, v. 291, 2019. ISSN 0960-8524/. Acesso em: 30/01/2023.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Produção Agrícola Mundial**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home>. Acesso em: 15 Jan. 2023.

VALE, A. T. do; DANTAS, V. F. de S.; ZAMBRZYCKI, G. C. Potencial Energético dos resíduos da cultura do milho (*Zea mays*). **Evidência**, v. 13, n. 2, p.

153 – 164, 2013. ISSN2236-6059.

VALENTE, A.; IRIBARREN, D.; DUFOUR, J. Life cycle sustainability assessment of hydrogen from biomass gasification: A comparison with conventional hydrogen. **HydrogenEnergy**, Elsevier Ltd, v. 44, p. 21193 – 21203, Fevereiro 2019. ISSN 0360-3199. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.105>.

VAZ JÚNIOR, S. Aproveitamento de resíduos agroindustriais. **Documentos 31 EmbrapaAgroenergia**, Brasília, DF, Agosto 2020. ISSN 2177-4439.

VEZA, I. *et al.* Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: Review of RSM for sustainability energy transition.

VIEIRA JÚNIOR, C. M. *et al.* Produção e análise do Syngas a partir do sabugo de milho. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 33116 – 33123, junho 2020. ISSN 2525-8761. Disponível em: DOI:10.34117/bjdv6n6-023.

ZANG, G. *et al.* Life cycle assessment of power-generation systems based on biomass integrated gasification combined cycles. **Renewable Energy**, v. 149, p. 336 – 346, 2020. ISSN 0960-1481.

ZHOU, X. *et al.* Production of ethanol from corn straw based on chemical looping gasification: Economic analysis. **Bioresource Technology**, v. 360, 2022. ISSN 0960-8524.