



**HIBRIDIZAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA
COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA**

FERNANDA COUTO COSTA

**PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**HIBRIDIZAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA
COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA**

FERNANDA COUTO COSTA

Orientador: PROF. DR. EDGAR AMARAL SILVEIRA, ENM/UNB

PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**PUBLICAÇÃO ENM.PG - XXX/AAAA
BRASÍLIA-DF, 10 DE NOVEMBRO DE 2021.**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**HIBRIDIZAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA
COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA**

FERNANDA COUTO COSTA

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Edgar Amaral Silveira, ENM/UnB
Orientador

Prof. Dr. Armando de Azevedo Caldeira Pires, ENM/UnB
Examinador interno

Prof. Dr. Carlos Alberto Gurgel Veras, ENM/UnB
Examinador interno

BRASÍLIA, 10 DE NOVEMBRO DE 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

FERNANDA COUTO COSTA

HIBRIDIZAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA

2021xv, 88p., 201x297 mm

(ENM/FT/UnB, Engenheiro Mecânico, Engenharia Mecânica, 2021)

Projeto de Graduação - Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERNANDA COUTO COSTA (2021) HIBRIDIZAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Publicação xxx/AAAA, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: FERNANDA COUTO COSTA

TÍTULO: HIBRIDIZAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA.

GRAU: Engenheiro Mecânico ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste projeto de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor se reserva a outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

FERNANDA COUTO COSTA

fcoutocosta16@gmail.com

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter sido minha rocha e ter me capacitado em todas as etapas. Agradeço à minha família pelo incentivo e confiança, especialmente meus pais, Fernando e Shirley, que sempre me amaram, apoiaram e forneceram as condições necessárias para que eu me dedicasse plenamente aos estudos. Sou grata pelos meus amigos do Bruxaria (Roger, Bob, Hansen, Shun, Enzin e Ismael), que se mantiveram ao meu lado todos esses anos estudando comigo, me ajudando e fazendo links infinitos. Agradeço a paciência e amor das minhas amigas (Nico, Vivi, Cadi, Gi, Bela, Fe, Guilha e Let) que mesmo eu sumindo ocasionalmente elas sempre estão comigo. Agradeço a todas as pessoas que cruzaram meu caminho nesses últimos anos e marcaram minha vida. Por último, agradeço toda a dedicação do meu orientador, Edgar, que esteve presente em todos os processos, me motivando e fornecendo os meios necessários para que o projeto fosse concluído.

Resumo

O aumento da produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) e seu descarte indevido causam problemas ambientais. Como uma forma de lidar com os problemas decorrentes da sobrecarga de aterros sanitários e da crescente demanda por energia, novas tecnologias, chamadas de Waste-to-energy, que são capazes de converter resíduos em energia, têm ganhado mais espaço. Portanto, resíduos lignocelulósicos e RSU têm se tornado uma fonte de energia atrativa devido sua disponibilidade, baixo custo e por serem potenciais substitutos de fontes fósseis. O presente trabalho é um estudo de caso da cidade de Brasília (DF) que objetiva realizar a análise energética de um biocombustível híbrido formado por resíduos sólidos do Aterro Sanitário da Estrutural, juntamente com resíduos lignocelulósicos provenientes da poda das 6 árvores mais representativas do Distrito Federal. Para a análise foi produzido um RSU sintético baseado nos principais componentes do aterro, que são papel e papelão, plástico e resíduos orgânicos. Em seguida, foi estabelecido o *blend* de resíduos lignocelulósicos de acordo com as proporções baseadas na quantidade de cada espécie e seus chamados para poda no DF. A fim de obter um combustível de qualidade, os componentes individuais da biomassa, assim como o seu *blend*, foram submetidos ao pré-tratamento de torrefação (225, 250 e 275°C por 60 minutos com taxa de aquecimento de 5°C.min⁻¹), visando aprimorar suas características como teor de umidade, teor de carbono fixo e poder calorífico. O *blend* híbrido foi confeccionado seguindo proporções determinadas, 80/20% e 70/30% (biomassa/RSU). As amostras foram caracterizadas por meio da análise elementar e de poder calorífico. Após a caracterização, deu-se início à gaseificação que consta com três atmosferas (ar, vapor/ar = 0,25, vapor/ar = 0,5) e variação de temperatura de 600-1000°C. Para avaliar a composição do gás síntese, seu poder calorífico inferior (PCI) e sua eficiência de gás frio (CGE), para as diversas condições, foi utilizado a decisão de análise multi-critérios. Os resultados obtidos mostram que i) as amostras de poda torrefadas à 275°C apresentaram melhores características entre as amostras lignocelulósicas; ii) o *blend* híbrido apresentou um poder calorífico intermediário entre o RSU sintético e o *blend* lignocelulósico, sendo que o híbrido com maior PCS foi o torrefado 80/20; iii) as amostras torrefadas apresentam maiores valores de PCI e CGE durante a gaseificação; iv) a produção de H₂ é mais favorecida com as amostras in natura na atmosfera com vapor; e v) para queima direta do gás síntese, as amostras torrefadas na atmosfera a ar são mais vantajosas.

Palavras-chaves: Resíduos sólidos urbanos, Torrefação, Biomassa, Gaseificação, Waste-to-energy.

Abstract

The increasing production of municipal solid waste (MSW) and its improper disposal cause environmental problems. As a way of dealing with landfill overload and still encompassing the growing demand for energy in cities, new technologies, called Waste-to-Energy (WtE) technologies, which are able to convert waste into energy, are gaining more space. Therefore, lignocellulosic residues and MSW have become an attractive energy source due to their availability, low cost, and because they are categorized as a sustainable energy that can substitute fossil fuels. The present work is a case study of the city of Brasilia (DF) that aims to perform the energy analysis of a hybrid biofuel formed by MSW from Brasilia's Landfill, together with lignocellulosic residues from the pruning of the 6 most common trees in the Federal District. For the analysis a synthetic MSW was produced based on the main components of the landfill, which are paper and cardboard, plastic and organic residues. Then the lignocellulosic blend was established according to the proportions based on the amount of each species and their calls for pruning in DF. In order to obtain a quality fuel, the individual components of the biomass, as well as its blend, were subjected to torrefaction pretreatment (225, 250 and 275°C for 60 minutes at a heating rate of 5°C.min⁻¹), aiming to improve its characteristics such as moisture content, fixed carbon content and heating value. The hybrid *blend* was made following determined proportions, 80/20% and 70/30% (biomass/MSW). The samples were characterized by ultimate analysis and calorific analysis. After characterization, gasification was performed and consisted of three atmospheres (air, steam/air = 0.25, steam/air = 0.5) and a temperature range of 600-1000°C. To evaluate the synthesis gas composition, its low heating value (LHV) and its cold gas efficiency (CGE), for the various conditions, the multi-criteria analysis decision was used. The results obtained show that i) the torrefied lignocellulosic blend at 275°C showed better characteristics among the lignocellulosic samples; ii) the hybrid blend showed an intermediate heating value between the synthetic MSW and the lignocellulosic blend, and the hybrid with the highest LHV was the 80/20 torrefied one; iii) the torrefied samples exhibit higher values of LHV and CGE during gasification; iv) the production of H_2 is more advantageous with the raw samples in the atmosphere with steam; and v) for direct combustion of the synthesis gas, the torrefied samples in the atmosphere with air are more advantageous.

Key-Words: Municipal Solid Waste, Torrefaction, Biomass, Gasification, Waste-to-energy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2	APLICAÇÕES.....	2
1.3	OBJETIVOS.....	3
1.4	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	3
1.4.1	TRABALHOS RELEVANTES NO CONTEXTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	6
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	8
2.1.1	COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	9
2.1.2	PROPRIEDADES DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	10
2.1.3	COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS E COMBUSTÍVEL SÓLIDO RECUPERADO	10
2.2	BIOMASSA	12
2.2.1	COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA	12
2.2.2	PROPRIEDADES DA BIOMASSA	14
2.3	VIAS DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA	15
2.3.1	PIRÓLISE	15
2.3.2	TORREFAÇÃO	16
2.3.3	GASEIFICAÇÃO	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	BLENDS DE BIOMASSA.....	22
3.1.1	PREPARO DAS AMOSTRAS	23
3.1.2	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	24
3.2	BLEND SINTÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	24
3.2.1	PREPARO DAS AMOSTRAS	25
3.2.2	CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA	25
3.2.3	BIOCOMBUSTÍVEL HÍBRIDO	25
3.3	ENSAIO DE TORREFAÇÃO	27
3.4	ANÁLISE QUÍMICA.....	28

3.4.1	ANÁLISE IMEDIATA.....	28
3.4.2	TEOR DE MATERIAL VOLÁTIL	28
3.4.3	TEOR DE CINZAS	29
3.4.4	TEOR DE CARBONO FIXO	29
3.4.5	PODER CALORÍFICO	29
3.4.6	ANÁLISE ELEMENTAR	30
3.5	GASEIFICAÇÃO	30
3.6	ANÁLISE DE CRITÉRIOS	31
3.6.1	ANÁLISE DE DOMINÂNCIA	32
3.6.2	DISTÂNCIA MÉTRICA	32
4	RESULTADOS.....	34
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	34
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA.....	34
4.1.2	TORREFAÇÃO DA BIOMASSA	35
4.1.3	CARACTERIZAÇÃO DO RSU	35
4.2	BLENDS	36
4.2.1	BLEND DE RSU	36
4.2.2	BLEND HÍBRIDO	37
4.2.3	PODER CALORÍFICO SUPERIOR	38
4.2.4	ANÁLISE ELEMENTAR	38
4.3	GASEIFICAÇÃO	40
4.3.1	BALANÇO ENERGÉTICO	44
4.4	ANÁLISE DE CRITÉRIOS	44
5	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
	ANEXOS.....	65
I	BALANÇO ENERGÉTICO	66
II	RESULTADOS DA GASEIFICAÇÃO	68
III	ANÁLISE DE CRITÉRIOS.....	70

LISTA DE FIGURAS

1.1	Rede de autores dentro da temática	4
1.2	Mapa de calor com as principais palavras-chaves	5
1.3	Referências mais citadas nos artigos escolhidos	5
1.4	Evolução do número de publicações ao longo dos anos sobre (a) gaseificação, biomassa e RSU e (b) gaseificação, torrefação, biomassa e RSU.....	6
2.1	Esquema da variação de propriedades da biomassa submetida à torrefação. Adaptado de [Chen et al. 2015].....	18
3.1	Fluxograma da metodologia adotada no trabalho.....	23
3.2	Blend de resíduos lignocelulósicos [Santanna et al. 2020].	24
3.3	Compostos do RSU antes e depois da primeira moagem. Papelão, plástico PE, composto orgânico e revista, respectivamente	26
3.4	Equipamento de fabricação de <i>pellets</i>	27
3.5	Exemplificação do modelo de gaseificação para as amostras in natura a 600°C.	31
3.6	(a) Efeito da dominância, e (b) distância métrica [Ferreira et al. 2021].	33
4.1	Biocombustível híbrido de biomassa in natura e RSU.....	37
4.2	Biocombustível híbrido de biomassa torrefada e RSU.	37
4.3	Análise calorífica para o RSU e <i>blends</i> lignocelulósicos e híbridos.....	38
4.4	Porcentagem de (a) CO (b) H ₂ e (c) CO ₂ do syngas das amostras in natura em função da temperatura de gaseificação para as três atmosferas diferentes. ..	41
4.5	Porcentagem de (a) CO (b) H ₂ e (c) CO ₂ do syngas das amostras torrefadas em função da temperatura de gaseificação para as três atmosferas diferentes. ..	42
4.6	Razão de (a) H ₂ /CO, valor de (b) PCI e (c) CGE do syngas das amostras in natura em função da temperatura de gaseificação para as três atmosferas diferentes.	43
4.7	Razão de (a) H ₂ /CO, valor de (b) PCI e (c) CGE do syngas das amostras torrefadas em função da temperatura de gaseificação para as três atmosferas diferentes.	43

LISTA DE TABELAS

1.1	Palavras-chaves usadas para a busca de artigos.	4
1.2	Resultados obtidos a partir do VosViewer.	4
1.3	Composição sintética de RSU.....	7
3.1	Resíduos lignocelulósicos urbanos entre 2015-2020 (PODA).....	24
3.2	Composição média geral dos resíduos que ingressam no Aterro Sanitário de Brasília (PDGIRS, 2019).....	26
3.3	Parâmetros dos ensaios de torrefação.....	27
4.1	Resultados das análises imediata e calorífica da matéria-prima bruta e do <i>Blend</i> [Santanna et al. 2020].....	34
4.2	Principais características dos <i>blends</i> de biomassa torrefada e in natura.	35
4.3	Análise gravimétrica do RSU peneirado e seco.....	36
4.4	Análise imediata do RSU peneirado e seco [Lisboa 2016].....	36
4.5	Composição do RSU sintético.....	36
4.6	Proporções usadas para o biocombustível híbrido.....	37
4.7	Análise elementar para os componentes do <i>blend</i> lignocelulósico (%).	39
4.8	Análise elementar para o <i>blend</i> lignocelulósico (%).	39
4.9	Análise elementar para os componentes do RSU (%).	39
4.10	Análise elementar para as amostras de blend híbrido (%).	40
4.11	Análise de critérios das condições 1 e 2 para as amostras in natura com agente gaseificante ar.	45
4.12	Análise de critérios das condições 1 e 2 para as amostras torrefadas com agente gaseificante ar.	46
4.13	Análise de critérios das condições 1 e 2 comparando as amostras in natura e torrefadas com agente gaseificante ar.	47
4.14	Análise de critérios das condições 1 e 2 para as amostras in natura com agente gaseificante vapor/ar = 0,25.....	48
4.15	Análise de critérios das condições 1 e 2 para as amostras torrefadas com agente gaseificante vapor/ar = 0,25.....	48
4.16	Análise de critérios das condições 1 e 2 comparando as amostras in natura e torrefadas com agente gaseificante vapor/ar = 0,25.	49
4.17	Análise de critérios das condições 1 e 2 para as amostras in natura com agente gaseificante vapor/ar = 0,50.....	50

4.18	Análise de critérios das condições 1 e 2 para as amostras torrefadas com agente gaseificante vapor/ar = 0,50.....	50
4.19	Análise de critérios das condições 1 e 2 comparando as amostras in natura e torrefadas com agente gaseificante vapor/ar = 0,50.	51
4.20	Análise de critérios das condições 1 e 2 comparando todas as amostras in natura.	52
4.21	Análise de critérios das condições 1 e 2 comparando todas as amostras torrefadas.....	53
4.22	Análise de critérios das condições 1 e 2 comparando todas as amostras e condições.	54
I.1	Balanco energético da gaseificação com agente gaseificante ar.	66
I.2	Balanco energético da gaseificação com agente gaseificante vapor/ar = 0,25....	67
I.3	Balanco energético da gaseificação com agente gaseificante vapor/ar = 0,50....	67
II.1	Resultado da gaseificação das amostras in natura na atmosfera com ar.	68
II.2	Resultado da gaseificação das amostras torrefadas na atmosfera com ar.....	68
II.3	Resultado da gaseificação das amostras in natura na atmosfera com vapor/ar = 0,25.....	68
II.4	Resultado da gaseificação das amostras torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,25.....	69
II.5	Resultado da gaseificação das amostras in natura na atmosfera com vapor/ar = 0,50.....	69
II.6	Resultado da gaseificação das amostras torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,50.....	69
III.1	Análise multi-critérios das amostras in natura na atmosfera com ar para a condição 1.	70
III.2	Análise multi-critérios das amostras in natura na atmosfera com ar para a condição 2.	70
III.3	Análise multi-critérios para as amostras torrefadas na atmosfera com ar para a condição 1.....	71
III.4	Análise multi-critérios para as amostras torrefadas na atmosfera com ar para a condição 2.....	71
III.5	Análise multi-critérios para as amostras in natura e torrefadas na atmosfera com ar para a condição 1.	72
III.6	Análise multi-critérios para as amostras in natura e torrefadas na atmosfera com ar para a condição 2.	73
III.7	Análise multi-critérios para as amostras in natura na atmosfera com vapor/ar = 0,25 para a condição 1.	74
III.8	Análise multi-critérios para as amostras in natura na atmosfera com vapor/ar = 0,25 para a condição 2.	74

III.9	Análise multi-critérios para as amostras torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,25 para a condição 1.	75
III.10	Análise multi-critérios para as amostras torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,25 para a condição 2.	75
III.11	Análise multi-critérios para as amostras in natura e torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,25 para a condição 1.	76
III.12	Análise multi-critérios para as amostras in natura e torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,25 para a condição 2.	77
III.13	Análise multi-critérios para as amostras in natura na atmosfera com vapor/ar = 0,50 para a condição 1.	77
III.14	Análise multi-critérios para as amostras in natura na atmosfera com vapor/ar = 0,50 para a condição 2.	78
III.15	Análise multi-critérios para as amostras torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,50 para a condição 1.	78
III.16	Análise multi-critérios para as amostras torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,50 para a condição 2.	79
III.17	Análise multi-critérios para as amostras in natura e torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,50 para a condição 1.	79
III.18	Análise multi-critérios para as amostras in natura e torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,50 para a condição 2.	80
III.19	Análise multi-critérios para as amostras in natura em todas as atmosferas para a condição 1.	81
III.20	Análise multi-critérios para as amostras in natura em todas as atmosferas para a condição 2.	82
III.21	Análise multi-critérios para as amostras torrefadas em todas as atmosferas para a condição 1.	83
III.22	Análise multi-critérios para as amostras torrefadas em todas as atmosferas para a condição 2.	84
III.23	Parte 1: Análise multi-critérios para todas as amostras em todas as atmosferas para a condição 1.	85
III.24	Parte 2: Análise multi-critérios para todas as amostras em todas as atmosferas para a condição 1.	86
III.25	Parte 1: Análise multi-critérios para todas as amostras em todas as atmosferas para a condição 2.	87
III.26	Parte 2: Análise multi-critérios para todas as amostras em todas as atmosferas para a condição 2.	88

Capítulo 1

Introdução

1.1 Caracterização do problema

O aumento da demanda de energia levou à diminuição drástica das reservas de combustíveis fósseis, além de problemas ambientais como poluição e emissão de gases do efeito estufa [Chen et al. 2015]. Dessa forma, com o objetivo de diminuir o uso de produtos como carvão e gás natural, formas mais sustentáveis de produzir energia são estudadas e desenvolvidas, as chamadas tecnologias *Waste-to-energy*.

Waste-to-energy são meios usados para a recuperação energética de resíduos por meio de processos de conversão termoquímicos como a pirólise e a gaseificação ou processos bioquímicos [Chen and Kuo 2010]. Essas tecnologias têm se tornado uma alternativa atraente para resolver não só os problemas relacionados à alta demanda por energia, mas também aborda outras questões como a mitigação de resíduos nos centros urbanos, problema que tem sido amplamente abordado na atualidade [Vamvuka et al. 2020].

O aumento da quantidade desses resíduos nas cidades tem provocado uma crescente preocupação pública quanto ao impacto na saúde e no meio ambiente. Os problemas decorrentes de aterros são emissão de gases de efeito estufa através do descarte inadequado de resíduos e problemas de espaço que poderiam ser destinados para outros fins [Xue et al. 2015]. Para isso, os resíduos podem ser usados como combustíveis alternativos e vêm sendo estudados como forma de diversificação da matriz energética, por serem baratos e de fácil acesso e em grandes quantidades [Vamvuka et al. 2020].

Outra fonte de energia usada como alternativa energética aos combustíveis fósseis é o biocombustível derivado da conversão termoquímica da biomassa. Biomassa é considerada uma fonte renovável que apresenta saldo nulo de carbono emitido [Chen et al. 2015]. Assim como os resíduos sólidos urbanos, a biomassa possui fácil acessibilidade, baixo preço e alta disponibilidade. O produto da conversão da biomassa é caracterizado de acordo com as características de seus principais componentes e é influenciado, também, por sua origem, umidade, tamanho da partícula e as condições de operação [Chen et al. 2015, S. et al. 2020].

A biomassa no geral é caracterizada por baixa densidade, alto teor de umidade, alto teor de oxigênio, baixo calor específico e natureza higroscópica [Chen et al. 2015], essas características fornecem dificuldades nos processos de conversão. O produto gerado pela conversão da biomassa in natura é um biocombustível não muito atrativo por seu baixo potencial energético, além de apresentar maiores gastos relacionados aos processos de produção e à logística de transporte e armazenamento [Chen et al. 2015]. Como forma de contornar os problemas, há alguns pré-tratamentos, como a torrefação, que podem aperfeiçoar as propriedades da biomassa e, por consequência, do biocombustível formado [Nhuchhen et al. 2020].

Devido as características desvantajosas da biomassa há a necessidade do processo de torrefação. A torrefação é considerada como uma pirólise leve e é responsável por diminuir a umidade, voláteis e aumentar o poder calorífico das amostras que serão posteriormente submetidas à gaseificação [Chen et al. 2015]. A torrefação melhora a reatividade do biocombustível [Li and Chen 2018] e altera a composição do gás produzido a partir da gaseificação, resultando em maiores valores de poder calorífico e maior rendimento de gás.

A biomassa e os resíduos sólidos urbanos podem ser convertidos em energia através da gaseificação. A gaseificação é a oxidação parcial de um combustível sólido ou líquido que é convertido em gás síntese (syngas) [Basu 2013]. O produto final da gaseificação é muito versátil e pode ser usado para a produção de calor, energia, produção de hidrogênio ou fabricação de produtos químicos [Ku et al. 2017, Balat and Kırtay 2010]. Os parâmetros de gaseificação, que são determinantes na qualidade e rendimento do gás produzido, são a temperatura, o tempo de residência e o agente gaseificante.

1.2 Aplicações

O elevado crescimento populacional da cidade de Brasília ao longo dos últimos anos [Adasa 2010], acarretou ao mesmo tempo, na maior produção de resíduos e no aumento da demanda por energia. Os resíduos produzidos são despejados no Aterro Sanitário da Estrutural de forma inadequada, o que impede uma boa gestão dos resíduos sólidos urbanos e gera impactos fortes ao meio ambiente [Adasa 2010].

O presente trabalho torna-se importante nesse contexto, uma vez que apresenta uma forma de remediação ambiental da área degradada do aterro e, por consequência, torna possível a realização da gestão dos resíduos sólidos, como previsto na Política Nacional de Resíduos Sólidos [Brasil 2010], permitindo, assim, a preservação dos recursos naturais, a redução do uso da energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Adicionalmente, o biocombustível proposto possui uma vertente sustentável e pode ser utilizado como parte da matriz energética brasileira.

Este trabalho é fruto de uma parceria entre o Laboratório de Energia e Ambiente (EN-MUNB), Laboratório de Produtos Florestais (LPF-SFB) e está vinculado, também, ao projeto P&D RAEESA.

1.3 Objetivos

O presente trabalho é um estudo de caso que tem por finalidade a confecção e análise energética de um biocombustível híbrido composto por resíduos lignocelulósicos provenientes da poda das árvores mais comuns do Distrito Federal, em conjunto com resíduos sólidos urbanos procedentes do Aterro Controlado do Jockey Clube (Lixão da Estrutural - Brasília - DF). A hibridização desses dois combustíveis visa a remediação ambiental de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos e o aproveitamento energético dos resíduos de poda.

Para esse fim, é necessário realizar a coleta e o tratamento individual dos dois resíduos. Os ensaios de análise elementar, imediata e poder calorífico são utilizados para a caracterização de cada componente que será posteriormente combinado na busca de uma proporção ideal entre RSU e poda.

A fim de simular um processo de conversão termoquímica as amostras de poda e os híbridos são submetidos ao processo de gaseificação, utilizando um modelo de equilíbrio termoquímico formulado no EES [Fock et al. 2000], para ser analisado a composição do gás de síntese avaliando o poder calorífico, eficiência de gás frio e a razão H_2/CO , que são fatores determinantes para caracterizar a qualidade e rendimento do gás. É avaliado, também, o efeito da torrefação e da composição da biomassa, a variação de parâmetros de operação como temperatura e agente gaseificante.

1.4 Análise Bibliométrica

Tendo em vista a formação do referencial bibliográfico da presente pesquisa foi realizada uma análise Sistêmica da Literatura empregando o método Knowledge Development Process – Constructivist (Proknow-C) [Waiczuk and Ensslin 2013]. A seleção e busca do referencial bibliográfico com reconhecimento científico e artigos alinhados com o tema da pesquisa foi conduzida através da ferramenta de pesquisa Web of Science (Clarivate Analytics). A partir do software VosViewer foi possível realizar uma análise quantitativa, para assim, obter as relações das principais palavras-chaves, autores, co-citações, principais países de publicação e o crescimento do interesse pelo assunto ao longo dos anos.

A escolha de palavras-chaves foi feita em duas etapas, como pode ser visto na Tabela 1.1. A primeira pesquisa foi feita usando palavras mais abrangentes com o intuito de adquirir um maior número de artigos. A segunda busca foi feita por meio de palavras mais específicas objetivando direcionar a busca para o tema central da pesquisa.

Tabela 1.1: Palavras-chaves usadas para a busca de artigos.

Palavras-chaves	
Primeira busca	Segunda busca
biomass + residues + torref*	biomassa AND municipal solid waste + pyrolysis + torref*
biomass + torref* + TGA	biomass + bioenergy + municipal solid waste + torref*
residues + energy + torref*	municipal solid waste + biomass + energy + torref*
biomass + residues + pellet* and properties	biomass + solid waste management + torref*
solid waste + torref* + properties	biomass + urban residues + TGA
	biomass + municipal solid waste + pellet* + torref*

O resultado das duas buscas retornou um total de 1607 artigos, que ao serem avaliados com a aplicação do método do Proknow-C foram reduzidos para 84, que são os artigos que fazem parte do referencial bibliográfico dessa pesquisa. A análise quantitativa desses permitiu a extração das informações referentes aos autores com maior número de ocorrências, as principais palavras-chaves e principais países de publicação, que podem ser vistos na Tabela 1.2.

Tabela 1.2: Resultados obtidos a partir do VosViewer.

Autores	Documentos	Citações	Palavras-Chaves	Ocorrência	Países	Documentos	Citações
Chen, WH	6	1205	<i>Torrefaction</i>	44	Canadá	13	837
Pasek, AD	4	22	<i>Biomass</i>	33	Estados Unidos	12	992
Prawisudha, P	4	22	<i>Pyrolysis</i>	25	China	8	294
Wang, L	3	182	<i>Municipal Solid Waste</i>	20	Taiwan	7	1212
Bialowiec, A	3	43	<i>Wood</i>	15	Índia	6	120

Na Figura 1.1 é possível ver a principal rede de autores que mais publicaram pesquisas relacionadas com as palavras-chaves selecionadas, sendo o autor com o maior número de artigos o Wei-Hsin Chen.

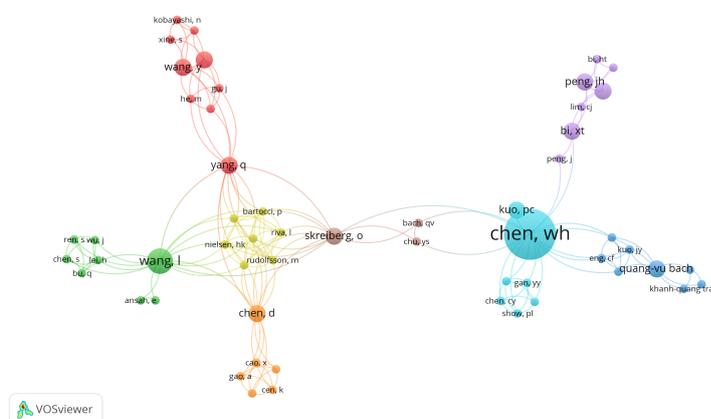


Figura 1.1: Rede de autores dentro da temática

A partir do VosViewer foi possível obter a relação das palavras-chaves mais ocorrentes nos artigos selecionados. A palavra com maior ocorrência segundo o mapa de calor representado na Figura 1.2 foi *torrefaction* e em segundo lugar *biomass*.

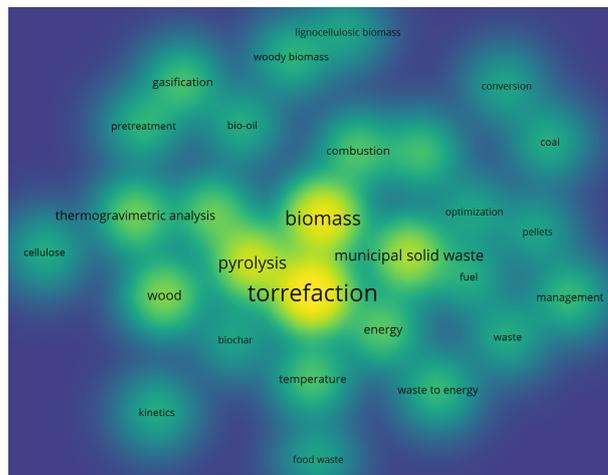


Figura 1.2: Mapa de calor com as principais palavras-chaves

As co-citações, que são as principais referências citadas pelos artigos escolhidos, podem ser visualizadas na Figura 1.3.

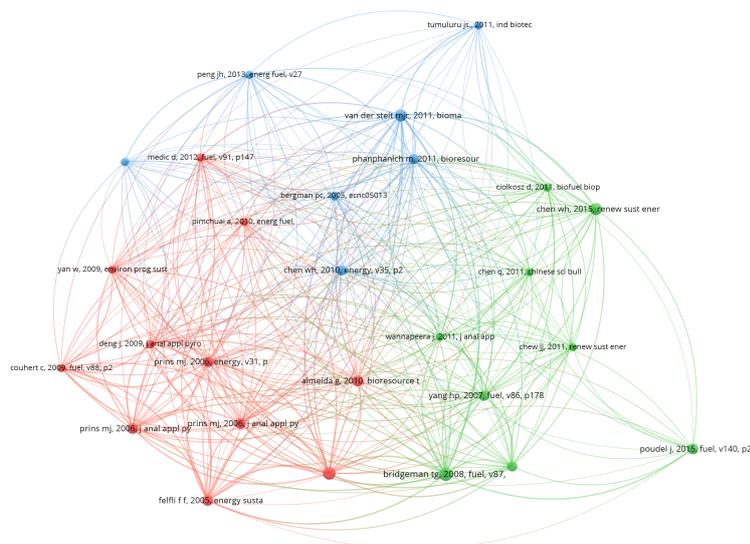


Figura 1.3: Referências mais citadas nos artigos escolhidos

A segunda etapa da análise bibliométrica deu-se com a busca de palavras-chaves específicas para obter a evolução das publicações a cerca do assunto ao longo dos anos. É possível ver o aumento do interesse ao longo de 20 anos sobre gaseificação de biomassa e RSU (Figura 1.4a). No entanto, quando é considerado a combinação do processo de gaseificação com o pré-tratamento de torrefação a quantidade de publicações é consideravelmente menor (Figura 1.4b), apesar disso ainda assim é possível notar o crescimento ao longo dos anos.

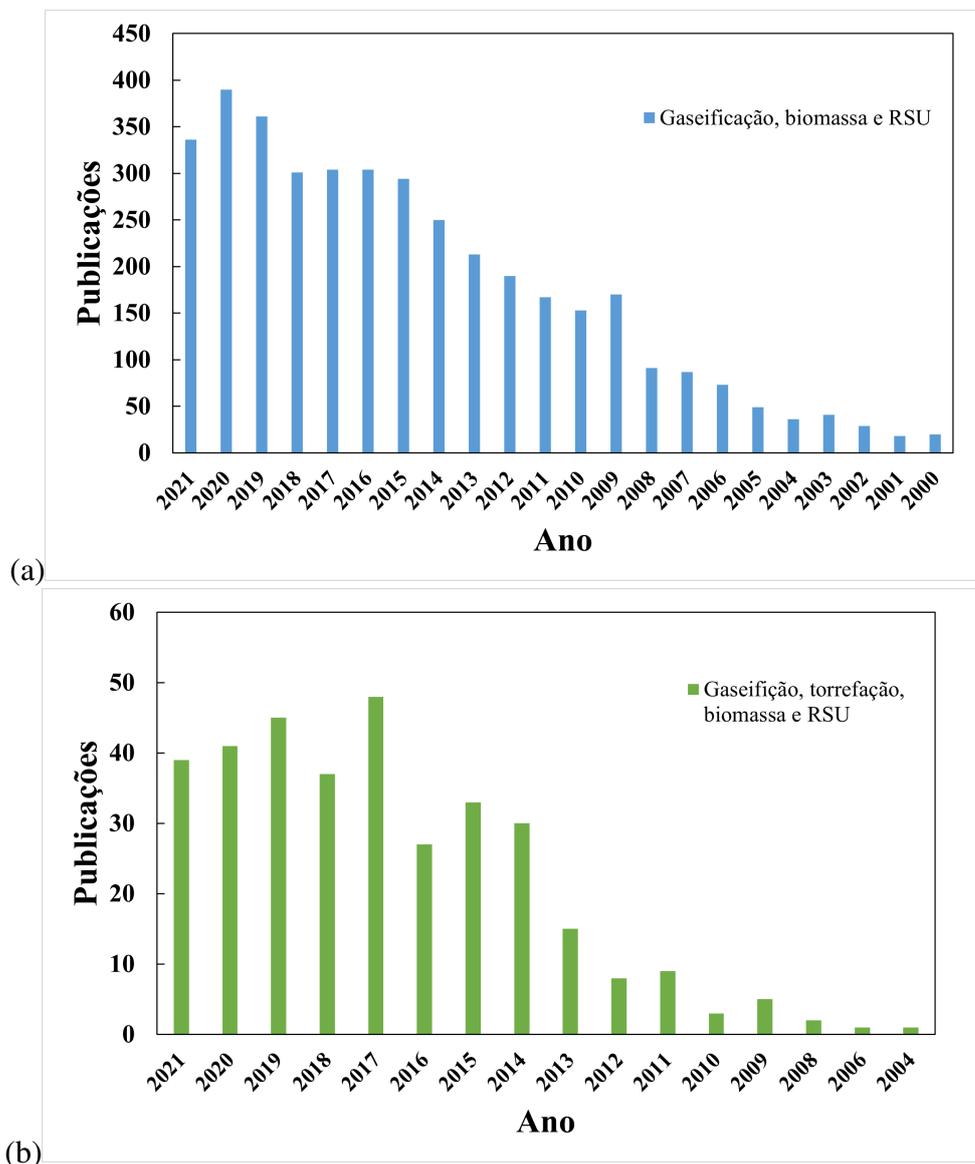


Figura 1.4: Evolução do número de publicações ao longo dos anos sobre (a) gaseificação, biomassa e RSU e (b) gaseificação, torrefação, biomassa e RSU.

1.4.1 Trabalhos relevantes no contexto de resíduos sólidos urbanos

Foram selecionados alguns trabalhos provenientes do estudo bibliométrico a fim de servir de base para a decisão da composição do RSU e do *blend* híbrido. Vários artigos que estão disponíveis fazem a mistura de biomassa e resíduos sólidos para fins energéticos, assim como outros especificam a composição do RSU. A Tabela 1.3 apresenta algumas proporções referentes à composição básica do RSU.

Outro trabalho que demonstra diferentes exemplos de composição de resíduos sólidos é o de [Gerassimidou et al. 2020]. Nesse artigo ele realiza uma revisão de diferentes trabalhos que confeccionam RSU sintético. As amostras que ele apresenta não possuem a porção de resíduos orgânicos e são caracterizadas como combustíveis derivados de resíduos (CDR).

Tabela 1.3: Composição sintética de RSU

Composição do RSU		
Composição	Proporção	Referência
Papel, resto de comida, plástico, borracha e tecido	Seguem a proporção real do RSU	[Zheng et al. 2009]
Papel e papelão, madeira, plástico, resíduos orgânicos, tecido	Seguem a proporção real do RSU	[Rasanjani et al. 2019]
Restos de folhas (RF), restos de alimentos (RA), resíduos vegetais (RV), resto de frutas (RFr), plástico (P)	Segue a proporção do RSU real; RF: 34,67%; RA: 23,330%; RV: 14,33%; RFr: 11%; P: 16,67%	[Triyono et al. 2019]
Resíduos orgânicos (RO) e plástico (P)	Segue a proporção do RSU real; RO: 78%; P: 22%	[Mu'min et al. 2017]

O trabalho mais relevante para a escolha da composição do *blend* híbrido foi o de [Hameed et al. 2021]. Nessa pesquisa é feita uma revisão sobre misturas de biomassas diferentes e resíduos sólidos urbanos em diversas proporções.

1.5 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema de estudo, abordando os principais conceitos que envolvem resíduos lignocelulósicos, resíduos sólidos urbanos e as vias de conversão termoquímica. Em seguida, o capítulo 3 descreve a metodologia desenvolvida para alcançar os resultados do trabalho. Resultados experimentais e suas análises são discutidos no capítulo 4. Por fim, as conclusões estão dispostas no capítulo 5 e, em seguida, os Anexos com o detalhamento das tabelas usadas nos resultados.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A Lei nº 12.305/2010, baseada na norma técnica da ABNT de 1987, define Resíduo Sólido como: “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” [Brasil 2010].

A classificação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é apresentada na NBR 10004:2004. Segundo essa classificação os resíduos são categorizados de acordo com sua origem, características e constituintes. Nessa norma, os resíduos são definidos, também, de acordo com seu nível de periculosidade sendo esses: perigosos, não perigosos, não inertes e inertes. A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente são conhecidos.

Estima-se que no Brasil são descartados indevidamente cerca de 80 milhões de toneladas de resíduos, o que corresponde a mais de 40% do total de resíduos coletados, segundo o Plano Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos [Adasa 2010]. Com o crescente aumento da população ao longo dos anos, maior será o volume de resíduos descartados em aterros sanitários e maiores serão os problemas ambientais causados por esses resíduos. À vista disso, o manejo correto de resíduos sólidos urbanos é um dos maiores desafios da atualidade. Sendo assim, procurar formas que sejam ambientalmente seguras, com um bom custo-benefício e aceitas socialmente são um desafio [Stehlík 2009].

Um dos fins mais comuns para o RSU são os aterros sanitários, no entanto por questões ambientais como poluição e emissão de gases agravantes do efeito estufa, outras formas são pensadas para substituí-los, como no caso de processos que possibilitam o retorno de ener-

gia, as chamadas tecnologias *Waste-to-energy* (WtE) [Stehlík 2009]. *Waste-to-energy* é um termo que se refere a um grupo de tecnologias que têm por objetivo a recuperação energética na forma de calor, eletricidade ou combustíveis alternativos. Dentre essas tecnologias encontram-se a pirólise e a gaseificação, incineração, coprocessamento e digestão anaeróbica [GIZ 2017].

Waste-to-energy mostra-se como uma alternativa promissora, uma vez que aborda tanto o problema do lixo nos centros urbanos ao reciclar e tratar os resíduos como, também, a crescente demanda por energia [Stępień and Białowiec 2018]. No entanto, mesmo se mostrando como uma boa possibilidade, há diversos fatores a serem considerados ao converter resíduos em energia como as alterações sazonais na composição dos resíduos, pouca segregação de resíduos na fonte, composição heterogênea do RSU com a presença de plástico e lixo orgânico [GIZ 2017]. Por essas razões o processo de conversão energética do RSU tem comportamentos variados.

O trabalho de [Silva-Martínez et al. 2020] é um estado da arte acerca de tecnologias *Waste-to-energy* na América Latina e no Caribe. É feita uma revisão sobre trabalhos como o de [Mohee et al. 2015] que mostra que a empresa *WastAway*, em Aruba, patenteou uma tecnologia para a conversão de resíduos sólidos num subproduto que é posteriormente gaseificado para a produção de vapor e eletricidade. Já em [García et al. 2017], na Colômbia, é falado sobre como a gaseificação é o melhor cenário técnico para a produção de hidrogênio, juntamente com o etanol e a eletricidade. Em países como a República Dominicana ou Cuba a principal tecnologia WtE utilizada é a combustão que é praticada para produzir energia a partir de resíduos orgânicos, tais como palha e bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, casca de café e lenha [Bruzos-Bonzon and Mirabent-Avila 2005].

2.1.1 Composição dos resíduos sólidos urbanos

Com a leitura extensiva de artigos relacionados com o tema de resíduos sólidos urbanos foi possível notar que sua composição depende de fatores como região e época do ano. No entanto, ainda constata-se semelhanças entre diversos resíduos de diferentes locais. A composição geral, por assim dizer, é formada por variadas proporções de: restos orgânicos e restos de jardins, papéis e papelão, madeira, algodão, couro, materiais de origem fóssil como borrachas e plásticos diversos, também há a presença de materiais metálicos, vidros e alumínios [Cheng and Hu 2010]. São excluídos dessa composição os materiais que são classificados como perigosos segundo a NBR 10004:2004.

A partir da pesquisa realizada por [Ansah et al. 2016] ao analisar o RSU, mostra que sua maior parcela é de material orgânico, cerca de 83%, dentro desses 83%, papel e papelão contribuem com 27,4%, restos de jardins e restos de comida 28%. O RSU também possui 12,7% de plásticos, 8,7% de produtos têxteis, borracha, couro e 6,3% de madeira, os restantes 3,4% são de materiais diversos.

O alto teor de matéria orgânica caracteriza o RSU como uma boa fonte de energia [Ansah et al. 2016]. Tecnologias que transformam resíduos sólidos em energia são vantajosas uma vez que lidam com o problema relacionado com a alta demanda de energia e diminuem o volume de RSU descartado em aterros sanitários, que geram problemas ambientais.

A composição heterogênea do RSU gera diversos obstáculos em relação a utilização desses compostos como combustível sólido, visto que a conversão por vias termoquímicas apresenta instabilidade ao lidar com uma mistura de materiais com características diferentes. A heterogeneidade do RSU pode ser constatada com o exemplo citado por [Korkmaz et al. 2009], que mostra a diversidade de componentes de uma caixa de bebidas, que é formada por: papel (aproximadamente 75% w/w), alumínio (aproximadamente 5% w/w), e polietileno de baixa densidade (LDPE) (aproximadamente 20%).

Segundo [Mu'min et al. 2017] a presença de plástico no RSU proporciona o aumento do potencial energético, dado que ele apresenta potencial calorífico de 42-43 MJ/kg. Resíduos que possuem plástico em sua composição têm maiores teores de hidrogênio e menores de oxigênio em relação à biomassa, como por exemplo o polietileno de baixa densidade tem baixos teores de oxigênio em sua composição [Xue et al. 2015].

2.1.2 Propriedades dos resíduos sólidos urbanos

No que diz respeito as propriedades do RSU, um dos maiores obstáculos nos processos térmicos como a pirólise e gaseificação são: alto teor de água presente na estrutura desses materiais (mais de 50%), alta razão O/C, baixo poder calorífico, alta produção de alcatrão, baixa densidade, formato e tamanho irregular. Por ser uma mistura heterogênea, a degradação térmica do RSU é caracterizada pelo distinto comportamento de cada componente em diferentes temperaturas. Além de terem picos de degradação diferentes, há uma certa interação entre diferentes materiais [Triyono et al. 2019, Rago et al. 2020].

2.1.3 Combustível Derivado de Resíduos e Combustível Sólido Recuperado

Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR) - do inglês, Refuse-Derived Fuel (RDF) - e Combustíveis Sólidos Recuperados (CSR) - do inglês, Solid Recovered Fuel (SRF) - são os dois maiores meios de recuperação de recursos energéticos de frações não recicláveis de resíduos sólidos urbanos, sendo considerados, portanto, como uma forma de tecnologia *Waste-to-energy* [Gerassimidou et al. 2020]. Por serem um porção do RSU que passou por um tratamento mecânico, o CDR ou CSR possuem maior poder calorífico que o RSU e podem ser compostos por plástico, embalagens, produtos têxteis, madeira, borracha [Białowiec et al. 2017].

A principal diferença entre esses dois combustíveis reside no grau de refinamento entre eles. O CDR é menos refinado e pode ser considerado uma forma mais genérica para se referir aos combustíveis originados de resíduos, logo ele apresenta conteúdo e qualidade variados. Já o CSR é um combustível resultante de um maior refinamento do RSU, sendo regulamentado pelo Comitê Europeu de Padronização (CEN). O fato de ser mais refinado torna o CSR um combustível mais proveitoso energeticamente [Velis et al. 2010].

Por serem uma parte selecionada do RSU, a composição dos CDR/CSR é mais restrita e sua composição mais usual é papel/papelão, plásticos, produtos têxteis e madeira, de acordo com [Gerassimidou et al. 2020]. Apesar das propriedades dos dois variarem com a composição, eles possuem no geral baixo poder calorífico e alto teor de umidade, assim como o RSU [Białowiec et al. 2017]. A composição heterogênea pode levar a um comportamento térmico variável, o que não é vantajoso para a geração de energia.

A composição do CDR/CSR pode ser dividida em dois grandes grupos, uma fração de biomassa e outra fração de plásticos a base de produtos fósseis. Segundo o trabalho de [Gerassimidou et al. 2020], CDR/CSR são compostos por biopolímeros, como a celulose, lignina e a hemicelulose. [Conesa and Rey 2015] determinaram a porcentagem de cada biopolímero ao usar três amostras de CSR a 86,5% w/w, dos quais 61,1% w/w era celulose, 31,3% w/w lignina e 7,6% w/w hemicelulose.

A porção plástica é composta predominantemente por polietileno (PE) com cerca de 32-43% w/w, seguido de polipropileno (PP) com 17-22% w/w, policloreto de vinila (PVC) 6-14% w/w, e polietileno tereftalato (PET) 8-13% w/w [Gerassimidou et al. 2020]. Essas porcentagens podem variar dependendo da origem do RSU. PVC é um componente não desejado na composição do RSU, uma vez que ele é a maior fonte de cloro (Cl), que é um componente prejudicial ao passar por processos térmicos. Além do cloro, deve ser evitado também materiais que possuem enxofre (S) em sua composição. A presença de Cl e S são capazes de formar NaCl, CaCl₂, KCl, Na₂SO₄, K₂SO₄, e MgSO₄, durante processos térmicos, causando a corrosão nas paredes internas do reator, dessa forma o teor de Cl e S devem ser os menores possíveis [Chae et al. 2020, Yuan et al. 2015, Lasek et al. 2021].

Há dois tipos de cloro, o cloro orgânico, proveniente de polímeros como o PVC, e inorgânico, como por exemplo sais de resíduos alimentares (NaCl e KCl), e cada um apresenta um comportamento térmico distinto. O PCV é um dos plástico mais consumidos e por ser prejudicial é necessário saber a fração que ele representa nas amostras, sendo que no geral o teor de Cl deve ser inferior a 0,5 wt% ou 1,0 wt%, dependendo da aplicação [Daouk et al. 2018]. A partir a pesquisa de [Daouk et al. 2018] percebe-se que é recomendado eliminar o cloro, em particular o cloro orgânico (PVC), durante a preparação do CSR/CDR antes dos processos de conversão termoquímica, já que a partir dos resultados do equilíbrio termodinâmico o teor de Cl tem influência significativa na produção de HCl, KCl, NaCl, Na₂Cl₂ e K₂Cl₂ gasosos, e das fases sólidas de NaCl e KCl. Foi visto que uma outra forma de eliminar o cloro das amostras é a torrefação [Lasek et al. 2021, Yuan et al. 2015, Saleh et al. 2014]. Em [Saleh et al. 2014] cerca de 20% do cloro foi eliminado usando uma temperatura de tor-

refação de 250°C, já com temperaturas maiores, 350°C, cerca de 64% foi eliminado, dessa forma quanto maior a temperatura e maior o tempo de residência mais cloro é eliminado da amostra. Em [Xu et al. 2020], a eficiência de remoção do cloro atingiu um valor assintótico de 80% após 20 minutos de torrefação a 400°C.

Dessa forma, a identificação da composição polimérica do CDR/CSR possibilita uma maior compreensão do comportamento térmico das amostras. Até mesmo para o mesmo tipo de polímero podem ser encontradas diferenças, devido a sua estrutura molecular, que pode afetar a sua estabilidade térmica [Ray and Cooney 2018].

2.2 Biomassa

Biomassa é todo e qualquer material de origem orgânica que pode ser utilizado na produção de energia. A classificação da biomassa depende de sua origem e composição. De acordo com [S. et al. 2020] a biomassa pode ter as seguintes origens: plantações florestais, resíduos de processamento de madeira e resíduos de extração de madeira, resíduos agrícolas, resíduos agroindustriais, resíduos animais, resíduos industriais, RSU e esgoto, resíduos do processamento de alimentos.

Biomassa é uma fonte de energia com alta disponibilidade, preço acessível, sendo uma fonte renovável que não contribui para a emissão de gases agravantes do efeito estufa. Pode ser considerada uma fonte de energia de carbono neutro, uma vez que o carbono produzido na queima de biomassa é consumido por plantas durante a fotossíntese [Strezov 2015].

As principais formas de conversão de biomassa em energia são: termoquímica, bioquímica, combustão direta [S. et al. 2020]. A energia proveniente de biomassa pode ser usada de três formas, sólida (*pellets*, bio-carvão), líquida (etanol, biodiesel) e gasosa (bio-gás), tornando-a uma boa alternativa para combustíveis fósseis. A biomassa pode ser usada diretamente na conversão de energia, no entanto a capacidade de converter essa matéria-prima em produtos com maior densidade energética, a partir das vias térmicas como pirólise, aumentou o interesse no uso de biomassa para fins energéticos [Nhuchhen et al. 2014].

2.2.1 Composição da biomassa

A composição da biomassa é determinada a partir de ensaios de análise imediata (teor de material volátil, teor de carbono fixo e teor de cinzas), poder calorífico e análise elementar (C, H, N, S e O) [Strezov 2015]. Os componentes que formam a biomassa são a celulose, hemicelulose, lignina, extrativos orgânicos e minerais inorgânicos. Sendo os três primeiros os principais componentes e suas respectivas proporções dependem da espécie da biomassa [Chen et al. 2015]. É importante entender as propriedades e características dos componentes da biomassa, uma vez que eles possuem diferentes características de decomposição térmica [Chen et al. 2015].

Celulose é um biopolímero formado por uma longa cadeia de glucose, pode estabelecer ligações intra e intermoleculares com o hidrogênio, possui uma estrutura cristalina e é o principal componente da biomassa, representando cerca de 40% à 45% de seu peso [Nhuchhen et al. 2014, Kenney et al. 1990]. Sua principal função está relacionada com a estrutura da planta [Kenney et al. 1990]. A decomposição desse composto acontece na faixa de temperatura de 315-400°C [Chen et al. 2015].

A hemicelulose é um polissacarídeo quimicamente heterogêneo e é formado por pentoses e hexoses [Kenney et al. 1990]. Esse componente da biomassa possui menores graus de despolimerização quando comparada com a celulose e sofre significativa degradação térmica, fato que influencia no rendimento da massa durante o processo de torrefação [Nhuchhen et al. 2014]. Sua temperatura de decomposição é a mais baixa, de 220-315°C, o que demonstra que ela possui menor termoestabilidade [Chen et al. 2015, Zheng et al. 2015].

Lignina é um polímero tridimensional complexo que possui alto teor de carbono, sendo o carbono relacionado com o conteúdo de energia [Kenney et al. 1990]. A decomposição da lignina ocorre num grande intervalo de temperatura, como [Chen et al. 2015] mostra entre 160°C até 900°C. Por não ter um pico de degradação a lignina é um dos componentes que permanece pouco alterado durante o processo de torrefação, de forma que biomassas com altos teores de lignina produzem mais sólidos [Nhuchhen et al. 2014].

[Zheng et al. 2015] ranqueou os componentes da biomassa segundo sua termoestabilidade e teve a seguinte ordem celulose > lignina > hemicelulose. Por conta da melhor estabilidade térmica, a perda de massa da celulose e lignina são 4,19–24,85% e 7,73–23,61% na temperatura de torrefação de 210–300°C, respectivamente. Por conta de uma estabilidade térmica inferior, a hemicelulose apresenta máxima decomposição, perda de massa de 14,35–58,46% [Chen et al. 2018].

A presença de carbono (C) e de hidrogênio (H) determinam o poder calorífico e o potencial de conversão do biocombustível, sendo que geralmente a presença de hidrogênio é associada a baixos teores de carbono, já a presença de oxigênio (O) é desfavorável por reduzir o poder calorífico da biomassa e favorecer a formação de CO₂ [Chen et al. 2015]. Conforme é apresentado em [Chen et al. 2015] as razões de O/C para a celulose, hemicelulose e lignina são 0,83, 0,80 e 0,47-0,36, respectivamente. Já as razões H/C são 1,67, 1,60 e 1,19-1,53 para os mesmos compostos.

A parte mineral da biomassa, também chamada de cinzas, é formada por compostos inorgânicos como carbonatos, fosfatos, sulfatos de sílica, cálcio, magnésio, sódio e potássio [Silveira 2018]. Essa é a porção da biomassa que mais influencia no seu poder calorífico [Chen et al. 2015]. O entendimento da composição e da concentração elementar da porção inorgânica da biomassa permite um melhor planejamento de como serão os resíduos da biomassa após seu processamento [Strezov 2015].

2.2.2 Propriedades da biomassa

As propriedades da biomassa influenciam as características do produto de um processo térmico. Biomassa é caracterizada por alto teor de umidade, baixo poder calorífico, natureza higroscópica, natureza fibrosa e grande volume ou baixa densidade [Chen et al. 2015]. Todas essas características são desvantajosas para um processo de conversão, dessa forma, há a necessidade de realizar pré-tratamentos como a torrefação para reverter essas características e tornar os processos térmicos mais eficientes [Chen et al. 2015].

A umidade da biomassa pode ser dividida em duas categorias: umidade intrínseca e umidade extrínseca. A primeira é a umidade que a planta normalmente possui em sua composição, já a segunda é a umidade que a planta absorve do meio ao seu redor [Strezov 2015].

É aconselhável que a biomassa submetida a processos como pirólise tenha menor teor de água em sua composição, já que processos térmicos só admitem biomassas com menos de 40% de umidade [Kenney et al. 1990]. O alto grau de umidade presente não só prejudica processos térmicos, mas também é desvantajoso economicamente no quesito de custos relacionados ao transporte e armazenamento e à energia gasta no processo de conversão [Kenney et al. 1990]. A natureza higroscópica da biomassa também é prejudicial pois proporciona a absorção de água pelas paredes celulares [Chen et al. 2015].

Como visto anteriormente, na composição da biomassa há maiores taxas de hidrogênio e oxigênio e menores de carbono. Carbono e hidrogênio são fonte de calor para a combustão, no entanto a presença de hidrogênio é associada a baixos teores de carbono, já a presença de oxigênio é desfavorável por reduzir o poder calorífico da biomassa [Chen et al. 2015]. Dessa forma as razões O/C e H/C são altas [Nhuchhen et al. 2014]. O poder calorífico é importante pois está relacionado com a quantidade de energia que é liberada quando a biomassa é submetida a um processo termoquímico.

De acordo com [Chen et al. 2015] a razão de O/C na biomassa é de 0,4-0,8 e a de H/C é de 1,2-2,0. Após o processo de torrefação, mais carbono é retido na biomassa e a taxa de oxigênio e hidrogênio diminuem com a remoção de voláteis e da umidade, sendo assim as razões O/C e H/C caem para 0,1-0,7 e 0,7-1,6, respectivamente.

A baixa densidade da biomassa causa problemas relacionados ao armazenamento e transporte, e também diminui a densidade de energia, o que leva ao maior uso de biomassa para produzir determinada quantidade de energia [Nhuchhen et al. 2014]. Ao melhorar a densidade relativa da biomassa pode melhorar o rendimento líquido [Kenney et al. 1990].

A energia necessária para moer a biomassa pode ser definida a partir da capacidade de trituração da biomassa. No entanto, essa matéria-prima é naturalmente fibrosa, o que torna difícil o processo de moagem, mas essa propriedade pode ser revertida ao passar pelo processo de torrefação, já que o produto é mais quebradiço e, portanto, mais fácil de manusear, triturar e transportar [Nhuchhen et al. 2014].

2.3 Vias de conversão termoquímica

Tecnologias termoquímicas incluem processos como a gaseificação, a pirólise, combustão ou incineração e tem como princípio de funcionamento o uso de calor para realizar a transformação química de uma amostra em produtos diversos como calor, energia elétrica ou mecânica, produtos químicos e combustíveis. Os principais produtos desses processos são proporções variadas de sólido, líquido e gás. Cada processo possui diferentes condições de reação como temperatura, pressão, taxa de aquecimento, tempo de residência e tipo de atmosfera [Silva-Martínez et al. 2020, Atabani et al. 2022].

2.3.1 Pirólise

Pirólise é o processo termoquímico caracterizado pela decomposição de material carbonáceo, dessa forma a matéria orgânica é aquecida numa temperatura de 400°C até 550°C na ausência de oxigênio, sendo o nitrogênio o principal gás inerte, a fim de produzir, bio-carvão, gases não condensáveis e bio-óleos [Ansah et al. 2016, Strezov 2015, Atabani et al. 2022]. O produto gasoso pode ser usado como combustível, o bio-óleo por ser usado como combustível ou como base de alguns produtos químicos, já o produto sólido pode ser usado na queima direta [Korkmaz et al. 2009].

Tecnologias como a pirólise têm como objetivo tratar resíduos para a redução de volume e de riscos, enquanto oferece meios para a recuperação de energia. A pirólise tem sido largamente usada para a conversão de resíduos lignocelulósicos e resíduos sólidos urbanos em biocombustíveis [Ansah et al. 2016, Sørnum et al. 2001, Zheng et al. 2009, Grammelis et al. 2009, Oyedun et al. 2014, Xue et al. 2015].

A pirólise pode ser classificada em pirólise lenta e pirólise rápida, o que as diferencia é o tempo de residência e a taxa de aquecimento [Strezov 2015]. A pirólise lenta produz uma quantidade moderada de sólido e líquido, sendo capaz de alcançar proporções semelhantes entre seus produtos. Em contrapartida, a pirólise rápida possui um maior rendimento líquido [Strezov 2015]. A taxa de aquecimento e o tempo de residência da pirólise rápida é de 1000-10000°C/s e de 30 ms e 1,5 s, respectivamente, enquanto a pirólise lenta apresenta taxa de aquecimento de alguns graus por minuto e o tempo de residência é na ordem dos minutos [Strezov 2015].

A composição do produto gerado pela pirólise depende de diversos fatores como a composição da amostra, tipo de reator usado, taxa de aquecimento, temperatura, tempo de residência [Velghe et al. 2011]. No caso da biomassa, ela pode ser de origem florestal, agrícola, agroindustrial, resíduo animal, industrial [S. et al. 2020]. Esse processo pode ser ineficiente dado às altas proporções de umidade presente na matéria orgânica, o que torna necessário pré-tratamentos como a torrefação.

A pirólise de resíduos sólidos urbanos é mais complexa dada a grande variedade de ma-

teriais que compõem a amostra e que não agem de forma independente durante esse processo térmico [Velghe et al. 2011]. Estudos como o de [Zheng et al. 2009] mostram como a interação entre os componentes do RSU que possuem a mesma origem como papel e madeira é mínima, enquanto a interação entre plástico e biomassa são significantes durante a co-pirólise. O alto teor de carbono no RSU e grandes quantidade de voláteis na biomassa tem tornado a co-pirólise desses dois combustíveis uma opção atraente para produzir um biocombustível com alto poder calorífico e baixo teor de alcatrão [Cao et al. 2019].

2.3.2 Torrefação

A torrefação, mais conhecida como pirólise leve, é um processo térmico que baseia-se na conversão de matéria orgânica biodegradável em combustível sólido. Esse pré-tratamento ocorre no intervalo de temperatura de 200-300°C sob uma atmosfera inerte e visa a melhoria das características do biocombustível produzido [Chen et al. 2015]. Esse processo engloba três reações principais - decomposição, desvolatilização, despolimerização - e pode ser dividido em 4 etapas - secagem, pós-secagem, torrefação e resfriamento [Nhuchhen et al. 2014].

A desvolatilização é o processo que é definido como a remoção do oxigênio e dos voláteis da amostra e ocorre em temperaturas acima de 200°C [Nhuchhen et al. 2014]. Esse processo pode ser medido pela taxa de perda de massa durante a degradação térmica e ele aumenta conforme aumenta a temperatura. As outras reações, decomposição e despolimerização, são caracterizadas pela conversão de macropolímeros que constituem a amostra em micro monômeros, que por sua vez são convertidos em gases voláteis condensáveis e não-condensáveis [Nhuchhen et al. 2014].

As três primeiras etapas da torrefação são divididas de acordo com sua faixa de temperatura. O primeiro estágio é a secagem, um processo não reativo, que ocorre entre 50-150°C e apresenta o maior gasto energético por retirar a umidade superficial da amostra. A próxima etapa é a pós-secagem, considerada um processo reativo responsável pela liberação da umidade interna e de hidrocarbonetos leves, sua faixa de temperatura é de 150-200°C. Somente a partir de 200°C é que se dá o início da torrefação e da desvolatilização [Nhuchhen et al. 2014]. A última parte é o processo de resfriamento que ocorre até a amostra alcançar a temperatura ambiente.

Apesar do principal objetivo da torrefação ser obtenção de um produto sólido, dois outros produtos são formados, um líquido amarelado e um gás não condensável [Chen et al. 2015]. As características da matéria orgânica após a torrefação dependem das condições experimentais, ou seja, do parâmetros da torrefação que são o tempo de residência, temperatura e taxa de aquecimento e das características das amostras e seus componentes [Chen et al. 2015].

Em relação ao tempo de residência das amostras dentro do reator, o processo de torrefação pode ter duração de minutos a horas, quanto maior o tempo de duração da torrefação maior o teor de carbono fixo e a densidade de energia. Processos de torrefação de biomassa,

por exemplo, normalmente duram até 1 hora como é apresentado em [Chen and Kuo 2010].

Tendo em vista a faixa de temperatura, a torrefação pode ser classificada como leve (200-235°C), moderada (235-275°C) e severa (275-300°C) [Chen and Kuo 2011]. Elevadas temperaturas e taxas de aquecimento influenciam no rendimento sólido, visto que mais voláteis são liberados, o que aumenta a taxa de desvolatilização. Quanto maior for a temperatura de operação e o tempo de residência maior o teor de carbono fixo e, por consequência, menores serão as razões O/C e H/C, aumentando, assim, a densidade de energia da amostra [Nhuchhen et al. 2014].

Outros fatores que influenciam o produto da torrefação e a quantidade de calor utilizada no processo são o tamanho da partícula, formato e propriedades do composto. O tamanho da partícula influencia na transferência de calor por convecção (entre reator e amostra) e condução (entre as partículas da própria amostra), fato que acarreta em distribuições desiguais de calor, fazendo com que a torrefação aconteça de forma desigual para diferentes partículas [Nhuchhen et al. 2014].

A torrefação tem como principal objetivo a produção de um biocombustível com maior poder calorífico ou maior densidade de energia [Chen et al. 2015]. O produto sólido da pirólise possui um rendimento de energia de 55-65%, em contrapartida, uma amostra que passou por torrefação e, em seguida, a pirólise retém até 90% da energia inicial contida no combustível original [Rago et al. 2020].

A torrefação da biomassa é muito usada para contornar as principais características desse composto que são naturalmente desvantajosas para processos térmicos. Como mencionado anteriormente a biomassa é caracterizada por: alto teor de umidade, alta taxa de oxigênio, baixo poder calorífico, baixa densidade e natureza higroscópica. Através da torrefação é possível reduzir o teor de umidade, aumentar o teor de carbono fixo e o poder calorífico, diminuir a razão O/C e H/C. O produto final, então, possui características mais uniformes, tem natureza hidrofóbica, densidade de energia superior e pode ser facilmente triturado, manuseado e transportado [Jamin et al. 2019, Białowiec et al. 2018, Chen et al. 2015, Rasanjani et al. 2019, Rago et al. 2020]. Dessa forma, a torrefação é usada como um pré-tratamento da biomassa, melhorando a eficiência de processos térmicos como a pirólise, a gaseificação e a combustão [Chen et al. 2018]. O esquema da variação das propriedades da biomassa antes e após a torrefação pode ser visualizado na Figura 2.1.

O rendimento sólido e o rendimento energético são medidas quantitativas e qualitativas do processo de torrefação [Nhuchhen et al. 2014]. O rendimento sólido é definido como a fração da massa final torrefada pela massa inicial da amostra, já o rendimento energético é a razão da energia final pela energia inicial [Chen et al. 2015]. A qualidade do produto é medida de acordo com a densidade de energia da biomassa torrefada.

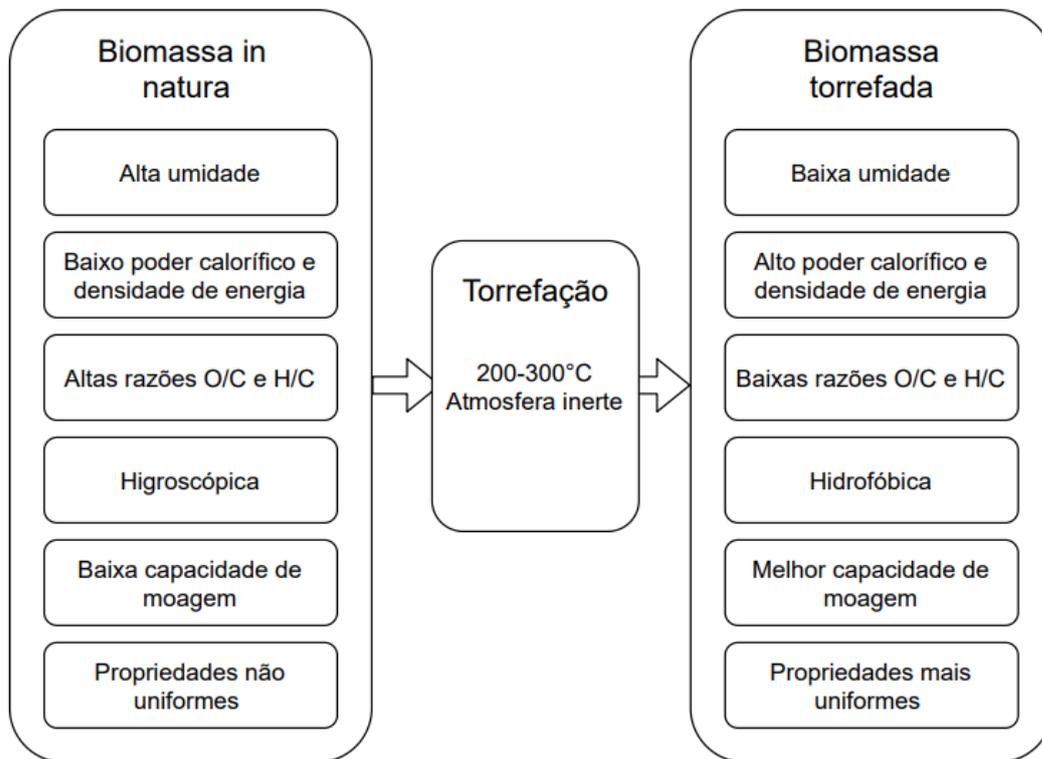


Figura 2.1: Esquema da variação de propriedades da biomassa submetida à torrefação. Adaptado de [Chen et al. 2015]

2.3.3 Gaseificação

A gaseificação é um processo de conversão que usa oxidação parcial em altas temperaturas para converter matéria-prima líquida ou sólida em gás síntese (syngas) e pequenas parcelas de bio-carvão e bio-óleo [Martinez et al. 2021, Chawdhury and Mahkamov 2010]. O syngas pode ser usado para a produção de calor, energia, fluido de transporte e fabricação de produtos químicos [Ku et al. 2017], sendo então um produto mais versátil quando comparado aos produtos de outras rotas de conversão [Bach et al. 2019].

A gaseificação é apontada como uma tecnologia mais eficiente e sustentável, ao se comparar com a combustão e a pirólise, sendo amplamente usada em larga escala para a conversão de biomassa e reutilização de resíduos sólidos [Chen et al. 2011, Marcantonio et al. 2020]. Esse tipo de tecnologia termoquímica de conversão de resíduos gera menos poluentes em relação a outros tipos de tecnologias *Waste-to-energy* [Consonni and Viganò 2012]. A gaseificação de diferentes matérias-primas, como biomassas diversas e RSU foi estudada por [Kuo et al. 2014, da Silva Miranda et al. 2020, Sarkar et al. 2014, Adánez-Rubio et al. 2020, Ku et al. 2017, Li and Chen 2018, Ahmed et al. 2011] e foram analisados também os parâmetros do processo de gaseificação em relação à qualidade do gás síntese.

O processo de gaseificação é dividido em: secagem, pirólise, combustão parcial e gaseificação dos produtos decompostos [Basu 2013]. O processo de secagem da biomassa acontece até 100°C, onde a umidade é convertida em vapor [Sansaniwal et al. 2017]. Com o aumento da temperatura, há uma grande perda de massa, cerca de 40% [Li and Chen 2018], a pirólise da biomassa começa então a acontecer num intervalo de temperatura de 125-500°C [Sansaniwal et al. 2017], onde ocorre a condensação dos hidrocarbonetos, formação do composto sólido e produtos gasosos. A zona de combustão parcial é importante por decidir o tipo e a qualidade do produto final [Sansaniwal et al. 2017]. Finalmente, a gaseificação ocorre a uma temperatura elevada de aproximadamente 650°C, com os agentes gaseificantes (tipicamente ar, devido ao seu baixo custo) a iniciarem a reação com carbono no carvão e a liberarem compostos gasosos que formam o syngas [Li and Chen 2018].

O syngas é formado por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂) e baixos valores de metano (CH₄). As proporções de cada um desses componentes dependem da composição da biomassa, do agente gaseificante (ar, vapor, oxigênio) e da temperatura de gaseificação [Li and Chen 2018]. Independente da composição, a qualidade do gás síntese pode ser avaliada por baixos níveis de N₂ e CO₂, altos teores de H₂ e CO e alto poder calorífico inferior (PCI) [Marcantonio et al. 2020]. Como dito anteriormente o syngas é muito versátil, dessa forma ele contribui com a redução da emissão de gases do efeito estufa, já que é capaz de substituir parcialmente os combustíveis fósseis, por exemplo, na produção de hidrogênio [Balat and Kırtay 2010, Parthasarathy and Narayanan 2014].

Os parâmetros usados para avaliar a eficiência do processo de gaseificação são a eficiência de gás frio - do inglês, cold gas efficiency (CGE) - e o poder calorífico inferior. O CGE é definido como a relação entre a energia química que sai do reator, o syngas, e a energia química que entra no reator, a biomassa [Adánez-Rubio et al. 2020]. Já o poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade de calor gerada pela combustão completa menos o calor latente armazenado na água vaporizada. O CGE é calculado segundo a Equação 2.1 e o cálculo do PCI da biomassa e do syngas estão representados nas Equações 2.2 e 2.3, respectivamente:

$$CGE = \frac{Q_{syngas} \cdot PCI_{syngas}}{\dot{m}_{biomassa} \cdot PCI_{biomassa}} \quad (2.1)$$

$$PCI_{biomassa} = 33,9Y_C + 102,9Y_H - 11,2Y_O - 2,5Y_{H_2O} \quad (2.2)$$

$$PCI_{syngas} = 10,8y_{H_2} + 12,6y_{CO} + 35,8y_{CH_4} \quad (2.3)$$

onde Q_{syngas} é a taxa de fluxo do syngas, $\dot{m}_{biomassa}$ é taxa de alimentação da biomassa, Y_C , Y_H , Y_O e Y_{H_2O} são as frações de massa de carbono, hidrogênio, oxigênio e umidade na biomassa; y_{H_2} , y_{CO} , e y_{CH_4} são as frações molares de hidrogênio, monóxido de carbono, e metano no gás síntese [Bach et al. 2019].

Como é possível visualizar nas equações acima, o PCI do gás síntese depende das porcentagens de H_2 , CO , e CH_4 . Portanto, o aumento do PCI do gás é explicado por aumentos tanto do conteúdo de CO como do H_2 do gás produto. Quanto mais vapor adicional mais favorecida é a produção de hidrogênio e dióxido de carbono durante a gaseificação a vapor da biomassa [Bach et al. 2019].

O hidrogênio apresenta grande densidade energética e, segundo [Balat and Kırtay 2010], seu rendimento energético é 2,75 vezes maior que a de outros hidrocarbonetos, podendo ser usado como combustível de transporte, por apresentar boas propriedades para a combustão interna. Atualmente a maior parte da produção de hidrogênio é por vias não sustentáveis, como gás natural, carvão, e somente 1% do hidrogênio é produzido via a gaseificação da biomassa [Balat and Kırtay 2010]. A gaseificação a vapor da biomassa para produzir hidrogênio apresenta grande potencial de recuperação energética, maior eficiência e menor custo [Parthasarathy and Narayanan 2014]. Uma rota de produção de combustível renovável é a gaseificação seguida pelo método de Fischer-tropsch [Strege et al. 2011]. Fischer-Tropsch (FT) é um processo heterogêneo que converte o syngas em produtos, como álcoois, aldeídos, olefinas, parafinas, e combustíveis líquidos para transporte [Mehariya et al. 2020].

Os agentes gaseificantes escolhidos podem ser ar, vapor e oxigênio, ou uma mistura deles, esses agentes interagem com a matéria-prima favorecendo ou desfavorecendo a formação de CO , CO_2 e H_2 , aumentando ou diminuindo o poder calorífico e a eficiência de gás frio. A gaseificação com ar é a mais comum, mas o syngas é diluído por conta da grande quantidade de nitrogênio, reduzindo assim o seu poder calorífico [Bach et al. 2019, Adánez-Rubio et al. 2020], isso pode ser contornado usando somente o oxigênio já que o produto resultante apresenta maiores valores de poder calorífico, no entanto a separação do oxigênio do ar é cara [Li and Chen 2018]. A gaseificação com vapor favorece a formação de hidrogênio e diminui a produção de alcatrão, o que é vantajoso, no entanto esse processo requer calor externo para as reações endotérmicas que caracterizam a formação do vapor. Por outro lado, a gaseificação em vapor oferece maior teor de hidrogênio, por conta da reação de troca água-gás, menor produção de alcatrão no produto final, maior poder calorífico e alto rendimento [Bach et al. 2019, Parthasarathy and Narayanan 2014, Adánez-Rubio et al. 2020].

Outro importante parâmetro da gaseificação é o reator usado para o processo. Reatores de leito fixo (*downdraft*) são muito usados para a produção de energia em pequena escala e apresentam baixo teor de alcatrão do gás síntese [da Silva Miranda et al. 2020]. O funcionamento desse tipo de gaseificador é dividido em secagem, pirólise, oxidação e redução. Essas etapas podem ocorrer simultaneamente ou sequencialmente. Inicialmente a matéria-prima é introduzida na parte superior do reator, passando pelo processo de secagem e logo em seguida a pirólise, onde os compostos mais complexos são quebrados em carvão e voláteis. A zona de oxidação ocorre um afunilamento do reator e é onde o agente gaseificante é introduzido. A última zona é a de redução e é onde o calor sensível dos gases e do carvão são convertidos em energia química do gás síntese [Chawdhury and Mahkamov 2010].

A torrefação tem se mostrado como uma forma de melhorar a performance da biomassa ao longo da pirólise, combustão e gaseificação [Abdulyekeen et al. 2021, Simões Santanna et al. 2021, Kuo et al. 2014, da Silva Miranda et al. 2020], uma vez que apresenta uma alta eficiência (94%) de processo quando comparada com outros processos como a peletização (84%) e a pirólise (64%) [Uslu et al. 2008]. O uso de torrefação altera a composição do gás de síntese, já que diminui o teor de H_2 , por conta da evaporação dos voláteis, e aumenta o teor de CO por apresentar maiores valores de carbono fixo, dessa forma há a diminuição da razão H_2/CO . A torrefação proporciona menor razão O/C, isso favorece a oxidação incompleta do carvão e a reação de Boudouard. Estas reações estão relacionadas com a redução de CO_2 e ao aumento de CO no syngas, respectivamente [Bach et al. 2019]. A torrefação também melhora a eficiência de gás frio (CGE) [Chen et al. 2011]. Para uma melhor eficiência global do processo, o calor residual da gaseificação a alta temperatura pode ser utilizado para fornecer calor para o processo de torrefação [Bach et al. 2019].

A torrefação como pré-tratamento da biomassa gaseificada por ser vista em [Couhert et al. 2009], onde foi analisado a composição do gás síntese para amostras de madeira in natura e torrefadas em 2 temperaturas. Foi visto que a quantidade de CO_2 permaneceu quase a mesma, mas a produção de H_2 aumentou 7% e a de CO aumentou 20% em comparação com o syngas da madeira in natura. A utilização de biomassa torrefada como matéria-prima para gaseificação proporciona um aumento da eficiência da gaseificação, do rendimento e da qualidade do gás de síntese, e a redução do alcatrão [Abdulyekeen et al. 2021].

Capítulo 3

Materiais e Métodos

A metodologia usada nesse trabalho é representada pela Figura 3.1. Teve início com a busca de um referencial bibliográfico como base de comparação para os resultados obtidos e, também, entender as principais tendências dos últimos anos na área de energias renováveis. Após as informações obtidas, foram confeccionados uma mistura de resíduos lignocelulósicos, provenientes da poda de árvores, e uma mistura sintética de resíduos sólidos urbanos. O *blend* resultante da mistura lignocelulósica com a mistura sintética de RSU foi chamado de *blend* híbrido. Todas as amostras foram caracterizadas por meio de análises elementar e de poder calorífico. As amostras lignocelulósicas e as híbridas foram submetidas ao processo de gaseificação para posterior análise do gás síntese.

3.1 Blends de biomassa

A porção de biomassa utilizada nesse trabalho é proveniente de resíduos de poda urbana. Foram selecionadas seis espécies diferentes de madeira a partir das informações obtidas pela NOVACAP (Empresa de Urbanização da Nova Capital do Brasil). A escolha dessas espécies foi baseada em sua quantidade e no número de chamados para a realização de poda [Santanna et al. 2020].

Os seis resíduos lignocelulósicos selecionados e fornecidos pela NOVACAP foram: *Mangifera indica* (mangueira), *Ficus benjamina* (ficus), *Pelthophorum dubium* (cambuí), *Persea americana* (abacate), *Anadenanthera colubrina* (angico) e *Tapirira guianensis* (pombeiro) e estão apresentados na Tabela 3.1.

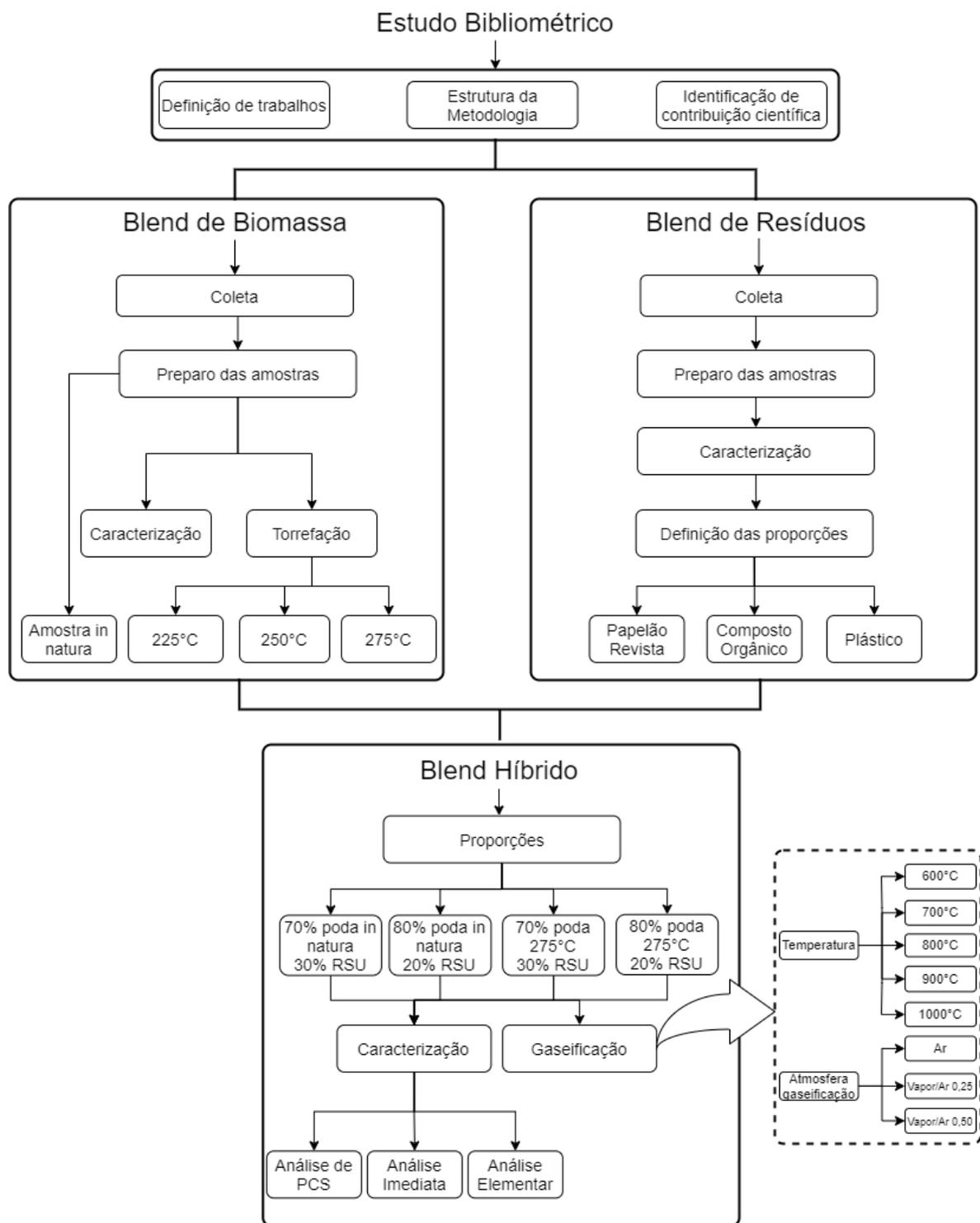


Figura 3.1: Fluxograma da metodologia adotada no trabalho.

3.1.1 Preparo das amostras

O *blend* lignocelulósico foi confeccionado utilizando um moinho de martelos, dessa forma cada amostra de poda foi individualmente triturada. Após serem moídas, elas foram peneiradas (*60 mesh*) para assegurar a homogeneidade de cada uma e, por conseguinte, obter melhores resultados no processo de torrefação.

Tabela 3.1: Resíduos lignocelulósicos urbanos entre 2015-2020 (PODA).

Nome comum	Nome científico	Quantidade de pedidos de poda
Mangueira	<i>Mangifera indica</i>	3754
Fícus	<i>Ficus benjamina</i>	2916
Cambuí	<i>Pelthophorum dubium</i>	2253
Abacateiro	<i>Persea americana</i>	1996
Angico	<i>Anadenanthera colubrina</i>	855
Pombeiro	<i>Tapirira guianensis</i>	761

Em seguida, foi feita a mistura das amostras de poda. Tal mistura possui diferentes proporções de cada uma das seis biomassas, que conforme o trabalho de [Santanna et al. 2020] foram feitas respeitando a representatividade das amostras na cidade de Brasília. Antes das análises químicas, as amostras de biomassa foram secas em estufa a 104°C até estabilização da perda de massa. Os processos de moagem e da formação do *blend* podem ser visualizados no esquema representado na Figura 3.2.

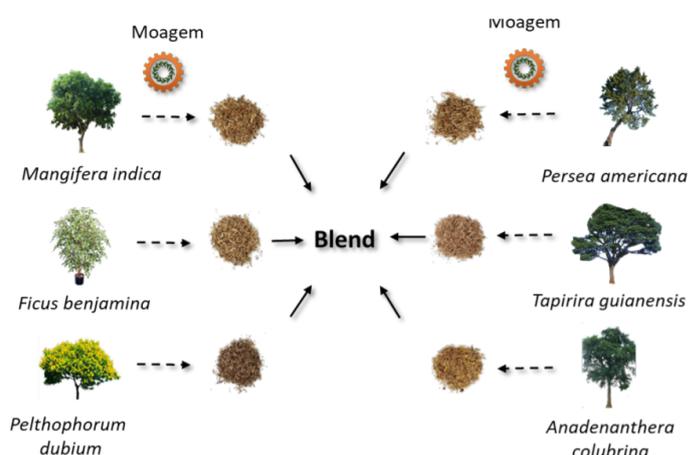


Figura 3.2: Blend de resíduos lignocelulósicos [Santanna et al. 2020].

3.1.2 Caracterização das amostras

A caracterização das amostras de poda e de sua mistura resultante foi obtida por meio de ensaios de análise imediata e poder calorífico realizados no Laboratório de Produtos Florestais – LPF, do Serviço Florestal Brasileiro - SFB, em Brasília/DF.

3.2 Blend sintético de resíduos sólidos

A amostra representativa dos resíduos sólidos foi estabelecida a partir da composição gravimétrica do Aterro Sanitário de Brasília obtida em dezembro de 2019. Foi feita, a partir

disso, uma mistura sintética dos principais componentes apresentados na Tabela 3.2. As proporções escolhidas para os compostos orgânicos, papéis e plástico foram obtidas omitindo os outros componentes do RSU, assim como na pesquisa de [Mu'min et al. 2017], uma vez que materiais como os ferrosos e vidros não são apropriados para serem submetidos a processos de degradação térmica.

A porção orgânica da amostra é proveniente de compostagem caseira, formada por restos alimentares e restos de folhas que passaram pelo processo de fermentação. Os papéis selecionados foram o papelão e o papel de revista, visto que segundo [Grammelis et al. 2009] são o que mais se assemelham a real composição do RSU. Já a presença de plástico na amostra sintética é mais complexa por conta da grande variedade de tipos de plástico [Gerassimidou et al. 2020]. No entanto, com a tentativa de aproximar-se à composição real do RSU foi considerada a presença do polietileno (PE), que é o tipo de plástico que torna a amostra sintética mais similar com a natural [Grammelis et al. 2009]. Para isso, foi usado o polietileno de alta densidade (PEAD) proveniente de uma embalagem de produto de limpeza. Policloreto de vinila (PVC) também é um dos plásticos mais comuns, no entanto foi optado por eliminar o cloro das amostras devidos a emissão de poluentes [Daouk et al. 2018].

3.2.1 Preparo das Amostras

As amostras selecionadas foram trituradas e peneiradas (60 *mesh*), como pode ser visto na Figura 3.3. A moagem permite o aumento da relação superfície/volume, além de proporcionar a uniformização e homogeneização das partículas.

Posteriormente elas foram inseridas em uma estufa durante 24 horas numa temperatura de 104 °C, até a massa da amostra permanecer constante. No entanto, para os compostos orgânicos foi necessário realizar a secagem antes da moagem, uma vez que a alta umidade da amostra dificultava o processo de moagem.

3.2.2 Caracterização gravimétrica

A caracterização do Aterro sanitário de Brasília foi fornecida pelo Plano Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PDGIRS), que mostrou a composição do Aterro e as proporções médias de cada material, conforme apresentado na Tabela 3.2.

3.2.3 Biocombustível híbrido

A partir da fundamentação teórica para a formulação do RSU sintético foi possível, também, ter base para a elaboração de um biocombustível híbrido. Foram escolhidos como os componentes dessa amostra o RSU sintético e o *blend* de biomassa proveniente das podas urbanas.



Figura 3.3: Compostos do RSU antes e depois da primeira moagem. Papelão, plástico PE, composto orgânico e revista, respectivamente

Tabela 3.2: Composição média geral dos resíduos que ingressam no Aterro Sanitário de Brasília (PDGIRS, 2019)

Materiais Classificados	Fração dos resíduos no abs (%)			
	Fração	Média Geral	Densidades de cada fração (t/m ³)	Densidades Estimadas (t/m ³)
Resíduos alimentares e jardins	Orgânicos	46,6	1,40	0,65
Papelão ondulado, papel brando, misto	Papéis	11,0	0,60	0,06
PEAD, PF preto, PF misto e outros	Plásticos	14,8	0,50	0,07
Ferrosos, alumínio e outros	Metais	1,0	0,20	0,01
Vidros	Vidros	2,0	1,25	0,03
Vest., madeira, isopor, pilhas e baterias	Outros	6,8	0,52	0,04
Areia, pedras, contaminantes biológicos	Rejeitos	17,8	1,30	0,22
	Total	100	-	1,08

A proporção que cada componente representa na amostra híbrida foi definida a partir da literatura [Hameed et al. 2021]. Além de ser necessário considerar as características e constituintes de cada um dos componentes na amostra, visto que, o objetivo é a realização de um biocombustível com alto poder calorífico e baixo teor de contaminantes.

A elaboração desse biocombustível se deu com a confecção de *pellets* de 1 grama com diferentes de proporções do RSU sintético e do *blend* de poda. Os *pellets* foram realizados no LPF utilizando o equipamento disposto na Figura 3.4.



Figura 3.4: Equipamento de fabricação de *pellets*

3.3 Ensaio de torrefação

O pré-tratamento de torrefação foi realizado para cada uma das 6 amostras de poda e para a mistura. Os ensaios foram feitos no Macro-TG Analyser TGA-2000-A. As temperaturas de torrefação e o tempo de residência foram definidos conforme a Tabela 3.3. Foi estabelecida uma atmosfera inerte, mantida a partir de um fluxo constante de gás nitrogênio (N_2) a uma taxa de $3,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ e a taxa de aquecimento de $5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$. As análises foram realizadas em triplicata.

Anteriormente à torrefação, as amostras de $2,60 \pm 0,5 \text{ mg}$ foram dispostas em uma estufa com circulação e renovação de ar para a secagem, mantidas por cerca de 30 minutos a uma temperatura de 104° .

Tabela 3.3: Parâmetros dos ensaios de torrefação.

Amostras	Tratamentos	Patamar de torrefação
1. <i>Mangifera indica</i>		
2. <i>Ficus benjamina</i>		
3. <i>Pelthophorum dubium</i>	T_1 . 225°C	60 minutos
4. <i>Persea americana</i>	T_2 . 250°C	
5. <i>Anadenanthera colubrina</i>	T_3 . 275°C	
6. <i>Tapirira guianensis</i>		
7. Blend		

Com a torrefação é possível obter o rendimento sólido (SY) e a perda de massa (WL) das amostras ao longo do tempo (T). Tais variáveis são obtidas a partir das equações 3.1 e 3.2:

$$SY = \frac{w_i(t)}{w_0} \times 100 \quad (3.1)$$

$$WL(t) = 100 - SY(T) \quad (3.2)$$

sendo $w_i(t)$ a perda de massa ao longo do tratamento e w_0 é o peso inicial da amostra.

3.4 Análise química

Os ensaios para determinação das propriedades químicas foram realizados no setor de energia do LPF. Os experimentos abrangeram ensaios de análise imediata (teor de material volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo), análise elementar e poder calorífico.

3.4.1 Análise Imediata

A análise imediata é aplicada para biocombustíveis nos quais os voláteis, excluindo a umidade, são liberados ao serem aquecidos numa atmosfera inerte até determinada temperatura [Strezov 2015]. Tem por objetivo quantificar o teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, de acordo com as normas ISO 18123:2015 e ISO 18122:2015 [Santanna et al. 2020]. O carbono fixo é a massa de resíduos restante após o aquecimento da biomassa. O teor volátil e o teor de carbono fixo determinam a ignição e o potencial de conversão termoquímica da biomassa [Strezov 2015].

Foi colocado 1 grama de massa para cada cadinho de porcelana com tampa, que foram inseridos na mufla a 900°C, trabalhando em duplicata. O tempo de residência das duas amostras de biomassa na tampa da mufla foi de 3 minutos, em seguida as amostras foram posicionadas no interior da mufla com tampa por mais 7 minutos. Após esse procedimento, as amostras foram inseridas em dessecador para resfriamento. Por fim, as amostras foram pesadas para saber a massa final. A partir da massa final é possível calcular o teor de voláteis, de acordo com a Equação 3.3.

A caracterização energética do RSU do Aterro Sanitário de Brasília foi obtida a partir da pesquisa realizada por [Lisboa 2016]. As amostras obtidas na pesquisa foram retiradas diretamente do aterro em 7 pontos distintos a uma profundidade de 5 metros. As amostras foram secadas por 5 dias e moídas a 60 e 40 *mesh*. Foram realizados ensaios de análise imediata e poder calorífico.

3.4.2 Teor de material volátil

O teor de voláteis é medido pela diferença de massa da amostra antes e depois do processo de aquecimento (Equação 3.3). As amostras foram padronizadas e previamente secas, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 850°C.

$$MV = \frac{M_2 - M_3}{M_1} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde MV é o teor de materiais voláteis (%), M_1 é a massa da amostra, M_2 é a massa do cadinho + massa da amostra, M_3 é a massa do cadinho após a mufla a 900°C.

3.4.3 Teor de cinzas

As cinzas são a parte inorgânica do combustível e a fração correspondente de cinzas pode ser calculada a partir da diferença de massa antes e após o processo térmico.

Amostras de 1 grama, trabalhando em triplicata, foram dispostas dentro dos cadinhos de porcelana e posicionadas dentro da mufla com a tampa fechada a uma temperatura de 700°C durante 5 horas até a queima completa do material. Após esse processo o cadinho foi levado ao dessecador por 15 minutos e a massa da amostra foi medida novamente. O teor de cinzas pode ser calculado pela Equação 3.4.

$$C_z = \frac{M_3 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3.4)$$

Onde C_z é o teor de cinzas (%), M_1 é a massa da amostra, M_2 é a massa do cadinho e M_3 é a massa do cadinho + massa da amostra.

3.4.4 Teor de carbono fixo

O carbono é o principal componente que contribui para produzir energia durante a combustão, dessa forma quanto mais carbono fixo, maior é o poder calorífico da amostra [Chen et al. 2015]. O carbono fixo é a quantidade de carbono contida na biomassa.

A porcentagem de carbono fixo (CF) pode ser encontrada a partir dos valores de material volátil (MV) e teor de cinzas (C_z), como pode ser visto na Equação 3.5.

$$CF = 100 - (C_z + MV) \quad (3.5)$$

3.4.5 Poder Calorífico

O poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de calor gerada pela combustão completa da amostra sob certas condições. Já o poder calorífico inferior (PCI) é o calor liberado pela combustão da amostra e os gases são resfriados até o ponto de ebulição da água [Kenney et al. 1990]. A qualidade do biocombustível é diretamente proporcional ao seu poder calorífico.

A análise calorífica foi realizada de acordo com a ISO 1928-2009 (calibração do equipamento) e ISO 17225-2014 (cálculo do PCS) [Santanna et al. 2020]. Para todos os testes, a base seca foi considerada para os cálculos. As amostras foram feitas usando *pellets* pesando

cerca de 0,66 gramas, compostos por 0,22 gramas de cada ensaio para uma determinada temperatura e taxa de aquecimento. Após a fabricação, os *pellets* foram colocados na estufa a 104°C por 24 horas para que possam atingir 0% de umidade.

Esse ensaio se caracteriza pela medição da energia gerada pela combustão completa da amostra submetida a uma pressão constante e com injeção de oxigênio para garantir a combustão [Silveira et al. 2019]. O equipamento usado para o ensaio de PCS foi uma bomba calorimétrica da PARR modelo 6400 – Automatic Isoperibol Calorimeter, localizada no laboratório de energia da biomassa no LPF.

3.4.6 Análise elementar

A análise elementar, que é usada para determinar as proporções de C, H, N e O, foi realizada usando o analisador Vario MACRO Cube com uma balança microanalítica. Essa análise foi feita para os componentes lignocelulósicos e para a sua mistura e para os componentes do RSU. A análise elementar do *blend* sintético de RSU e do híbrido foi realizada usando os resultados da análise elementar das amostras que os compõem e suas respectivas proporções. Foi considerada a base seca para todos os experimentos, seguindo a ASTM E777/2008 e E778/2008 [Simões Santanna et al. 2021].

3.5 Gaseificação

A gaseificação foi realizada utilizando um modelo de equilíbrio termodinâmico desenvolvido com o *software* EES (Engineering equation solver) por [Fock et al. 2000]. Esse modelo é usado para simular processos de gaseificação e já foi validado por [Chawdhury and Mahkamov 2010] e usado em outras pesquisas como [Simões Santanna et al. 2021, da Silva Miranda et al. 2020]. Esse *software* não se baseia numa planta específica e pode ser usado para simular diversas plantas do tipo *down draft* a depender dos dados de entradas (fluxo de massa, teor de umidade, temperatura) e os parâmetros da gaseificação.

As equações fundamentais do modelo são as de conservação da massa e da energia. A determinação da composição do gás da câmara de gaseificação é baseada em equações para os balanços de elementos e a reação de mudança água-gás. A reação de mudança água-gás é uma equação dependente da temperatura para o equilíbrio químico entre hidrogênio, dióxido de carbono, monóxido de carbono e água (fase gasosa) [Fock et al. 2000].

Serão analisadas as influências das diferentes composições da matéria-prima, do processo de torrefação, da temperatura de gaseificação e do agente gaseificante na qualidade do gás de síntese, independente do tipo de gaseificador. Esse modelo também pode ser usado para verificar qual parâmetro tem maior influência nas variáveis de saída [Fock et al. 2000].

Como dados de entrada, foram inseridas as propriedades das amostras como teor de umidade, composição elementar (teor de hidrogênio e de oxigênio), valores para o fluxo de massa, temperaturas de gaseificação e pré-aquecimento (ar e vapor), como mostrado na Figura 3.5. Foram usadas cinco temperaturas de gaseificação, 600, 700, 800, 900 e 1000°C, e temperatura de pré-aquecimento de 350°C [Simões Santanna et al. 2021]. Foi determinado um fluxo de biomassa de $75 \text{ Kg} \cdot \text{h}^{-1}$, e foi imposta uma potência de entrada de 370 – 420 kW [Simões Santanna et al. 2021]. A composição CH_4 do gás produtor foi considerada como constante a 2% [Adánez-Rubio et al. 2020, da Silva Miranda et al. 2020] e a produção de biocarvão a 1% [Simões Santanna et al. 2021]. O desempenho do processo de gaseificação foi avaliado pela composição do gás produtor (CO , CO_2 e H_2), os valores de poder calorífico inferior (PCI) e eficiência do gás frio (CGE).

Para a composição da atmosfera foram usados dois agentes gaseificantes, ar e vapor, em três condições diferentes. Primeira condição: somente ar; segunda condição: ar e vapor com a razão vapor/biomassa = 0,25; terceira condição: ar e vapor com a razão vapor/biomassa = 0,5 [Marcantonio et al. 2020].

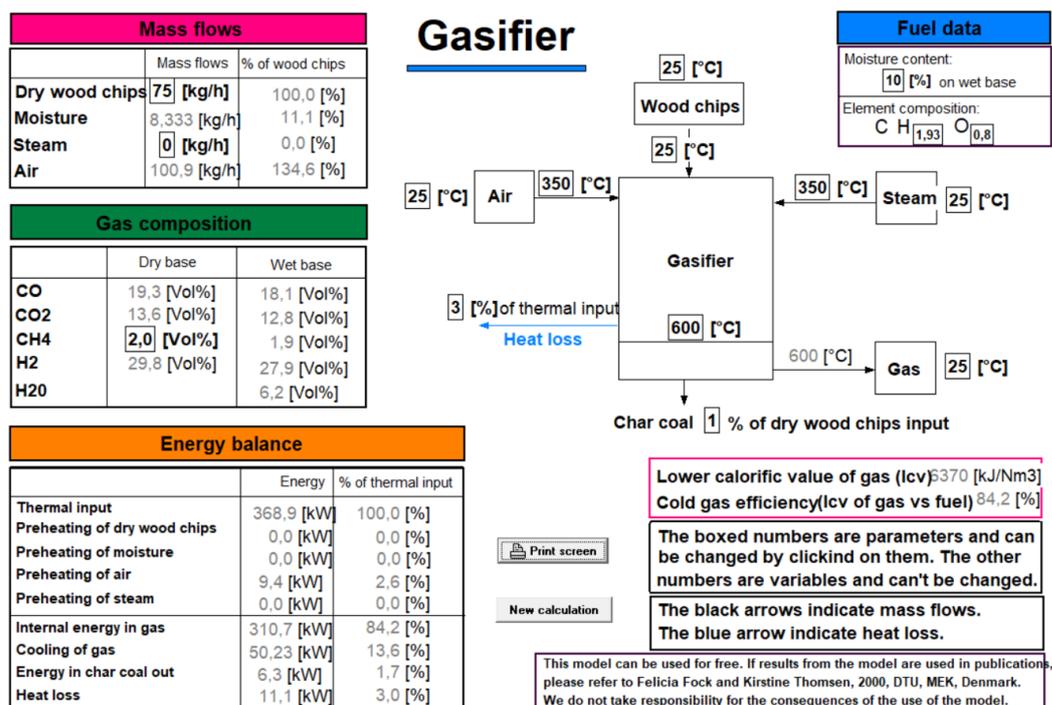


Figura 3.5: Exemplificação do modelo de gaseificação para as amostras in natura a 600°C.

3.6 Análise de critérios

Com a grande variedade de amostras, tratamentos e atmosferas referentes à gaseificação, torna-se inviável saber qual a configuração mais vantajosa. Os critérios escolhidos para essa análise foram o poder calorífico inferior, a eficiência de gás frio e a razão H_2/CO . Foi realizado uma primeira análise considerando os três parâmetros, em seguida foi feita uma

segunda análise comparando somente o poder calorífico inferior e a eficiência de gás frio.

O processo de decisão utilizado foi o mesmo feito por [Ferreira et al. 2021] consistindo na análise de dominância forte e fraca, e a distância métrica. O problema foi considerado como sendo um problema de minimização, no qual, o menor valor é o melhor valor, dessa forma, foi calculado o inverso dos parâmetros selecionados acima. Para o caso do poder calorífico inferior, por ele ter uma ordem de grandeza maior que os outros valores, foi necessário normalizar os resultados de forma que eles ficassem no intervalo entre zero e um.

A análise de múltiplos critérios permite avaliar a melhor opção considerando a influência da temperatura de gaseificação, da composição das amostras, do uso ou não do pré-tratamento de torrefação e das diferentes atmosferas. Os métodos de decisão, análise de dominância e distância métrica, são baseados na avaliação frontal de Pareto e na programação por compromisso (*compromise programming*), respectivamente. Esses dois métodos matemáticos são utilizados na análise multicritérios de decisão, onde todos os critérios são comparados entre si, e também com soluções extremas (as melhores e as piores) [Ferreira et al. 2021].

3.6.1 Análise de dominância

A solução mais vantajosa é selecionada de acordo com dois ou três critérios, por ter mais de um critério sendo avaliado a análise de critérios é necessária para facilitar o processo de análise. A dominância entre soluções funciona da seguinte forma: num conjunto de N soluções $x_n = x_1, x_2, \dots, x_N$ de um problema com p critérios de decisão $f_m = f_1(x_n), f_2(x_n), \dots, f_M(x_n)$, uma solução 1 domina a solução 2 se a solução 1 não for pior que a a solução 2 em todos os critérios analisados e se a solução 1 for muito melhor que a decisão 2 em pelo menos um critério (Equação 3.6 e Figura 3.6a). A solução que domina a maioria das soluções é a que apresenta a melhor taxa de sucesso [Ferreira et al. 2021].

Uma solução domina outras de forma fraca se tiver um melhor resultado em pelo menos um critério. Uma solução domina outra de forma forte se tiver um resultado melhor ou igual em todos os critérios [Ferreira et al. 2021, Deb 2011]. O objetivo da aplicação dessa análise é achar a configuração de amostra, atmosfera e temperatura que apresenta o melhor resultado, ora comparando PCI, CGE e H_2/CO , ora comparando somente PCI e CGE.

$$x_1 \leq x_2 \text{ iff } \begin{cases} f_i(x_1) \leq f_i(x_2) \forall i \in 1, \dots, p \\ \exists j \in 1, \dots, M f_j(x_1) < f_j(x_2) \end{cases} \quad (3.6)$$

3.6.2 Distância métrica

A distância métrica é calculada baseada na distância de todos os pontos em relação a um valor desejado. Os valores são medidos pelo vetor de distância euclidiana [Deb 2011]. As

melhores soluções são aquelas mais próximas do valor de referência (Figura 3.6b). Como a análise anterior, a análise de distância métrica é um problema de minimização, dessa forma foram calculados os valores inversos, sendo que o menor valor é considerado o melhor.

O método de distância métrica foi usado seguindo a Equação 3.7. Onde p é o número de critérios, $f_m(x_n)$ é o valor de soluções n no critério m , M é o número de todas as soluções, z_m representa o resultado da solução de referência no critério m .

$$d_n = \left[\sum_{m=1}^M |f_m(x_n) - z_m|^p \right]^{1/p} \quad (3.7)$$

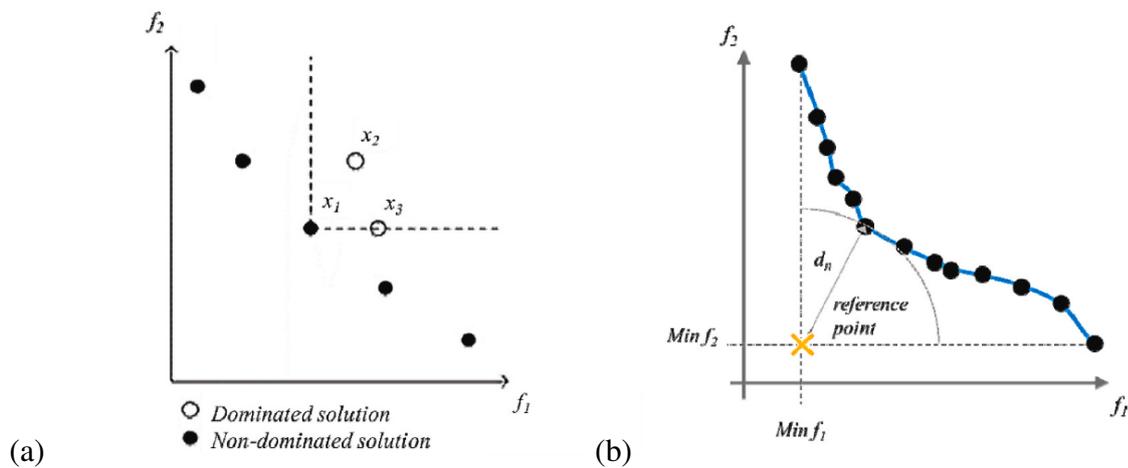


Figura 3.6: (a) Efeito da dominância, e (b) distância métrica [Ferreira et al. 2021].

Capítulo 4

Resultados

4.1 Caracterização das amostras

4.1.1 Caracterização da Biomassa

A partir do poder calorífico e dos ensaios de análise imediata das amostras in natura foi possível obter os valores de material volátil, carbono fixo e poder calorífico superior, que estão dispostos na Tabela 4.1 [Santanna et al. 2020].

Tabela 4.1: Resultados das análises imediata e calorífica da matéria-prima bruta e do *Blend* [Santanna et al. 2020].

Espécies / Blends (%)	Aparência física	Vol. ^a	CF ^b	PCS ^c
1. <i>Mangifera indica</i> (35%)		72,8	23,2	19,2
2. <i>Ficus benjamina</i> (20%)		75,8	20,2	18,4
3. <i>Pelthophorum dubium</i> (16%)		72,9	21,5	19,4
4. <i>Persea americana</i> (16%)		78,7	16,1	19,3
5. <i>Anadenanthera colubrina</i> (6%)		71,1	24,5	19,7
6. <i>Tapirira guianensis</i> (7%)		72,9	23,9	18,9
Blend (100%)		77,6	17,9	19,3

^a Teor de Voláteis (%), ^b Carbono Fixo (%), ^c Poder Calorífico (MJ.Kg⁻¹).

Os valores obtidos para PCS das espécies estão entre 18,4 - 19,7, sendo que a espécie que apresentou maior PCS foi a *Anadenanthera colubrina*, com um valor de 19,7 MJ.Kg⁻¹. Os resultados de análise imediata e poder calorífico apresentados para o *blend* mostram alto teor de voláteis, baixo teor de carbono fixo e baixo poder calorífico superior, o que segue o padrão de resultados apresentados para as amostras que o compõem.

Todos os componentes lignocelulósicos apresentam valores próximos na análise imediata, o que continua sendo verdade para o *blend*. Os altos valores de voláteis e baixo valor de carbono fixo podem resultar em processos térmicos pouco eficientes que, no entanto, podem ser contornados com o uso de pré-tratamentos que visam aumentar a densidade energética do composto.

4.1.2 Torrefação da biomassa

Os resultados referentes à análise imediata e da análise de poder calorífico da torrefação do *blend* de poda estão dispostos na Tabela 4.2.

É possível ver que os valores para a biomassa torrefada a 275°C são os mais vantajosos no quesito energético, uma vez que dentre as amostras é essa que possui maior teor de carbono fixo, que é a substância mais significativa durante a queima e o menor teor de materiais voláteis.

Tabela 4.2: Principais características dos *blends* de biomassa torrefada e in natura.

Amostra	Cinzas (%)	Vol. ^a (%)	CF ^b (%)	PCS ^c (MJ.Kg ⁻¹)
In natura	4,49	77,61	17,90	19,32
225°C	4,56	75,56	19,88	19,83
250°C	5,01	70,68	24,31	20,61
275°C	5,55	64,25	30,20	21,47

^a Teor de Voláteis (%), ^b Carbono Fixo (%), ^c Poder Calorífico (MJ.Kg⁻¹).

Ao comparar os resultados obtidos para a mostra in natura e para a amostra torrefada a 275°C tem-se um diminuição de 17,21% do teor de voláteis, um aumento de 68,7% no carbono fixo e uma aumento do poder calorífico superior de 11,10%. Esses resultados coincidem com a literatura, mostrando que a biomassa torrefada possui características aprimoradas, o que tornam os processos térmicos mais eficientes. Quanto à degradação térmica das amostras após a torrefacção, um rendimento sólido de 93,55% foi obtidas para as amostras a 225°C, 86,34% para as amostras a 250°C, e 77,86% para as amostras a 275°C [Santanna et al. 2020].

4.1.3 Caracterização do RSU

A caracterização do RSU foi obtida por meio da pesquisa realizada pelo projeto P&D RAEESA [Lisboa 2016]. No entanto, diferentemente do presente trabalho, o estudo de [Lisboa 2016] considerou uma menor fração de compostos orgânicos nas amostras, como pode ser visto na Tabela 4.3. Os resultados referentes a análise imediata são descritos na Tabela 4.4 do [Lisboa 2016]. Esses resultados, que usam a real composição e caracterização do RSU, servem como base para prever o comportamento do *blend* sintético durante os processos termoquímicos.

O resultados da análise imediata dos resíduos sólidos do Aterro da Estrutural mostram que as duas maiores frações da média das amostras são os voláteis (66,1%) e a umidade (22,7%), a menor porção é a de carbono fixo (3,1%), o que caracteriza um baixo potencial energético.

Tabela 4.3: Análise gravimétrica do RSU peneirado e seco

Amostra	Plásticos	Papel+Madeira	Resíduos Orgânicos	Materiais Inertes	Água	PCI (MJ/Kg)
PT02cdr	15%	45%	0%	21%	19%	4,79
PT03	34%	8%	0%	27%	32%	6,19
PT04	45%	0%	5%	19%	31%	3,44
PT05	7%	47%	0%	26%	19%	5,03
PT06A	20%	25%	6%	13%	36%	4,79
PT06B	24%	0%	9%	32%	35%	4,29
PT07	14%	60%	0%	9%	17%	5,06
Média	23%	26%	3%	21%	27%	4,80

Tabela 4.4: Análise imediata do RSU peneirado e seco [Lisboa 2016]

Amostra	Umidade (%)	Cinzas (%)	Vol. ^a (%)	CF ^b (%)
PT02cdr	15	5,23	76,10	3,67
PT03	34	6,36	58,41	1,23
PT04	45	13,84	39,23	1,93
PT05	7	4,51	83,19	5,30
PT06A	20	8,39	70,35	1,26
PT06B	24	13,44	59,26	3,30
PT07	14	4,93	76,03	5,05
Média	22,7	8,1	66,1	3,1

^a Teor de Voláteis (%), ^b Carbono Fixo (%).

4.2 Blends

4.2.1 Blend de RSU

Tendo por base a literatura foi possível perceber que as amostras sintéticas de RSU tendem a seguir a composição do RSU real [Mu'min et al. 2017, Triyono et al. 2019, Gerassimidou et al. 2020]. Isto posto, as amostras sintéticas foram feitas tendo por base a Tabela 3.2. Escolhendo os três principais compostos que são resíduos alimentares e jardins, papelão e papel, plástico. Serão excluídos das amostras metais, vidros e rejeitos, uma vez que não são apropriados para serem submetidos a processos térmicos como a gaseificação e a torrefação.

Tabela 4.5: Composição do RSU sintético

Material	Descrição	Porcentagem
Restos alimentares	Composto orgânico proveniente de compostagem caseira	65%
Papel e papelão	Papel de revista e papelão	15%
Plástico	PEAD	20%

4.2.2 Blend Híbrido

O *blend* híbrido foi feito usando duas proporções diferentes de forma a gerar 4 diferentes compostos, conforme apresentado na Tabela 4.6. Foi feita uma variação nas proporções e na biomassa, de forma que nas amostras 1 e 2 foi usado o *blend* in natura e nas amostras 3 e 4 foi usado o *blend* que foi submetido ao processo de torrefação numa temperatura de 275°C.

Foram escolhidas baixas proporções de RSU para minimizar a quantidade de possíveis poluentes originados pela queima do plástico. Foram selecionadas as biomassas de 275°C por possuírem melhores características, como visto anteriormente na Tabela 4.2, e para ser feito uma comparação com os resultados da biomassa in natura, que possui as características como maior umidade e menor teor de carbono fixo.

Tabela 4.6: Proporções usadas para o biocombustível híbrido

Proporções selecionadas		
Componentes	Amostra 1	Amostra 2
Blend poda in natura	70%	80%
RSU sintético	30%	20%
Componentes	Amostra 3	Amostra 4
Blend poda torrefada 275°C	70%	80%
RSU sintético	30%	20%



Figura 4.1: Biocombustível híbrido de biomassa in natura e RSU.



Figura 4.2: Biocombustível híbrido de biomassa torrefada e RSU.

4.2.3 Poder Calorífico Superior

A Fig.4.3 mostra os resultados da análise calorífica para todos os *blends*. O menor valor de poder calorífico superior foi para o *blend* sintético de RSU. No entanto, quando essas amostras são misturadas com as diferentes proporções do material lignocelulósico eles apresentam uma melhora no valor de PCS e, portanto, mais calor pode ser gerado.

Realizando uma comparação entre os *blends* torrefados e os in natura foi possível perceber um aumento de PCS de 6,08% entre a amostra in natura e a torrefada 70/30, e um aumento de 10,34% para as amostras torrefadas 80/20;

Entre as amostras híbridas, a torrefada 80/20 foi a que apresentou um maior valor de PCS, já que ela é formado por menores porções de RSU. Comparando os resultados para o *blend* híbrido torrefado 80/20 e o de RSU foi possível visualizar uma melhora de 30,03% no PCS, no entanto, ao comparar com o *blend* lignocelulósico torrefado houve um decréscimo de 4,61%.

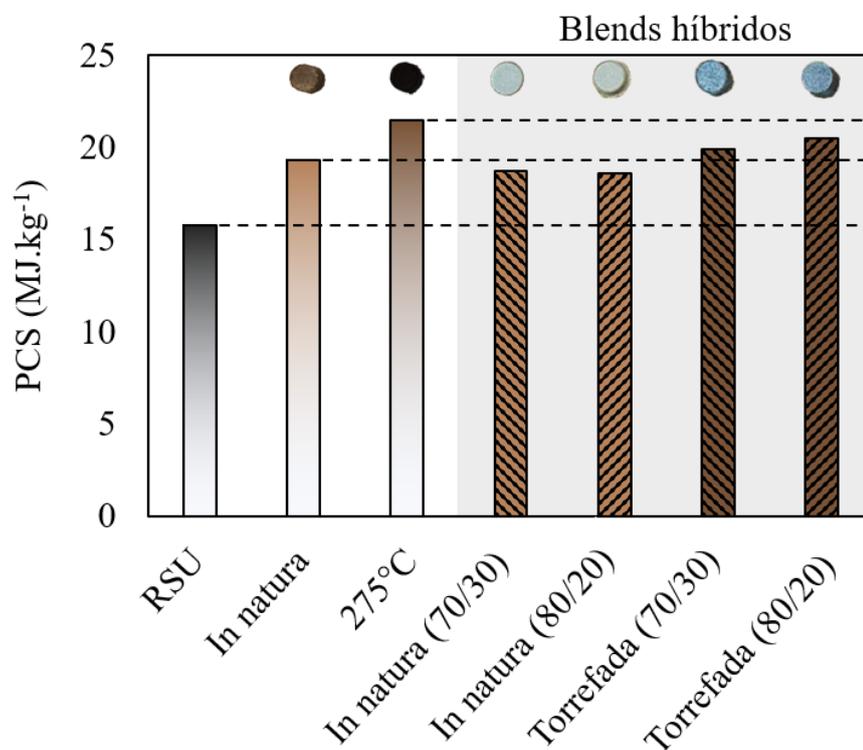


Figura 4.3: Análise calorífica para o RSU e *blends* lignocelulósicos e híbridos.

4.2.4 Análise elementar

As Tabelas 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 mostram a composição elementar dos componentes do *blend* lignocelulósico, do *blend* lignocelulósico e as amostras torrefadas, dos componentes do RSU e sua mistura e dos *blends* híbridos, respectivamente.

É possível verificar que as seis amostras de poda que compõem o *blend* lignocelulósico apresentam composições semelhantes e geram uma amostra que é aproximadamente a média desses valores (Tabela 4.7). Conforme aumenta a temperatura de torrefação o teor de carbono das amostras aumentam enquanto o de oxigênio diminui (Tabela 4.8), o que está de acordo com a literatura [Chen et al. 2015]. As razões H/C e O/C diminuem, o que representa o aumento do teor de carbono fixo com o aumento da temperatura de torrefação.

Tabela 4.7: Análise elementar para os componentes do *blend* lignocelulósico (%).

	C	H	N	O	S	H/C	O/C
<i>Mangifera indica</i>	45,54	6,83	0,37	47,10	0,16	1,79	0,78
<i>Ficus benjamina</i>	43,60	7,30	0,88	48,10	0,12	1,99	0,83
<i>Pelthophorum dubium</i>	43,43	7,06	0,89	48,38	0,24	1,94	0,84
<i>Persea americana</i>	44,41	7,28	0,63	47,54	0,14	1,95	0,80
<i>Anadenanthera colubrina</i>	45,78	7,09	1,05	45,92	0,16	1,84	0,75
<i>Tapirira guianensis</i>	44,00	7,19	0,76	47,93	0,12	1,95	0,82

Tabela 4.8: Análise elementar para o *blend* lignocelulósico (%).

	C	H	N	O	H/C	O/C
In natura	44,91	7,25	0,64	47,84	1,93	0,80
225°C	48,63	6,56	0,76	44,81	1,61	0,69
250°C	50,52	6,31	0,68	43,17	1,49	0,64
275°C	53,30	5,90	0,81	40,80	1,32	0,57

Para os componentes do RSU, a análise elementar mostrou que o plástico é o componente que apresenta o maior percentual de carbono, o que mostra que ele apresenta maior potencial energético. O *blend* sintético apresentou resultados de análise elementar como função da proporção que cada componente tem no *blend*, seguindo a Tabela 4.5.

Tabela 4.9: Análise elementar para os componentes do RSU (%).

	C	H	N	O	S	H/C	O/C
Orgânico	18,01	2,98	1,51	77,33	0,17	1,97	3,22
Papelão	41,88	6,94	0,26	50,83	0,08	1,98	0,91
Papel	30,68	5,30	0,17	63,82	0,03	2,05	1,56
Plástico	83,07	16,54	0,19	0,05	0,15	2,38	0,0004
Blend	33,76	6,16	1,06	58,87	0,15	2,17	1,31

O *blend* híbrido torrefado 80/20 apresentou maior percentual de carbono, o que confirma o fato dele ter sido a amostra com maior PCS, já que a quantidade de carbono fixo está diretamente relacionada com a energia disponível da amostra (Tabela 4.10).

Tabela 4.10: Análise elementar para as amostras de blend híbrido (%).

	C	H	N	O	H/C	O/C
N70_30	41,57	6,92	0,76	51,15	1,98	0,92
N80_20	42,68	7,03	0,72	50,05	1,96	0,88
T70_30	47,44	5,98	0,88	46,22	1,50	0,73
T80_20	49,39	5,95	0,86	44,41	1,44	0,68

4.3 Gaseificação

O modelo de equilíbrio termodinâmico usado para simular a gaseificação tem como resultado as porcentagens dos gases que compõem o gás síntese (CO , CO_2 e H_2O), a eficiência de gás frio e o poder calorífico inferior. Foram obtidos esses valores para cada uma das amostras e condições, afim de ser analisado qual parâmetro influência no rendimento de cada componente.

O rendimento de CO ao longo da temperatura de gaseificação depende do agente gaseificante. Considerando a atmosfera composta somente por ar, o teor de monóxido de carbono é maior, mas o aumento da temperatura desfavorece sua produção nas amostras torrefadas (Figura 4.5a). Já para as outras duas atmosferas, que apresentam vapor em sua composição, os valores de CO são menores, mas o rendimento é crescente até 900°C . É possível ver na Figura 4.5a que as amostras com 100% de biomassa torrefada apresentam valores maiores de CO em relação aos outros *blends*, por possuírem em sua composição mais carbono como demonstrado nas Tabelas 4.8 e 4.10.

Tendo em conta as amostras in natura, menores porcentagens de produção de CO são vistas em relação às torrefadas, o que tem relação direta com o baixo teor de carbono fixo em suas composições. O ar como agente gaseificante também proporciona maior rendimento para essas amostras (Figura 4.4a), dessa forma conforme aumenta a proporção de vapor, menores são os rendimentos. As amostras in natura que apresentaram maiores valores de CO foram a amostras 80/20, o que segue a análise elementar, tendo a maior taxa de produção na faixa de temperatura de 900°C .

A taxa de produção de H_2 cai com o aumento de temperatura independente da composição da atmosfera e da amostra (Figuras 4.4b e 4.5b). O maior teor de vapor na atmosfera favorece a formação de H_2 tanto para as amostras in natura quanto para as amostras torrefadas. As amostras formadas por compostos torrefados apresentam menores valores de H_2 , uma vez que a torrefação libera voláteis e diminui o teor de hidrogênio nas amostras. A produção de H_2 nas amostras torrefadas foi maior para a amostra 70/30, em todas as atmosferas, obtendo o maior valor na atmosfera com vapor e ar 0,50. Já os valores das amostras in natura foram muito semelhantes na atmosfera com ar, mas na atmosfera com vapor os valores de 80/20 e 70/30 foram maiores.

O rendimento de CO_2 das amostras in natura cai independentemente da atmosfera, de acordo com o aumento da temperatura. Em comparação com as amostras torrefadas, o valor

de CO₂ natural é maior (Figuras 4.4c e 4.5c). Analisando as atmosferas, a produção de CO₂ para as amostras torrefadas nas atmosferas com vapor cai com o aumento da temperatura. Já considerando a atmosfera somente com ar, as amostras torrefadas se comportam de uma forma diferente com o aumento da temperatura. Assim sendo, a amostra com 100% de biomassa torrefada, que tem menor porcentagem de CO₂, exibe um aumento de CO₂ com o aumento da temperatura, no entanto para as amostras 70/30 e 80/20 a produção de dióxido de carbono é quase constante. É possível ver que a formação de CO₂ é favorecida com o aumento do teor de vapor na atmosfera, sendo o maior valor para a amostra torrefada híbrida 70/30. Para as amostras in natura nas atmosferas com vapor, as híbridas 70/30 in natura apresentam os maiores resultados, e para a atmosfera com ar, o *blend* lignocelulósico in natura exibe maior produção de CO₂.

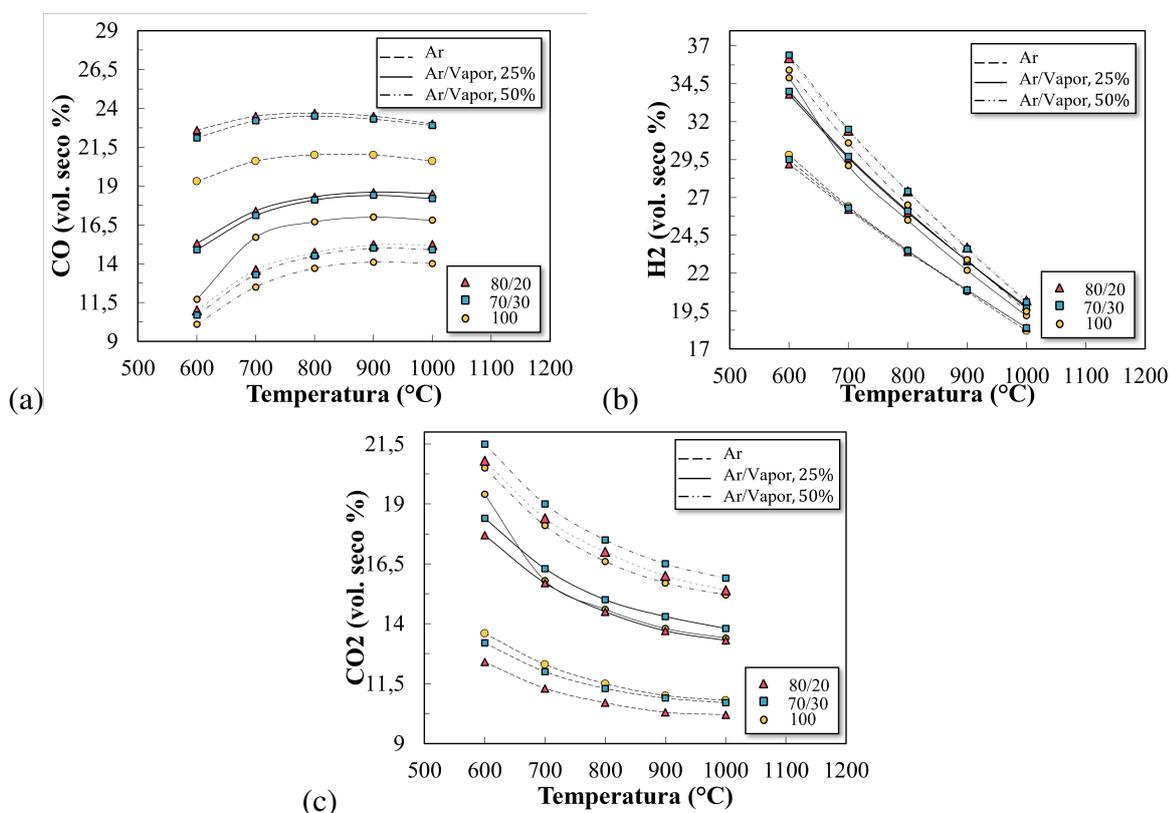


Figura 4.4: Porcentagem de (a) CO (b) H₂ e (c) CO₂ do syngas das amostras in natura em função da temperatura de gaseificação para as três atmosferas diferentes.

A razão H₂/CO diminui com o aumento da temperatura de gaseificação tanto para as amostras in natura quanto para as torrefadas e, conforme aumenta o vapor na atmosfera, aumenta essa razão. As amostras in natura possuem maiores razões H₂/CO, uma vez que a torrefação libera os voláteis como o hidrogênio (Figuras 4.6a e 4.7a). Para as amostras torrefadas, o maior valor de hidrogênio é para o *blend* híbrido 70/30, o que segue a análise elementar, já para as amostras in natura a maior razão é obtida pela amostra de poda in natura. Segundo [Dry 2002], o syngas só pode ser usado diretamente no método Fischer-Tropsch quando as razões de H₂/CO estão entre os valores de 2 e 3.

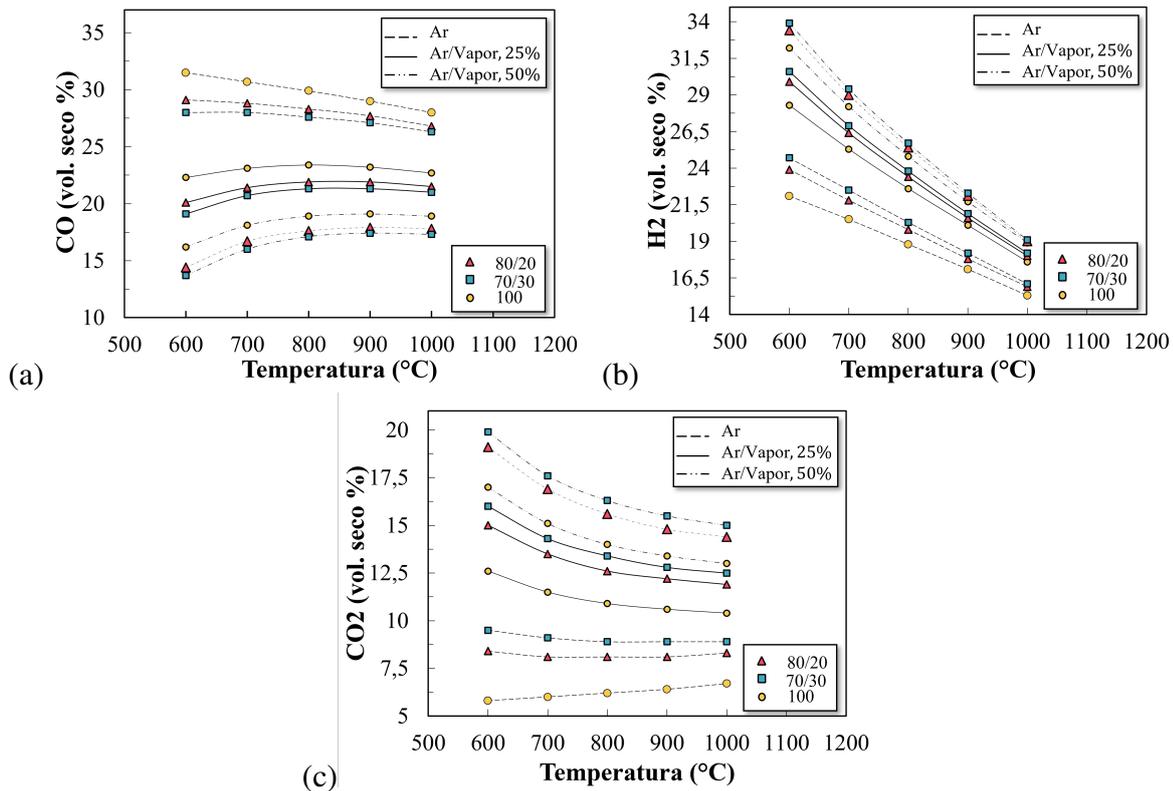


Figura 4.5: Porcentagem de (a) CO (b) H₂ e (c) CO₂ do syngas das amostras torrefadas em função da temperatura de gaseificação para as três atmosferas diferentes.

O poder calorífico inferior diminui com o aumento da temperatura para amostras torrefadas e in natura em todas as atmosferas. O uso do ar como agente gaseificante possibilita maiores valores de poder calorífico, como pode ser visto nas Figuras 4.6b e 4.7b. A comparação dos resultados para as amostras in natura e torrefadas mostra que devido a maior concentração de carbono em sua composição as amostras torrefadas dispõem de valores mais elevados de PCI. As amostras que apresentaram melhores resultados foram a mistura de poda torrefada a 600°C na atmosfera ar e o *blend* híbrido 80/20 in natura também a 600°C na atmosfera a ar. As amostras apresentam um comportamento que difere dos resultados obtidos por [Bach et al. 2019], que mostra o aumento do poder calorífico inferior com o aumento da temperatura de gaseificação, mas concordaram com os resultados de [Simões Santana et al. 2021].

Levando em conta a eficiência de gás frio (CGE) ao longo do processo de gaseificação, há um decréscimo com o aumento da temperatura, no entanto, maiores rendimento são vistos para as amostras torrefadas (Figura 4.7c). Assim como para o poder calorífico inferior, eficiências maiores são obtidas na atmosfera só com ar, e conforme há a inserção de vapor nesse meio menores são os valores. As amostras com maiores eficiência foram o *blend* de poda torrefado e a mistura híbrida 80/20 in natura.

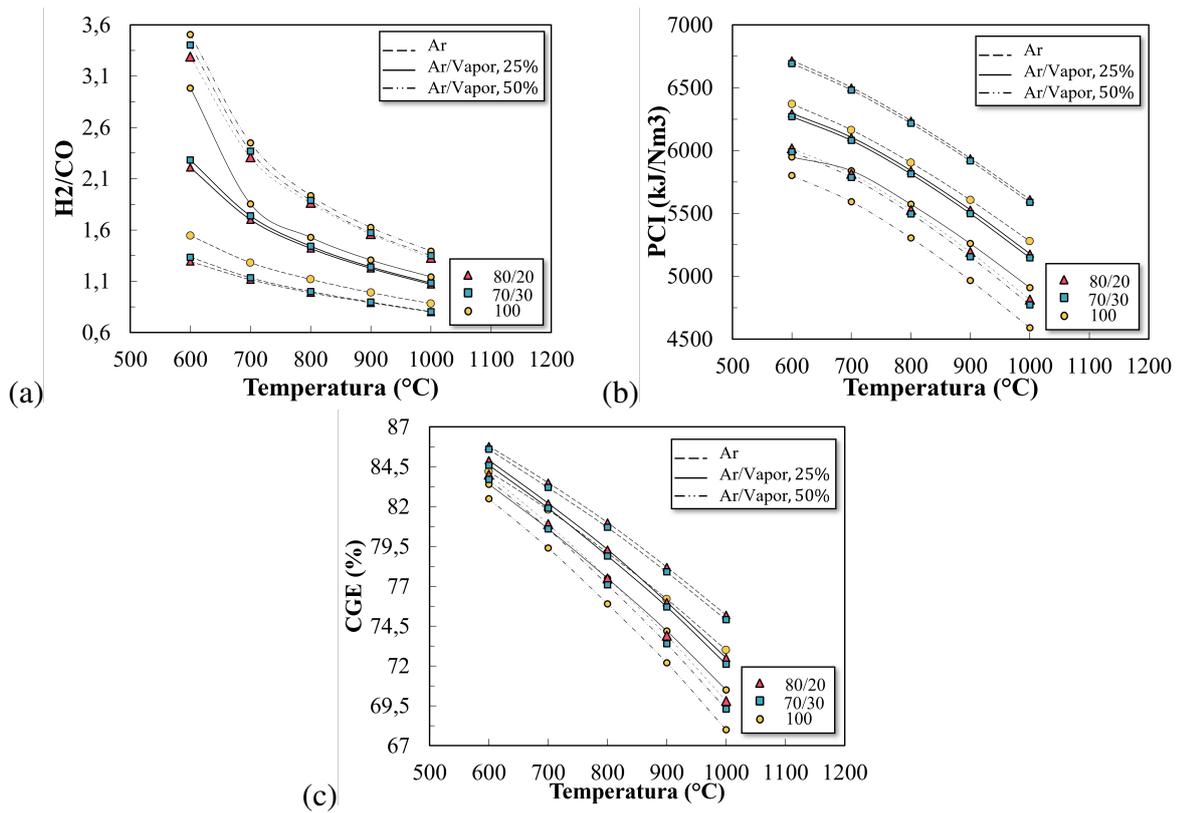


Figura 4.6: Razão de (a) H_2/CO , valor de (b) PCI e (c) CGE do syngas das amostras in natura em função da temperatura de gaseificação para as três atmosferas diferentes.

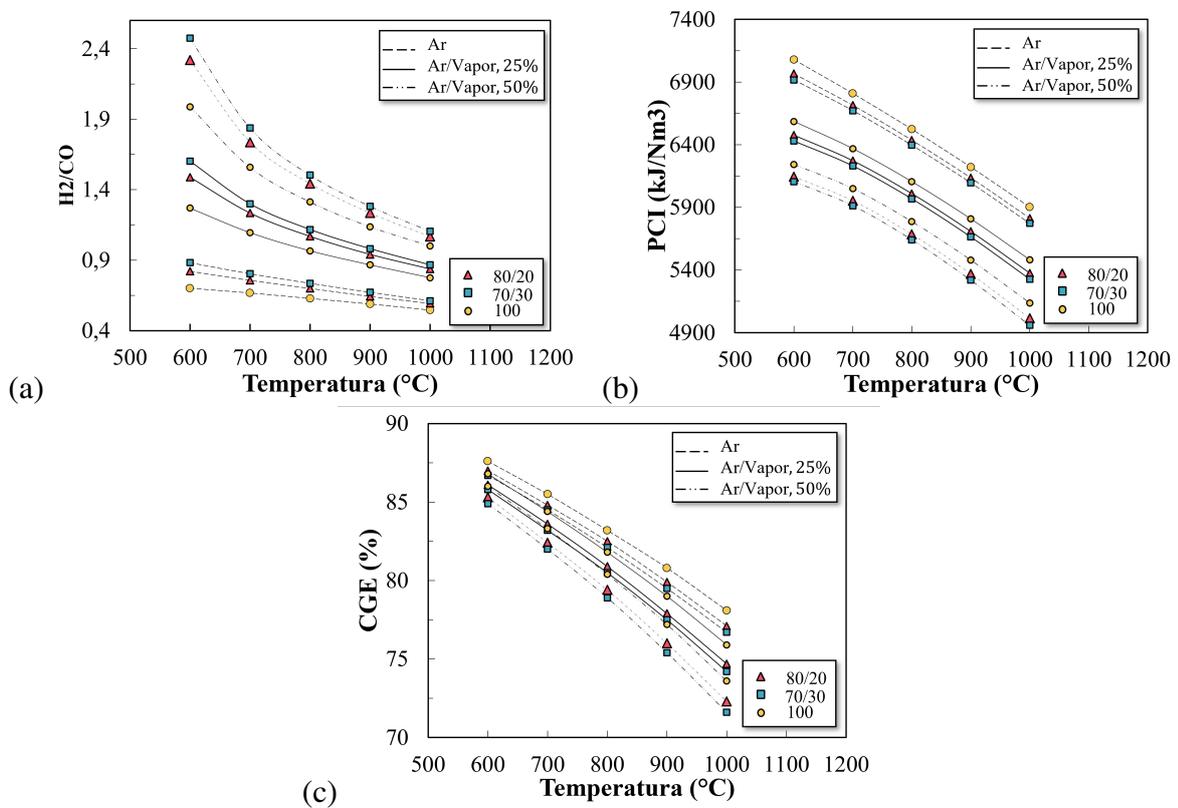


Figura 4.7: Razão de (a) H_2/CO , valor de (b) PCI e (c) CGE do syngas das amostras torrefe-das em função da temperatura de gaseificação para as três atmosferas diferentes.

4.3.1 Balanço energético

O balanço energético de todas as análises é calculado pelo próprio *software*. São obtidos os valores de energia fornecidos para a entrada, sendo possível notar que quanto maior a temperatura do processo de gaseificação maior será a energia demandada. O pré-aquecimento da amostra é zero, uma vez que ela entra em temperatura ambiente (25°C), mas há o pré-aquecimento do ar e do vapor, quando ele for usado, que são aquecidos de 25°C até 350°C. É dado como resultado a energia interna do gás produzido, a energia necessária para o resfriamento do gás, que sairá da temperatura do gaseificador para a temperatura ambiente, a energia presente no produto sólido gerado (foi fixado em 1% de produção de biocarvão) e a perda de calor que foi fixada em 3%.

Pensando no maior aproveitamento energético, é possível ainda realizar a conversão energética, por meio de processos termoquímicos, da energia contida no biocarvão gerado, já que ele apresenta altos teores de carbono em sua composição. Há também uma energia residual, que é a energia do resfriamento do gás que teoricamente é perdida, e pode ser reutilizada utilizando um recuperador de calor, aumentando, assim, a eficiência global do sistema. Os resultados do balanço energético estão expostos nas Tabelas I.1-I.3 no anexo.

4.4 Análise de critérios

As Tabelas 4.11-4.22 mostram os resultados da análise de multicritérios para as duas condições. A condição 1 considera 3 parâmetros de análise (PCI, CGE, H₂/CO) e a condição 2 são apenas 2 parâmetros (PCI, CGE). As tabelas mostram as taxas de sucesso de todas as amostras em diversas condições. A taxa de sucesso foi calculada usando a média dos resultados obtidos para a dominância forte, fraca e a distância métrica de todos os valores, sendo assim, a maior porcentagem significa maior nível de sucesso dessa amostra em relação às outras.

A condição 1 foi escolhida visando a otimização do syngas produzido para produção de hidrogênio, então as maiores taxas de sucesso estão relacionadas com maiores razões de H₂/CO, considerando também altos valores de poder calorífico e eficiência de gás frio. Já a condição 2 visa a queima direta do syngas, sendo preferível maiores valores de poder calorífico e eficiência. Então, foi feita a análise só das amostras in natura para cada uma das atmosferas consideradas, assim como, só das amostras torrefadas e, por fim, foi comparado os resultados das amostras in natura e torrefadas para as três atmosferas. Em cada análise feita é realizada uma nova comparação entre os resultados gerando diferentes taxas de sucesso.

As amostras nas tabelas foram identificadas usando siglas onde as primeiras letras são para identificar o tipo da amostra, o número e a letra subscritos são os parâmetros de gaseificação, sendo a temperatura e o agente gaseificante, respectivamente. Para se referir ao *blend*

de poda é usado somente a letra B e, para diferenciar, os *blends* híbridos foram chamados de BH. Para distinguir as amostras in natura e torrefadas foram usadas as letras N e T, respectivamente. Os números 80 e 70 demonstram as proporções de biomassa no *blend* híbrido. Por fim, o número subscrito é a temperatura do processo de gaseificação (600, 700, 800, 900 e 1000°C), e a letra é usada para identificar o agente gaseificante, sendo A a atmosfera com ar, V50 a atmosfera com ar e vapor com a razão vapor/biomassa = 0,5 e V25 a atmosfera com ar e vapor com a razão vapor/biomassa = 0,25.

Considerando que a realização da torrefação é um fator limitante para o processo, deve-se levar em consideração os dados das amostras in natura para as três atmosferas, sendo eles apresentados nas Tabelas 4.11, 4.14, 4.17. Há também uma comparação de todas as amostras in natura, apresentado na Tabela 4.20. Os *blends* híbridos in natura 80/20 e 70/30 a 600°C obtiveram as maiores taxas de sucesso em todas as atmosferas para as duas condições, em alguns casos a amostras 70/30 apresentaram a segunda maior taxa de sucesso, mas elas podem ser mais vantajosas caso o objetivo principal seja o maior consumo de RSU. Comparando as amostras in natura em todas as atmosferas é possível verificar que as que apresentaram maior taxa de sucesso na condição 1 foram as amostras com maior teor de vapor na atmosfera, já que isso proporciona a produção de H₂. Já para a condição 2 as maiores taxas de sucesso foram para a atmosfera com ar, que como visto nas Figuras 4.6b e 4.6c o ar como agente gaseificante promove maiores valores de PCI e CGE.

Tabela 4.11: Análise de critérios das condições 1 e 2 para as amostras in natura com agente gaseificante ar.

Condição 1		Condição 2	
BHN70 _{600,A}	85,6%	BHN80 _{600,A}	95,6%
BHN80 _{600,A}	84,2%	BHN70 _{600,A}	92,8%
BN _{600,A}	83,7%	BHN80 _{700,A}	80,4%
BHN70 _{700,A}	67,2%	BHN70 _{700,A}	77,8%
BN _{700,A}	65,4%	BN _{600,A}	75,6%
BHN80 _{700,A}	64,1%	BHN80 _{800,A}	61,7%
BN _{800,A}	48,0%	BN _{700,A}	57,9%
BHN70 _{800,A}	47,3%	BHN70 _{800,A}	56,9%
BHN80 _{800,A}	44,4%	BHN80 _{900,A}	41,7%
BN _{900,A}	30,3%	BHN70 _{900,A}	39,0%
BHN70 _{900,A}	27,6%	BN _{800,A}	38,6%
BHN80 _{900,A}	27,1%	BHN80 _{1000,A}	20,3%
BN _{1000,A}	9,8%	BN _{900,A}	20,2%
BHN80 _{1000,A}	6,7%	BHN70 _{1000,A}	13,0%
BHN70 _{1000,A}	4,7%	BN _{1000,A}	0,0%

É possível verificar nas Tabelas 4.13, 4.16 e 4.19 que ao comparar as amostras in natura e as torrefadas nas três atmosferas as amostras com as maiores taxas de sucesso na condição 1, que visa a otimização do syngas para produzir hidrogênio, são as in natura. Já em relação a segunda condição, as amostras que apresentam uma maior vantagem são as amostras torrefadas que possuem maior poder calorífico e eficiência, devido ao alto teor de carbono fixo

Tabela 4.12: Análise de critérios das condições 1 e 2 para as amostras torrefadas com agente gaseificante ar.

Condição 1		Condição 2	
BHT70 _{600,A}	90,0%	BT _{600,A}	95,6%
BHT80 _{600,A}	87,1%	BHT80 _{600,A}	88,8%
BHT70 _{700,A}	74,5%	BHT70 _{600,A}	85,5%
BHT80 _{700,A}	71,0%	BT _{700,A}	76,3%
BT _{600,A}	70,6%	BHT80 _{700,A}	69,8%
BHT70 _{800,A}	57,8%	BHT70 _{700,A}	66,6%
BT _{700,A}	53,8%	BT _{800,A}	56,4%
BHT80 _{800,A}	52,4%	BHT80 _{800,A}	49,7%
BT _{800,A}	38,3%	BHT70 _{800,A}	44,2%
BHT70 _{900,A}	38,2%	BT _{900,A}	35,2%
BHT80 _{900,A}	32,9%	BHT80 _{900,A}	28,4%
BT _{900,A}	19,8%	BHT70 _{900,A}	22,9%
BHT70 _{1000,A}	15,6%	BT _{1000,A}	12,9%
BHT80 _{1000,A}	13,3%	BHT80 _{1000,A}	5,6%
BT _{1000,A}	4,4%	BHT70 _{1000,A}	2,2%

(Figuras 4.7b e 4.7c). Isto posto, caso o foco seja o maior rendimento de H₂/CO não se faz necessário o gasto energético com o pré-tratamento de torrefação, já que amostras in natura apresentam maiores teores de hidrogênio.

O agente gaseificante mais comum é o ar, no entanto o uso de vapor na atmosfera, que requer uma energia adicional referente ao pré-aquecimento do vapor, favorece a formação de mais hidrogênio. Dessa forma, comparando todas as amostras em todas as condições escolhidas (Tabela 4.22) é possível verificar que as melhores soluções, considerando a primeira condição, são o *blend* híbrido in natura 70/30 a 600°C na atmosfera com vapor/ar = 0,25 e o *blend* híbrido in natura 80/20 também a 600°C na atmosfera com vapor/ar = 0,25. Apesar da maior quantidade de vapor produzir mais hidrogênio, a atmosfera com vapor/ar = 0,50 não obteve maiores taxa de sucesso em relação a atmosfera com 0,25 de vapor, isso se deve ao fato de que também foram considerados os valores de eficiência e poder calorífico, e como pode ser visto nas Figuras 4.6b e 4.6c, grande quantidade de vapor na atmosfera desfavorece o PCI e o CGE.

Já considerando a condição 2 (Tabela 4.22), as amostras com maior taxa de sucesso foram o *blend* torrefado de poda a 600°C na atmosfera com ar e o *blend* híbrido torrefado 80/20 a 600°C na atmosfera com ar. É possível constatar novamente que as maiores porcentagens aconteceram na atmosfera com ar, diferentemente da condição 1, já que o ar proporciona maiores valores de PCI e CGE. Dessa forma, se o objetivo principal for a queima direta do gás síntese não é necessário, então, o gasto de energia para o pré-aquecimento do vapor.

A partir de todas as análises, é possível verificar que as maiores taxas de sucesso foram para os processos de gaseificação com temperaturas mais baixas, como 600°C. Sendo assim, não é necessário maiores gastos energéticos para obter melhores resultados, já que

temperaturas mais altas apresentam valores de taxa de sucesso mais baixos. Pode-se concluir, também, que em cada uma das comparações os *blends* híbridos estavam como uma das melhores opções, ao se considerar os três parâmetros escolhidos PCI, CGE e H₂/CO. Para a condição 2, as misturas híbridas apresentam ótimas taxas de sucesso sendo, no entanto, mais baixas que a mistura de poda torrefada, que, de acordo com as Figuras 4.7b e 4.7c, apresenta a maiores valores de PCI e CGE que as duas amostras híbridas.

Tendo em vista a Tabela 4.22, é possível considerar o caso da condição 2 com a segunda maior porcentagem de sucesso (BHT80_{600,A}), sendo o foco principal a mitigação do RSU. Com o objetivo de consumir mais RSU é possível ainda escolher a terceira opção que é o *blend* híbrido com 30% de RSU sintético que apresenta 96,7% de sucesso em relação às outras amostras.

Tabela 4.13: Análise de critérios das condições 1 e 2 comparando as amostras in natura e torrefadas com agente gaseificante ar.

Condição 1		Condição 2	
BHN80 _{600,A}	87,5%	BT _{600,A}	97,8%
BHN70 _{600,A}	87,0%	BHT80 _{600,A}	94,0%
BN _{600,A}	80,2%	BHT70 _{600,A}	92,2%
BHN70 _{700,A}	75,5%	BT _{700,A}	87,2%
BHN80 _{700,A}	74,0%	BHN80 _{600,A}	84,7%
BN _{700,A}	70,6%	BHN70 _{600,A}	82,1%
BHT70 _{600,A}	67,4%	BHT80 _{700,A}	81,4%
BHT80 _{600,A}	65,1%	BHT70 _{700,A}	77,4%
BHN70 _{800,A}	63,2%	BT _{800,A}	70,6%
BHN80 _{800,A}	61,8%	BHN80 _{700,A}	69,1%
BN _{800,A}	59,8%	BHN70 _{700,A}	67,7%
BHT70 _{700,A}	56,5%	BN _{600,A}	63,6%
BHT80 _{700,A}	54,4%	BHT80 _{800,A}	62,4%
BT _{600,A}	53,7%	BHT70 _{800,A}	59,5%
BHN70 _{900,A}	49,9%	BHN80 _{800,A}	52,4%
BHN80 _{900,A}	49,6%	BN _{700,A}	50,0%
BN _{900,A}	47,5%	BHN70 _{800,A}	49,8%
BT _{700,A}	45,0%	BT _{900,A}	49,8%
BHT70 _{800,A}	43,3%	BHT80 _{900,A}	42,7%
BHT80 _{800,A}	40,2%	BHT70 _{900,A}	39,8%
BN _{1000,A}	37,2%	BHN80 _{900,A}	33,5%
BT _{800,A}	34,6%	BN _{800,A}	32,8%
BHN80 _{1000,A}	32,6%	BHN70 _{900,A}	32,0%
BHN70 _{1000,A}	31,6%	BT _{1000,A}	30,5%
BHT70 _{900,A}	28,5%	BHT80 _{1000,A}	23,1%
BHT80 _{900,A}	25,5%	BHT70 _{1000,A}	21,2%
BT _{900,A}	20,5%	BHN80 _{1000,A}	13,4%
BHT70 _{1000,A}	13,3%	BN _{900,A}	13,3%
BHT80 _{1000,A}	11,8%	BHN70 _{1000,A}	9,5%
BT _{1000,A}	10,0%	BN _{1000,A}	0,0%

Tabela 4.14: Análise de critérios das condições 1 e 2 para as amostras in natura com agente gaseificante vapor/ar = 0,25.

Condição 1		Condição 2	
BHN70 _{600,V25}	85,5%	BHN80 _{600,V25}	62,2%
BHN80 _{600,V25}	84,7%	BHN70 _{600,V25}	60,0%
BN _{600,V25}	83,5%	BHN80 _{700,V25}	55,9%
BHN70 _{700,V25}	66,8%	BN _{600,V25}	53,7%
BN _{700,V25}	66,4%	BHN70 _{700,V25}	53,7%
BHN80 _{700,V25}	66,1%	BN _{700,V25}	51,9%
BN _{800,V25}	46,5%	BHN80 _{800,V25}	49,7%
BHN80 _{800,V25}	46,4%	BHN70 _{800,V25}	47,8%
BHN70 _{800,V25}	44,7%	BN _{800,V25}	45,7%
BN _{900,V25}	26,8%	BHN80 _{900,V25}	43,7%
BHN70 _{900,V25}	25,0%	BHN70 _{900,V25}	41,4%
BHN80 _{900,V25}	24,6%	BN _{900,V25}	39,5%
BN _{1000,V25}	6,9%	BHN80 _{1000,V25}	37,5%
BHN70 _{1000,V25}	4,9%	BHN70 _{1000,V25}	35,4%
BHN80 _{1000,V25}	4,4%	BN _{1000,V25}	33,3%

Tabela 4.15: Análise de critérios das condições 1 e 2 para as amostras torrefadas com agente gaseificante vapor/ar = 0,25.

Condição 1		Condição 2	
BHT70 _{600,V25}	89,9%	BT _{600,V25}	95,6%
BHT80 _{600,V25}	88,7%	BHT80 _{600,V25}	88,7%
BT _{600,V25}	80,8%	BHT70 _{600,V25}	83,2%
BHT70 _{700,V25}	72,6%	BT _{700,V25}	77,4%
BHT80 _{700,V25}	68,5%	BHT80 _{700,V25}	70,7%
BT _{700,V25}	61,2%	BHT70 _{700,V25}	67,5%
BHT70 _{800,V25}	53,0%	BT _{800,V25}	57,8%
BHT80 _{800,V25}	48,8%	BHT80 _{800,V25}	50,9%
BT _{800,V25}	41,8%	BHT70 _{800,V25}	47,6%
BHT70 _{900,V25}	33,3%	BT _{900,V25}	36,7%
BHT80 _{900,V25}	29,0%	BHT80 _{900,V25}	29,4%
BT _{900,V25}	22,4%	BHT70 _{900,V25}	23,7%
BHT70 _{1000,V25}	13,0%	BT _{1000,V25}	13,8%
BHT80 _{1000,V25}	8,9%	BHT80 _{1000,V25}	6,0%
BT _{1000,V25}	4,4%	BHT70 _{1000,V25}	0,0%

Tabela 4.16: Análise de critérios das condições 1 e 2 comparando as amostras in natura e torrefadas com agente gaseificante vapor/ar = 0,25.

Condição 1		Condição 2	
BHN70 _{600,V25}	87,4%	BT _{600,V25}	97,8%
BHN80 _{600,V25}	86,9%	BHT80 _{600,V25}	93,9%
BN _{600,V25}	79,6%	BHT70 _{600,V25}	91,0%
BHT70 _{600,V25}	78,8%	BT _{700,V25}	87,8%
BHT80 _{600,V25}	76,0%	BHN80 _{600,V25}	85,5%
BHN80 _{700,V25}	74,5%	BHN70 _{600,V25}	84,0%
BHN70 _{700,V25}	73,7%	BHT80 _{700,V25}	80,7%
BN _{700,V25}	70,1%	BHT70 _{700,V25}	77,8%
BT _{600,V25}	67,6%	BHN80 _{700,V25}	71,3%
BHT70 _{700,V25}	61,5%	BT _{800,V25}	70,1%
BHT80 _{700,V25}	59,0%	BHN70 _{700,V25}	68,6%
BHN80 _{800,V25}	58,1%	BN _{600,V25}	66,2%
BHN70 _{800,V25}	57,3%	BHT80 _{800,V25}	62,8%
BN _{800,V25}	56,0%	BHT70 _{800,V25}	61,0%
BT _{700,V25}	53,2%	BN _{700,V25}	55,3%
BHT70 _{800,V25}	44,9%	BHN80 _{800,V25}	53,1%
BHN70 _{900,V25}	41,0%	BHN70 _{800,V25}	49,2%
BN _{900,V25}	40,7%	BT _{900,V25}	48,0%
BHT80 _{800,V25}	40,2%	BHT80 _{900,V25}	42,7%
BHN80 _{900,V25}	39,6%	BHT70 _{900,V25}	39,6%
BT _{800,V25}	37,8%	BN _{800,V25}	36,7%
BHT70 _{900,V25}	27,2%	BHN80 _{900,V25}	32,4%
BN _{1000,V25}	26,4%	BHN70 _{900,V25}	30,6%
BHT80 _{900,V25}	24,6%	BT _{1000,V25}	29,2%
BHN70 _{1000,V25}	23,2%	BHT80 _{1000,V25}	22,5%
BHN80 _{1000,V25}	23,0%	BHT70 _{1000,V25}	19,2%
BT _{900,V25}	21,4%	BN _{900,V25}	16,5%
BHT70 _{1000,V25}	12,4%	BHN80 _{1000,V25}	11,3%
BHT80 _{1000,V25}	9,9%	BHN70 _{1000,V25}	8,2%
BT _{1000,V25}	8,9%	BN _{1000,V25}	0,0%

Tabela 4.17: Análise de critérios das condições 1 e 2 para as amostras in natura com agente gaseificante vapor/ar = 0,50.

Condição 1		Condição 2	
BHN70 _{600,V50}	90,5%	BHN80 _{600,V50}	95,6%
BHN80 _{600,V50}	89,8%	BHN70 _{600,V50}	92,9%
BN _{600,V50}	86,4%	BHN80 _{700,V50}	80,7%
BHN80 _{700,V50}	69,9%	BN _{600,V50}	80,5%
BN _{700,V50}	68,8%	BHN70 _{700,V50}	75,7%
BHN70 _{700,V50}	68,4%	BN _{700,V50}	65,2%
BN _{800,V50}	47,7%	BHN80 _{800,V50}	59,5%
BHN70 _{800,V50}	47,5%	BHN70 _{800,V50}	54,3%
BHN80 _{800,V50}	47,1%	BN _{800,V50}	45,6%
BN _{900,V50}	26,8%	BHN80 _{900,V50}	38,5%
BHN70 _{900,V50}	26,4%	BHN70 _{900,V50}	33,2%
BHN80 _{900,V50}	26,2%	BN _{900,V50}	24,1%
BN _{1000,V50}	5,1%	BHN80 _{1000,V50}	15,4%
BHN70 _{1000,V50}	4,9%	BHN70 _{1000,V50}	9,8%
BHN80 _{1000,V50}	4,4%	BN _{1000,V50}	0,0%

Tabela 4.18: Análise de critérios das condições 1 e 2 para as amostras torrefadas com agente gaseificante vapor/ar = 0,50.

Condição 1		Condição 2	
BHT70 _{600,V50}	89,9%	BT _{600,V50}	95,6%
BHT80 _{600,V50}	89,5%	BHT80 _{600,V50}	89,1%
BT _{600,V50}	85,7%	BHT70 _{600,V50}	83,8%
BHT70 _{700,V50}	69,9%	BT _{700,V50}	78,1%
BHT80 _{700,V50}	68,2%	BHT80 _{700,V50}	71,5%
BT _{700,V50}	64,7%	BHT70 _{700,V50}	66,1%
BHT70 _{800,V50}	49,7%	BT _{800,V50}	58,7%
BHT80 _{800,V50}	48,3%	BHT80 _{800,V50}	51,8%
BT _{800,V50}	44,7%	BHT70 _{800,V50}	46,2%
BHT70 _{900,V50}	29,7%	BT _{900,V50}	37,7%
BHT80 _{900,V50}	28,3%	BHT80 _{900,V50}	30,1%
BT _{900,V50}	24,7%	BHT70 _{900,V50}	24,3%
BHT70 _{1000,V50}	8,9%	BT _{1000,V50}	14,6%
BHT80 _{1000,V50}	7,5%	BHT80 _{1000,V50}	6,2%
BT _{1000,V50}	4,4%	BHT70 _{1000,V50}	0,0%

Tabela 4.19: Análise de critérios das condições 1 e 2 comparando as amostras in natura e torrefadas com agente gaseificante vapor/ar = 0,50.

Condição 1		Condição 2	
BHN80 _{600,V50}	89,3%	BT _{600,V50}	97,8%
BHN70 _{600,V50}	89,2%	BHT80 _{600,V50}	94,1%
BHT70 _{600,V50}	86,7%	BHT70 _{600,V50}	91,3%
BN _{600,V50}	84,3%	BHN80 _{600,V50}	86,6%
BHT80 _{600,V50}	83,3%	BT _{700,V50}	85,9%
BT _{600,V50}	78,8%	BHN70 _{600,V50}	85,0%
BHN70 _{700,V50}	74,4%	BHT80 _{700,V50}	79,9%
BHN80 _{700,V50}	74,0%	BHT70 _{700,V50}	75,9%
BN _{700,V50}	70,8%	BN _{600,V50}	74,1%
BHT70 _{700,V50}	64,7%	BHN80 _{700,V50}	72,1%
BHT80 _{700,V50}	63,2%	BHN70 _{700,V50}	69,4%
BT _{700,V50}	59,1%	BT _{800,V50}	69,4%
BHN70 _{800,V50}	57,0%	BHT80 _{800,V50}	62,0%
BHN80 _{800,V50}	56,8%	BN _{700,V50}	58,1%
BN _{800,V50}	53,4%	BHT70 _{800,V50}	57,9%
BHT70 _{800,V50}	45,6%	BHN80 _{800,V50}	52,5%
BHT80 _{800,V50}	44,4%	BHN70 _{800,V50}	49,6%
BT _{800,V50}	40,1%	BT _{900,V50}	48,2%
BHN70 _{900,V50}	39,4%	BHT80 _{900,V50}	42,7%
BHN80 _{900,V50}	39,3%	BN _{800,V50}	39,2%
BN _{900,V50}	37,1%	BHT70 _{900,V50}	38,3%
BHT70 _{900,V50}	26,8%	BHN80 _{900,V50}	32,4%
BHT80 _{900,V50}	25,5%	BHN70 _{900,V50}	29,4%
BT _{900,V50}	23,5%	BT _{1000,V50}	27,9%
BHN70 _{1000,V50}	20,3%	BHT80 _{1000,V50}	21,8%
BN _{1000,V50}	20,1%	BN _{900,V50}	18,4%
BHN80 _{1000,V50}	20,0%	BHT70 _{1000,V50}	16,0%
BHT70 _{1000,V50}	9,5%	BHN80 _{1000,V50}	10,4%
BHT80 _{1000,V50}	9,4%	BHN70 _{1000,V50}	7,0%
BT _{1000,V50}	7,8%	BN _{1000,V50}	0,0%

Tabela 4.20: Análise de critérios das condições 1 e 2 comparando todas as amostras in natura.

Condição 1		Condição 2	
BHN80 _{600,V50}	84,1%	BHN80 _{600,A}	98,5%
BHN70 _{600,V50}	84,0%	BHN70 _{600,A}	97,5%
BHN70 _{600,V25}	83,5%	BHN80 _{700,A}	89,5%
BHN80 _{600,V25}	83,0%	BN _{600,A}	88,7%
BN _{600,V25}	81,4%	BHN70 _{700,A}	88,5%
BN _{600,V50}	76,8%	BHN80 _{600,V25}	88,5%
BHN80 _{700,V50}	72,7%	BHN70 _{600,V25}	87,5%
BHN70 _{700,V50}	71,3%	BHN80 _{600,V50}	78,3%
BHN70 _{700,V25}	70,6%	BHN80 _{800,A}	77,4%
BHN80 _{700,V25}	70,2%	BN _{700,A}	77,2%
BN _{600,A}	69,7%	BHN70 _{600,V50}	77,2%
BN _{700,V50}	68,9%	BHN80 _{700,V25}	75,8%
BN _{700,V25}	67,0%	BHN70 _{800,A}	75,7%
BHN70 _{600,A}	64,0%	BHN70 _{700,V25}	74,7%
BHN80 _{600,A}	61,7%	BN _{600,V25}	73,7%
BHN80 _{800,V50}	58,7%	BN _{600,V50}	63,4%
BHN70 _{800,V50}	58,0%	BN _{700,V25}	63,3%
BN _{800,V50}	56,6%	BN _{800,A}	61,9%
BHN80 _{800,V25}	55,0%	BHN80 _{700,V50}	61,4%
BHN70 _{800,V25}	54,6%	BHN80 _{900,A}	60,9%
BN _{700,A}	54,0%	BHN80 _{800,V25}	60,3%
BHN70 _{700,A}	52,0%	BHN7 _{900,A}	59,9%
BHN80 _{700,A}	50,8%	BHN70 _{700,V50}	58,8%
BN _{800,V25}	50,3%	BHN70 _{800,V25}	56,2%
BHN80 _{900,V50}	44,3%	BN _{900,A}	45,0%
BN _{900,V50}	43,0%	BN _{800,V25}	44,5%
BHN70 _{800,A}	40,5%	BHN80 _{800,V50}	43,0%
BN _{800,A}	40,4%	BHN80 _{1000,A}	42,9%
BHN80 _{800,A}	39,4%	BHN80 _{900,V25}	40,1%
BHN80 _{900,V25}	36,1%	BHN70 _{800,V50}	39,6%
BN _{900,V25}	35,8%	BHN70 _{1000,A}	39,5%
BHN70 _{900,V25}	35,6%	BHN70 _{900,V25}	38,1%
BHN70 _{1000,V50}	30,8%	BN _{800,V50}	33,4%
BN _{1000,V50}	30,2%	BN _{900,V25}	27,5%
BHN80 _{1000,V50}	30,0%	BN _{1000,A}	26,3%
BHN70 _{900,A}	28,4%	BHN80 _{900,V50}	25,5%
BHN80 _{900,A}	28,1%	BHN70 _{900,V50}	21,9%
BN _{900,A}	26,7%	BHN80 _{1000,V25}	21,6%
BN _{1000,V25}	23,3%	BHN70 _{1000,V25}	18,8%
BHN80 _{1000,V25}	21,4%	BN _{900,V50}	14,7%
BHN70 _{1000,V25}	20,9%	BN _{1000,V25}	11,3%
BHN80 _{1000,A}	14,8%	BHN80 _{1000,V50}	7,9%
BHN70 _{1000,A}	13,5%	BHN70 _{1000,V50}	5,5%
BN _{1000,A}	12,7%	BN _{1000,V50}	0,0%

Tabela 4.21: Análise de critérios das condições 1 e 2 comparando todas as amostras torrefadas.

Condição 1		Condição 2	
BT _{600,V50}	83,2%	BT _{600,A}	98,5%
BHT70 _{600,V25}	82,1%	BHT80 _{600,A}	95,8%
BHT80 _{600,V50}	81,6%	BHT70 _{600,A}	94,5%
BHT70 _{600,V50}	80,7%	BT _{700,A}	88,7%
BHT80 _{600,V25}	80,3%	BT _{600,V25}	87,5%
BT _{600,V25}	75,5%	BHT80 _{700,A}	84,7%
BHT70 _{700,V50}	71,9%	BHT70 _{700,A}	83,4%
BHT80 _{700,V50}	71,7%	BHT80 _{600,V25}	82,4%
BT _{700,V50}	71,6%	BHT70 _{600,V25}	78,8%
BHT70 _{700,V25}	70,6%	BT _{800,A}	77,1%
BHT80 _{700,V25}	68,2%	BT _{600,V50}	74,7%
BT _{700,V25}	63,6%	BT _{700,V25}	74,3%
BHT70 _{600,A}	60,7%	BHT80 _{800,A}	71,5%
BT _{800,V50}	59,9%	BHT80 _{600,V50}	69,6%
BHT70 _{800,V50}	59,8%	BHT80 _{700,V25}	69,2%
BHT80 _{800,V50}	59,5%	BHT70 _{800,A}	67,9%
BHT80 _{600,A}	56,6%	BHT70 _{700,V25}	67,2%
BHT70 _{800,V25}	56,5%	BHT70 _{600,V50}	65,4%
BHT80 _{800,V25}	54,1%	BT _{900,A}	59,6%
BHT70 _{700,A}	52,2%	BT _{700,V50}	59,3%
BT _{800,V25}	51,8%	BT _{800,V25}	58,0%
BHT80 _{700,A}	49,7%	BHT80 _{900,A}	53,9%
BHT70 _{900,V50}	48,8%	BHT80 _{700,V50}	52,7%
BT _{600,A}	48,7%	BHT80 _{800,V25}	51,3%
BHT80 _{900,V50}	48,4%	BHT70 _{900,A}	50,4%
BT _{900,V50}	47,3%	BHT70 _{800,V25}	49,9%
BHT70 _{800,A}	42,9%	BHT70 _{700,V50}	49,8%
BT _{700,A}	42,6%	BT _{800,V50}	42,6%
BHT70 _{900,V25}	41,6%	BT _{1000,A}	40,0%
BHT80 _{800,A}	41,2%	BT _{900,V25}	38,5%
BHT80 _{900,V25}	40,7%	BHT80 _{1000,A}	35,6%
BHT70 _{1000,V50}	38,8%	BHT80 _{800,V50}	34,9%
BT _{900,V25}	38,6%	BHT80 _{900,V25}	33,1%
BHT80 _{1000,V50}	37,0%	BHT70 _{1000,A}	32,7%
BT _{1000,V50}	36,1%	BHT70 _{800,V50}	31,2%
BT _{800,A}	36,0%	BHT70 _{900,V25}	29,4%
BHT70 _{1000,V25}	30,9%	BT _{900,V50}	23,1%
BHT70 _{900,A}	30,2%	BT _{1000,V25}	21,7%
BHT80 _{1000,V25}	30,0%	BHT80 _{900,V50}	17,3%
BHT80 _{900,A}	29,4%	BHT80 _{1000,V25}	16,0%
BT _{1000,V25}	27,2%	BHT70 _{900,V50}	13,4%
BT _{900,A}	24,6%	BHT70 _{1000,V25}	12,8%
BHT80 _{1000,A}	16,7%	BT _{1000,V50}	6,8%
BHT70 _{1000,A}	16,4%	BHT80 _{1000,V50}	2,7%
BT _{1000,A}	12,6%	BHT70 _{1000,V50}	0,0%

Tabela 4.22: Análise de critérios das condições 1 e 2 comparando todas as amostras e condições.

Condição 1				Condição 2			
BHN70 _{600,V25}	84,7%	BHN70 _{900,V50}	51,6%	BT _{600,A}	99,3%	BN _{800,A}	53,7%
BHN80 _{600,V25}	84,5%	BN _{800,A}	51,2%	BHT80 _{600,A}	97,5%	BHN80 _{900,A}	52,3%
BHT70 _{600,V50}	83,2%	BHT80 _{800,V25}	50,7%	BHT70 _{600,A}	96,7%	BHN70 _{700,V50}	52,2%
BT _{600,V50}	83,1%	BN _{900,V50}	50,3%	BT _{700,A}	93,5%	BT _{800,V50}	52,2%
BHT80 _{600,V50}	82,6%	BT _{800,V25}	49,7%	BHN80 _{600,A}	92,2%	BHN80 _{800,V25}	52,1%
BHN80 _{600,V50}	81,8%	BHT70 _{700,A}	48,6%	BT _{600,V25}	91,3%	BHN70 _{900,A}	51,6%
BHN70 _{600,V50}	81,3%	BHT80 _{700,A}	46,6%	BHN70 _{600,A}	91,2%	BT _{1000,A}	50,7%
BN _{600,V25}	79,2%	BHN70 _{900,V25}	46,3%	BHT80 _{700,A}	90,4%	BHN70 _{800,V25}	49,2%
BHT70 _{600,V25}	78,9%	BHN80 _{900,V25}	45,8%	BHT70 _{700,A}	88,8%	BT _{900,V25}	48,0%
BHT80 _{600,V25}	76,1%	BN _{900,V25}	45,5%	BHT80 _{600,V25}	87,6%	BHT80 _{800,V50}	46,0%
BN _{600,A}	75,8%	BHT70 _{900,V50}	45,4%	BHT70 _{600,V25}	85,6%	BHT80 _{1000,A}	44,7%
BN _{600,V50}	75,3%	BT _{600,A}	45,0%	BT _{800,A}	83,3%	BHT80 _{900,V25}	43,8%
BHN80 _{700,V25}	74,3%	BHT80 _{900,V50}	44,6%	BHN80 _{700,A}	82,7%	BN _{700,V50}	42,9%
BHN70 _{600,A}	74,1%	BT _{900,V50}	43,4%	BT _{700,V25}	82,4%	BHT70 _{800,V50}	42,8%
BHN80 _{700,V50}	73,4%	BHN70 _{1000,V50}	41,7%	BHN70 _{700,A}	82,1%	BHT70 _{1000,A}	42,4%
BHN70 _{700,V25}	73,4%	BHN80 _{1000,V50}	41,3%	BT _{600,V50}	81,8%	BHT70 _{900,V25}	40,9%
BHN80 _{600,A}	72,4%	BHT70 _{800,A}	41,3%	BHN80 _{600,V25}	80,9%	BN _{800,V25}	37,5%
BHN70 _{700,V50}	72,3%	BT _{700,A}	41,3%	BHN70 _{600,V25}	80,2%	BHN80 _{800,V50}	36,5%
BHT80 _{700,V50}	71,7%	BN _{1000,V50}	41,0%	BN _{600,A}	80,2%	BN _{900,A}	36,5%
BHT70 _{700,V50}	71,1%	BHN70 _{900,A}	40,9%	BHT80 _{800,A}	78,3%	BHN80 _{1000,A}	34,7%
BT _{600,V25}	70,6%	BHN80 _{900,A}	40,7%	BHT80 _{600,V50}	76,9%	BHN80 _{900,V25}	33,5%
BN _{700,V25}	70,3%	BHT70 _{900,V25}	38,4%	BHT70 _{800,A}	76,0%	BT _{900,V50}	32,8%
BN _{700,V50}	68,5%	BN _{900,A}	38,2%	BHT70 _{700,V25}	75,0%	BHN70 _{1000,A}	32,5%
BHT70 _{700,V25}	66,1%	BHT80 _{900,V25}	37,5%	BHT70 _{600,V50}	74,7%	BHN70 _{900,V25}	32,3%
BHT80 _{700,V25}	64,2%	BT _{900,V25}	36,4%	BHN80 _{800,A}	69,5%	BT _{1000,V25}	31,4%
BN _{700,A}	64,0%	BT _{800,A}	36,3%	BN _{700,A}	69,4%	BHT80 _{900,V50}	28,5%
BHN70 _{700,A}	63,8%	BN _{1000,V25}	35,7%	BHN80 _{600,V50}	69,2%	BN _{800,V50}	26,5%
BHN80 _{800,V50}	62,8%	BHN80 _{1000,V25}	34,1%	BT _{700,V50}	68,8%	BHT80 _{1000,V25}	26,4%
BHN80 _{700,A}	62,7%	BHN70 _{1000,V25}	33,5%	BHN70 _{800,A}	68,2%	BHT70 _{900,V50}	25,2%
BHN70 _{800,V50}	62,0%	BHT70 _{1000,V50}	33,4%	BT _{900,A}	68,2%	BHT70 _{1000,V25}	24,2%
BHN80 _{800,V25}	61,0%	BHT80 _{1000,V50}	32,6%	BHN70 _{600,V50}	68,1%	BN _{900,V25}	21,7%
BHN70 _{800,V25}	60,8%	BT _{1000,V50}	32,0%	BHN80 _{700,V25}	67,6%	BN _{1000,A}	20,5%
BT _{700,V25}	60,5%	BHT70 _{900,A}	31,1%	BT _{800,V25}	67,6%	BHN80 _{900,V50}	20,3%
BN _{800,V50}	59,1%	BHT80 _{900,A}	30,4%	BHN70 _{700,V25}	65,8%	BHN70 _{900,V50}	17,8%
BHT70 _{800,V50}	58,5%	BHN80 _{1000,A}	27,6%	BN _{600,V25}	65,4%	BHN80 _{1000,V25}	17,5%
BHT80 _{800,V50}	58,0%	BT _{900,A}	27,4%	BHT80 _{700,V50}	63,2%	BT _{1000,V50}	16,8%
BT _{800,V50}	57,2%	BN _{1000,A}	27,3%	BHT80 _{900,A}	62,8%	BHN70 _{1000,V25}	15,5%
BN _{800,V25}	57,0%	BHT70 _{1000,V25}	27,2%	BHT80 _{800,V25}	61,3%	BHT80 _{1000,V50}	13,2%
BHT70 _{600,A}	54,7%	BHN70 _{1000,A}	26,9%	BHT70 _{900,A}	60,5%	BN _{900,V50}	11,3%
BHT70 _{800,V25}	53,0%	BHT80 _{1000,V25}	26,4%	BHT70 _{700,V50}	60,1%	BHT70 _{1000,V50}	10,0%
BHN70 _{800,A}	52,7%	BT _{1000,V25}	24,8%	BHT70 _{800,V25}	60,0%	BN _{1000,V25}	8,4%
BHN80 _{900,V50}	52,1%	BHT80 _{1000,A}	18,3%	BN _{600,V50}	56,5%	BHN80 _{1000,V50}	5,9%
BHN80 _{800,A}	52,1%	BHT70 _{1000,A}	17,9%	BN _{700,V25}	55,5%	BHN70 _{1000,V50}	4,4%
BHT80 _{600,A}	51,7%	BT _{1000,A}	17,4%	BHN80 _{700,V50}	54,4%	BN _{1000,V50}	0,0%

Capítulo 5

Conclusões

Apesar dos obstáculos encontrados ao lidar com RSU, o investimento em maneiras de tratar e reciclar os rejeitos para produzir energia, calor e combustíveis é essencial para a transição para uma matriz energética com base em fontes renováveis e sustentáveis.

Os resultados obtidos para os resíduos lignocelulósicos mostra o potencial energético que existe nas espécies da cidade de Brasília. A caracterização das biomassas permitiu a comparação dos componentes individualmente com o *blend* e com os *blend* torrefados em diversas temperaturas. Pode-se observar que as amostras que passaram por torrefação numa maior temperatura possuem características mais vantajosas que as demais. O *blend* torrefado a 275°C apresentou tem uma maior porcentagem de carbono fixo e teve um aumento de 11,10% no poder calorífico superior quando comparado com a amostra in natura.

Com a caracterização gravimétrica do RSU foi possível realizar o RSU sintético de forma que ele se assemelhasse com amostras reais de RSU. Os *pellets* do biocombustível híbrido foram feitos de forma satisfatória e as duas proporções escolhidas para eles seguiram a literatura, sendo uma 80/20% e a outra 70/30% (biomassa/RSU).

A análise calorífica mostrou que a mistura híbrida com melhores características foi a torrefada (80/20), o que apresenta um aumento de 10,34% em comparação com a amostra in natura com a mesma proporção. Comparando os resultados do PCS para a mistura de RSU e a mistura 80/20 torrefada, houve um aumento de 30,03%. Contudo, ao comparar com os resultados da mistura lignocelulósica torrefada a 275°C, houve um decréscimo de 4,83% no PCS.

É possível verificar a influência que cada parâmetro (temperatura de gaseificação, composição da biomassa e atmosfera) apresenta na composição do gás síntese. As amostras torrefadas favorecem o aumento da produção de monóxido de carbono, o aumento poder calorífico e da eficiência de gás frio devido as maiores parcelas de carbono fixo em sua composição. Já as amostra in natura favorecem a produção de hidrogênio e, por consequência, aumentam a razão H₂/CO. O uso do agente gaseificante ar permite maiores valores de PCI e CGE e maiores porcentagens de monóxido de carbono, já ao adicionar vapor, a produção de

hidrogênio é mais favorecida, assim como a de dióxido de carbono.

Com a decisão de análise multi-critérios são obtidos as taxas de sucesso de cada amostra considerando as duas condições. As maiores taxas de sucesso foram para os processos com temperaturas mais baixas, 600°C. Considerando a condição 1, que visa a produção de hidrogênio, as amostras com maiores taxas de sucessos foram os *blends* híbrido in natura a 600°C com vapor como agente gaseificante. Já para a condição 2, cujo objetivo é a queima direta do syngas, as amostras mais vantajosas forma as torrefadas a 600°C com ar como agente gaseificante. O fato dos *blends* híbridos estarem sempre com altas taxas de sucesso em todas as análises mostra a sua efetividade como biocombustível.

Referências Bibliográficas

- [Abdulyekeen et al. 2021] Abdulyekeen, K. A., Umar, A. A., Patah, M. F. A., and Daud, W. M. A. W. (2021). Torrefaction of biomass: Production of enhanced solid biofuel from municipal solid waste and other types of biomass. 150:111436.
- [Adánez-Rubio et al. 2020] Adánez-Rubio, I., Ferreira, R., Rio, T., Alzueta, M., and Costa, M. (2020). Soot and char formation in the gasification of pig manure in a drop tube reactor. 281:118738.
- [Adasa 2010] Adasa (2010). Plano distrital de gestão de resíduos sólidos. *Governo de Brasília*.
- [Ahmed et al. 2011] Ahmed, I., Nipattummakul, N., and Gupta, A. (2011). Characteristics of syngas from co-gasification of polyethylene and woodchips. 88(1):165–174.
- [Ansah et al. 2016] Ansah, E., Wang, L., and Shahbazi, A. (2016). Thermogravimetric and calorimetric characteristics during co-pyrolysis of municipal solid waste components. *Waste Management*, 56:196–206.
- [Atabani et al. 2022] Atabani, A., Ali, I., Naqvi, S. R., Badruddin, I. A., Aslam, M., Mahmoud, E., Almomani, F., Juchelková, D., Atelge, M., and Khan, T. Y. (2022). A state-of-the-art review on spent coffee ground (SCG) pyrolysis for future biorefinery. *Chemosphere*, 286:131730.
- [Bach et al. 2019] Bach, Q.-V., Nguyen, D. D., and Lee, C.-J. (2019). Effect of torrefaction on steam gasification of biomass in dual fluidized bed reactor—a process simulation study. *BioEnergy Research*, 12(4):1042–1051.
- [Balat and Kırtay 2010] Balat, H. and Kırtay, E. (2010). Hydrogen from biomass – present scenario and future prospects. 35(14):7416–7426.
- [Basu 2013] Basu, P. (2013). Gasification theory. pages 199–248. Elsevier.
- [Białowiec et al. 2018] Białowiec, A., Micuda, M., and Koziel, J. (2018). Waste to carbon: Densification of torrefied refuse-derived fuel. *Energies*, 11(11):3233.

- [Białowiec et al. 2017] Białowiec, A., Pulka, J., Stępień, P., Manczarski, P., and Gołaszewski, J. (2017). The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product – carbonized refuse derived fuel. *Waste Management*, 70:91–100.
- [Brasil 2010] Brasil (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Diário Oficial União*.
- [Bruzos-Bonzon and Mirabent-Avila 2005] Bruzos-Bonzon, G. and Mirabent-Avila, J. (2005). La utilización de ‘residuos sólidos’ con fines de generación eléctrica. una alternativa favorable al medio ambiente.
- [Cao et al. 2019] Cao, Y., Fu, L., and Mofrad, A. (2019). Combined-gasification of biomass and municipal solid waste in a fluidized bed gasifier. *Journal of the Energy Institute*, 92(6):1683–1688.
- [Chae et al. 2020] Chae, J. S., Kim, S. W., and Ohm, T. I. (2020). Combustion characteristics of solid refuse fuels from Different Waste sources. *Journal of Renewable Materials*, 8(7):789–799.
- [Chawdhury and Mahkamov 2010] Chawdhury, M. A. and Mahkamov, K. (2010). Development of a small downdraft biomass gasifier for developing countries. 3(1):51.
- [Chen et al. 2018] Chen, D., Gao, A., Cen, K., Zhang, J., Cao, X., and Ma, Z. (2018). Investigation of biomass torrefaction based on three major components: Hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energy Conversion and Management*, 169:228–237.
- [Chen et al. 2011] Chen, Q., Zhou, J., Liu, B., Mei, Q., and Luo, Z. (2011). Influence of torrefaction pretreatment on biomass gasification technology. 56(14):1449–1456.
- [Chen and Kuo 2010] Chen, W. H. and Kuo, P. C. (2010). A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy*, 35(6):2580–2586.
- [Chen and Kuo 2011] Chen, W.-H. and Kuo, P.-C. (2011). Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy*, 36(2):803–811.
- [Chen et al. 2015] Chen, W.-H., Peng, J., and Bi, X. T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44:847–866.
- [Cheng and Hu 2010] Cheng, H. and Hu, Y. (2010). Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in china. *Bioresource Technology*, 101(11):3816–3824.
- [Conesa and Rey 2015] Conesa, J. A. and Rey, L. (2015). Thermogravimetric and kinetic analysis of the decomposition of solid recovered fuel from municipal solid waste. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 120(2):1233–1240.

- [Consonni and Viganò 2012] Consonni, S. and Viganò, F. (2012). Waste gasification vs. conventional waste-to-energy: A comparative evaluation of two commercial technologies. *32(4):653–666*.
- [Couhert et al. 2009] Couhert, C., Salvador, S., and Commandré, J.-M. (2009). Impact of torrefaction on syngas production from wood. *88(11):2286–2290*.
- [da Silva Miranda et al. 2020] da Silva Miranda, M. R., Veras, C. A. G., and Ghesti, G. F. (2020). Charcoal production from waste pequi seeds for heat and power generation. *103:177–186*.
- [Daouk et al. 2018] Daouk, E., Sani, R., Minh, D. P., and Nzihou, A. (2018). Thermo-conversion of solid recovered fuels under inert and oxidative atmospheres: Gas composition and chlorine distribution. *Fuel, 225:54–61*.
- [Deb 2011] Deb, K. (2011). Multi-objective optimisation using evolutionary algorithms: An introduction. In *Multi-objective Evolutionary Optimisation for Product Design and Manufacturing*, pages 3–34. Springer London.
- [Dry 2002] Dry, M. E. (2002). The fischer–tropsch process: 1950–2000. *71(3-4):227–241*.
- [Ferreira et al. 2021] Ferreira, A. F., Ribau, J. P., and Costa, M. (2021). A decision support method for biochars characterization from carbonization of grape pomace. *Biomass and Bioenergy, 145:105946*.
- [Fock et al. 2000] Fock, F., Thomsen, K. P., Houbak, N., and Henriksen, U. (2000). Modelling a biomass gasification system by means of ees. *Kgs. Lyngby, Denmark: The Scandinavian Simulation Society, Technical University of Denmark*.
- [García et al. 2017] García, C. A., Moncada, J., Aristizábal, V., and Cardona, C. A. (2017). Techno-economic and energetic assessment of hydrogen production through gasification in the colombian context: Coffee cut-stems case. *International Journal of Hydrogen Energy, 42(9):5849–5864*.
- [Gerassimidou et al. 2020] Gerassimidou, S., Velis, C. A., Williams, P. T., and Komilis, D. (2020). Characterisation and composition identification of waste-derived fuels obtained from municipal solid waste using thermogravimetry: A review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 38(9):942–965*.
- [GIZ 2017] GIZ (2017). Opções em waste-to-energy na gestão de resíduos sólidos urbanos. *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*.
- [Grammelis et al. 2009] Grammelis, P., Basinas, P., Malliopoulou, A., and Sakellariopoulos, G. (2009). Pyrolysis kinetics and combustion characteristics of waste recovered fuels. *Fuel, 88(1):195–205*.

- [Hameed et al. 2021] Hameed, Z., Aslam, M., Khan, Z., Maqsood, K., Atabani, A., Ghauri, M., Khurram, M. S., Rehan, M., and Nizami, A.-S. (2021). Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136:110375.
- [Jamin et al. 2019] Jamin, N. A., Saleh, S., and Samad, N. A. F. A. (2019). Properties prediction of torrefied municipal solid waste using linear correlation model. *Energy Procedia*, 158:836–841.
- [Kenney et al. 1990] Kenney, W., Sennerby-Forsse, L., and Layton, P. (1990). A review of biomass quality research relevant to the use of poplar and willow for energy conversion. *Biomass*, 21(3):163–188.
- [Korkmaz et al. 2009] Korkmaz, A., Yanik, J., Brebu, M., and Vasile, C. (2009). Pyrolysis of the tetra pak. *Waste Management*, 29(11):2836–2841.
- [Ku et al. 2017] Ku, X., Jin, H., and Lin, J. (2017). Comparison of gasification performances between raw and torrefied biomasses in an air-blown fluidized-bed gasifier. *Chemical Engineering Science*, 168:235–249.
- [Kuo et al. 2014] Kuo, P.-C., Wu, W., and Chen, W.-H. (2014). Gasification performances of raw and torrefied biomass in a downdraft fixed bed gasifier using thermodynamic analysis. *Fuel*, 117:1231–1241.
- [Lasek et al. 2021] Lasek, J. A., Głód, K., and Słowik, K. (2021). The co-combustion of torrefied municipal solid waste and coal in bubbling fluidised bed combustor under atmospheric and elevated pressure. 179:828–841.
- [Li and Chen 2018] Li, Y.-H. and Chen, H.-H. (2018). Analysis of syngas production rate in empty fruit bunch steam gasification with varying control factors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(2):667–675.
- [Lisboa 2016] Lisboa, F. C. D. (2016). Caracterização Energética do Aterro da Estrutural. Technical report.
- [Marcantonio et al. 2020] Marcantonio, V., Ferrario, A. M., Carlo, A. D., Zotto, L. D., Monarca, D., and Bocci, E. (2020). Biomass steam gasification: A comparison of syngas composition between a 1-d MATLAB kinetic model and a 0-d aspen plus quasi-equilibrium model. 8(4):86.
- [Martinez et al. 2021] Martinez, C. L. M., Saari, J., Melo, Y., Cardoso, M., de Almeida, G. M., and Vakkilainen, E. (2021). Evaluation of thermochemical routes for the valorization of solid coffee residues to produce biofuels: A brazilian case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137:110585.

- [Mehariya et al. 2020] Mehariya, S., Iovine, A., Casella, P., Musmarra, D., Figoli, A., Marino, T., Sharma, N., and Molino, A. (2020). Fischer–tropsch synthesis of syngas to liquid hydrocarbons. pages 217–248. Elsevier.
- [Mohee et al. 2015] Mohee, R., Mauthoor, S., Bundhoo, Z. M., Somaroo, G., Soobhany, N., and Gunasee, S. (2015). Current status of solid waste management in small island developing states: A review. *Waste Management*, 43:539–549.
- [Mu'min et al. 2017] Mu'min, G. F., Prawisudha, P., Zaini, I. N., Aziz, M., and Pasek, A. D. (2017). Municipal solid waste processing and separation employing wet torrefaction for alternative fuel production and aluminum reclamation. *Waste Management*, 67:106–120.
- [Nhuchhen et al. 2014] Nhuchhen, D., Basu, P., and Acharya, B. (2014). A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. *International Journal of Renewable Energy Biofuels*, 2014:1–56.
- [Nhuchhen et al. 2020] Nhuchhen, D. R., Dutta, A., and Abhi, T. D. (2020). Correlations to predict properties of torrefied biomass using mass loss fraction and experimental validation. *Energy & Fuels*, 34(9):11091–11102.
- [Oyedun et al. 2014] Oyedun, A. O., Gebreegziabher, T., Ng, D. K., and Hui, C. W. (2014). Mixed-waste pyrolysis of biomass and plastics waste – a modelling approach to reduce energy usage. *Energy*, 75:127–135.
- [Parthasarathy and Narayanan 2014] Parthasarathy, P. and Narayanan, K. S. (2014). Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield – a review. *Renewable Energy*, 66:570–579.
- [Rago et al. 2020] Rago, Y. P., Collard, F. X., Görgens, J. F., Surroop, D., and Mohee, R. (2020). Torrefaction of biomass and plastic from municipal solid waste streams and their blends: Evaluation of interactive effects. *Fuel*, 277(March):118089.
- [Rasanjani et al. 2019] Rasanjani, C., Gunathilaka, T., Pieris, C., Bandara, H., and Narayana, M. (2019). Torrefaction of Urban Bio Waste in Sri Lanka. *MERCon 2019 - Proceedings, 5th International Multidisciplinary Moratuwa Engineering Research Conference*, pages 573–576.
- [Ray and Cooney 2018] Ray, S. and Cooney, R. P. (2018). Chapter 9 - thermal degradation of polymer and polymer composites. In Kutz, M., editor, *Handbook of Environmental Degradation of Materials (Third Edition)*, pages 185–206. William Andrew Publishing, third edition edition.
- [S. et al. 2020] S., S. S., K., P., A., R., and Raghavan, V. (2020). Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*.

- [Saleh et al. 2014] Saleh, S. B., Flensburg, J. P., Shoulaifar, T. K., Sárossy, Z., Hansen, B. B., Egsgaard, H., DeMartini, N., Jensen, P. A., Glarborg, P., and Dam-Johansen, K. (2014). Release of chlorine and sulfur during biomass torrefaction and pyrolysis. *28(6):3738–3746*.
- [Sansaniwal et al. 2017] Sansaniwal, S., Pal, K., Rosen, M., and Tyagi, S. (2017). Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. *72:363–384*.
- [Santanna et al. 2020] Santanna, M., Silveira, E., Macedo, L., Galvão, L., and Caldeira-Pires, A. (2020). Torrefaction of lignocellulosic municipal solid waste: Thermal upgrade for energy use. *Proceedings of the 28th European Biomass Conference and Exhibition, 6-9 July 2020:pp. 188–191*.
- [Sarkar et al. 2014] Sarkar, M., Kumar, A., Tumuluru, J. S., Patil, K. N., and Bellmer, D. D. (2014). Gasification performance of switchgrass pretreated with torrefaction and densification. *127:194–201*.
- [Silva-Martínez et al. 2020] Silva-Martínez, R. D., Sanches-Pereira, A., Ortiz, W., Galindo, M. F. G., and Coelho, S. T. (2020). The state-of-the-art of organic waste to energy in latin america and the caribbean: Challenges and opportunities. *Renewable Energy, 156:509–525*.
- [Silveira 2018] Silveira, E. (2018). *Acoustic field influence in the kinetics of thermochemical degradation during biomass torrefaction*. Theses, Université de Lorraine ; Universidade de Brasília.
- [Silveira et al. 2019] Silveira, E. A., Galvão, L. G. O., Sá, I. A., Silva, B. F., Macedo, L., Rousset, P., and Caldeira-Pires, A. (2019). Effect of torrefaction on thermal behavior and fuel properties of eucalyptus grandis macro-particulates. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 138(5):3645–3652*.
- [Simões Santanna et al. 2021] Simões Santanna, M., Silveira, E., and Caldeira-Pires, A. (2021). Thermochemical pathways for municipal lignocellulosic waste as biofuel. *Proceedings of the 29th European Biomass Conference and Exhibition, 26-29 April 2021:pp. 1022–1025*.
- [Sørum et al. 2001] Sørum, L., Grønli, M., and Hustad, J. (2001). Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes. *Fuel, 80(9):1217–1227*.
- [Stehlík 2009] Stehlík, P. (2009). Contribution to advances in waste-to-energy technologies. *Journal of Cleaner Production, 17(10):919–931*.
- [Stępień and Białowiec 2018] Stępień, P. and Białowiec, A. (2018). Kinetic parameters of torrefaction process of alternative fuel produced from municipal solid waste and characteristic of carbonized refuse derived fuel. *Detritus, In Press(1):1*.

- [Strege et al. 2011] Strege, J., Swanson, M., Folkedahl, B., Stanislawski, J., and Laumb, J. (2011). Fischer–tropsch catalyst testing in a continuous bench-scale coal gasification system. *92(4):757–763*.
- [Strezov 2015] Strezov, V. (2015). *Biomass processing technologies*. CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.
- [Triyono et al. 2019] Triyono, B., Prawisudha, P., Aziz, M., Mardiyati, Pasek, A. D., and Yoshikawa, K. (2019). Utilization of mixed organic-plastic municipal solid waste as renewable solid fuel employing wet torrefaction. *Waste Management*, 95:1–9.
- [Uslu et al. 2008] Uslu, A., Faaij, A. P., and Bergman, P. (2008). Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *33(8):1206–1223*.
- [Vamvuka et al. 2020] Vamvuka, D., Loukakou, E., Sfakiotakis, S., and Petrakis, E. (2020). The impact of a combined pre-treatment on the combustion performance of various biomass wastes and their blends with lignite. *Thermochimica Acta*, 688:178599.
- [Velghe et al. 2011] Velghe, I., Carleer, R., Yperman, J., and Schreurs, S. (2011). Study of the pyrolysis of municipal solid waste for the production of valuable products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 92(2):366–375.
- [Velis et al. 2010] Velis, C. A., Longhurst, P. J., Drew, G. H., Smith, R., and Pollard, S. J. T. (2010). Production and quality assurance of solid recovered fuels using mechanical—biological treatment (MBT) of waste: A comprehensive assessment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40(12):979–1105.
- [Waiczuk and Ensslin 2013] Waiczuk, C. and Ensslin, E. R. (2013). Avaliação de produção científica de pesquisadores: mapeamento das publicações científicas. *Revista Contemporânea de Contabilidade*, 10(20).
- [Xu et al. 2020] Xu, Z., Albrecht, J. W., Kolapkar, S. S., Zinchik, S., and Bar-Ziv, E. (2020). Chlorine removal from u.s. solid waste blends through torrefaction. *10(9):3337*.
- [Xue et al. 2015] Xue, Y., Zhou, S., Brown, R. C., Kelkar, A., and Bai, X. (2015). Fast pyrolysis of biomass and waste plastic in a fluidized bed reactor. *Fuel*, 156:40–46.
- [Yuan et al. 2015] Yuan, H., Wang, Y., Kobayashi, N., Zhao, D., and Xing, S. (2015). Study of fuel properties of torrefied municipal solid waste. *Energy & Fuels*, 29(8):4976–4980.
- [Zheng et al. 2015] Zheng, A., Jiang, L., Zhao, Z., Huang, Z., Zhao, K., Wei, G., Wang, X., He, F., and Li, H. (2015). Impact of torrefaction on the chemical structure and catalytic fast pyrolysis behavior of hemicellulose, lignin, and cellulose. *Energy & Fuels*, 29(12):8027–8034.

[Zheng et al. 2009] Zheng, J., qi Jin, Y., Chi, Y., ming Wen, J., guang Jiang, X., and jiang Ni, M. (2009). Pyrolysis characteristics of organic components of municipal solid waste at high heating rates. *Waste Management*, 29(3):1089–1094.

ANEXOS

I. BALANÇO ENERGÉTICO

Estão dispostas a seguir as tabelas referentes aos resultados do balanço energético calculado pelo *software* para cada amostra em todas as atmosferas (Tabelas I.1-I.3).

Tabela I.1: Balanço energético da gaseificação com agente gaseificante ar.

Combustível	Balanço de energia [kW]					
	Thermal input	Pré - aquecimento do ar	Energia interna	Resfriamento do gás	Energia do biocarvão	Perda de calor
In natura	368,90	9,40	310,70	50,23	6,30	11,10
	368,90	10,40	301,70	63,29	6,30	11,10
	368,90	11,40	291,90	76,61	6,30	11,10
	368,90	12,40	281,20	90,63	6,30	11,10
	368,90	13,50	269,40	105,60	6,30	11,10
Torrefada 275°	419,90	11,00	367,70	43,89	6,30	12,60
	419,90	11,80	359,00	54,67	6,30	12,60
	419,90	12,60	349,50	66,37	6,30	12,60
	419,90	13,60	339,20	79,04	6,30	12,60
	419,90	14,60	327,90	92,80	6,30	12,60
N70_30	332,70	7,70	284,70	42,37	6,30	10,00
	332,70	8,60	276,90	53,46	6,30	10,00
	332,70	9,40	268,50	64,82	6,30	10,00
	332,70	10,30	259,20	76,82	6,30	10,00
	332,70	11,20	249,10	89,65	6,30	10,00
N80_20	344,00	8,10	295,10	43,04	6,30	10,30
	344,00	9,00	287,20	54,27	6,30	10,30
	344,00	9,80	278,50	65,84	6,30	10,30
	344,00	10,70	269,10	78,08	6,30	10,30
	344,00	11,70	258,70	91,18	6,30	10,30
T70_30	366,80	9,00	317,90	41,29	6,30	11,00
	366,80	9,80	309,90	51,83	6,30	11,00
	366,80	10,60	301,20	62,99	6,30	11,00
	366,80	11,50	291,70	74,93	6,30	11,00
	366,80	12,40	281,30	87,80	6,30	11,00
T80_20	381,80	9,60	332,00	41,96	6,30	11,50
	381,80	10,40	323,80	52,55	6,30	11,50
	381,80	11,20	314,90	63,85	6,30	11,50
	381,80	12,10	305,20	76,00	6,30	11,50
	381,80	13,10	294,60	89,11	6,30	11,50

Tabela I.2: Balanço energético da gaseificação com agente gaseificante vapor/ar = 0,25.

Combustível	Balanço de energia [kW]						
	Thermal input	Pré - aquecimento do ar	Pré-aquecimento do vapor	Energia Interna	Resfriamento do gás	Energia do biocarvão	Perda de energia
In natura	368,90	9,10	16,00	307,50	62,07	6,30	11,10
	368,90	10,40	16,00	297,30	79,93	6,30	11,10
	368,90	11,60	16,00	286,00	95,70	6,30	11,10
	368,90	12,80	16,00	273,60	112,10	6,30	11,10
	368,90	14,10	16,00	260,10	129,60	6,30	11,10
Torrefada 275°	419,90	10,50	16,00	364,40	54,30	6,30	12,60
	419,90	11,60	16,00	354,40	68,43	6,30	12,60
	419,90	12,70	16,00	343,50	83,01	6,30	12,60
	419,90	13,80	16,00	331,60	98,43	6,30	12,60
	419,90	15,00	16,00	318,50	114,90	6,30	12,60
N70_30	332,70	7,50	16,00	281,50	55,82	6,30	10,00
	332,70	8,60	16,00	272,40	69,74	6,30	10,00
	332,70	9,60	16,00	262,50	83,61	6,30	10,00
	332,70	10,70	16,00	251,70	98,06	6,30	10,00
	332,70	11,80	16,00	239,80	113,40	6,30	10,00
N80_20	344,00	7,90	16,00	291,90	56,26	6,30	10,30
	344,00	9,00	16,00	282,70	70,39	6,30	10,30
	344,00	10,00	16,00	272,60	84,50	6,30	10,30
	344,00	11,10	16,00	261,50	99,22	6,30	10,30
	344,00	12,30	16,00	249,40	114,90	6,30	10,30
T70_30	366,80	8,70	16,00	314,60	52,92	6,30	11,00
	366,80	9,70	16,00	305,30	66,66	6,30	11,00
	366,80	10,70	16,00	295,20	80,56	6,30	11,00
	366,80	11,80	16,00	284,10	95,12	6,30	11,00
	366,80	12,90	16,00	272,00	110,60	6,30	11,00
T80_20	381,80	9,20	16,00	328,70	53,20	6,30	11,50
	381,80	10,20	16,00	319,30	67,06	6,30	11,50
	381,80	11,30	16,00	308,90	81,14	6,30	11,50
	381,80	12,40	16,00	297,60	95,95	6,30	11,50
	381,80	13,50	16,00	285,20	111,70	6,30	11,50

Tabela I.3: Balanço energético da gaseificação com agente gaseificante vapor/ar = 0,50.

Combustível	Balanço de energia [kW]						
	Thermal input	Pré - aquecimento do ar	Pré-aquecimento do vapor	Energia Interna	Resfriamento do gás	Energia do biocarvão	Perda de energia
In natura	368,90	9,20	32,00	304,50	80,07	6,30	11,10
	368,90	10,60	32,00	292,90	98,03	6,30	11,10
	368,90	11,90	32,00	280,10	115,90	6,30	11,10
	368,90	13,30	32,00	266,10	134,60	6,30	11,10
	368,90	14,70	32,00	250,80	154,50	6,30	11,10
Torrefada 275°	419,90	10,30	32,00	361,20	67,24	6,30	12,60
	419,90	11,60	32,00	349,90	84,36	6,30	12,60
	419,90	12,80	32,00	337,50	101,50	6,30	12,60
	419,90	14,20	32,00	324,00	119,40	6,30	12,60
	419,90	15,60	32,00	309,20	138,50	6,30	12,60
N70_30	332,70	7,50	32,00	278,40	71,57	6,30	10,00
	332,70	8,70	32,00	268,00	87,69	6,30	10,00
	332,70	9,90	32,00	256,70	103,70	6,30	10,00
	332,70	11,10	32,00	244,20	120,40	6,30	10,00
	332,70	12,40	32,00	230,50	138,20	6,30	10,00
N80_20	344,00	7,90	32,00	288,80	71,81	6,30	10,30
	344,00	9,10	32,00	278,30	88,20	6,30	10,30
	344,00	10,30	32,00	266,70	104,50	6,30	10,30
	344,00	11,60	32,00	254,00	121,50	6,30	10,30
	344,00	12,90	32,00	240,10	139,50	6,30	10,30
T70_30	366,80	8,50	32,00	311,40	67,16	6,30	11,00
	366,80	9,70	32,00	300,90	83,53	6,30	11,00
	366,80	10,90	32,00	289,30	99,80	6,30	11,00
	366,80	12,20	32,00	276,60	116,70	6,30	11,00
	366,80	13,50	32,00	262,70	134,70	6,30	11,00
T80_20	381,80	9,00	32,00	325,60	67,04	6,30	11,50
	381,80	10,30	32,00	314,80	83,64	6,30	11,50
	381,80	11,50	32,00	303,00	100,20	6,30	11,50
	381,80	12,80	32,00	290,10	117,40	6,30	11,50
	381,80	14,10	32,00	275,90	135,70	6,30	11,50

II. RESULTADOS DA GASEIFICAÇÃO

Tabela II.1: Resultado da gaseificação das amostras in natura na atmosfera com ar.

Combustível	Dados do combustível			Gaseificador temperatura	H2/CO	Composição do gás [vol%]				Prop. Energ.		
	umidade	H/C	O/C			H2	CO	CO2	CH4	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	PCI [kJ/Nm3]
In natura	10	1,93	0,8	600	1,54	29,8	19,3	13,6	2	84,2	6370	0,95
	10	1,93	0,8	700	1,28	26,4	20,6	12,3	2	81,8	6164	0,92
	10	1,93	0,8	800	1,12	23,5	21	11,5	2	79,1	5904	0,88
	10	1,93	0,8	900	0,99	20,8	21	11	2	76,2	5607	0,83
	10	1,93	0,8	1000	0,88	18,2	20,6	10,8	2	73	5280	0,79
N70_30	2	1,98	0,92	600	1,33	29,5	22,1	13,2	2	85,6	6693	1,00
	2	1,98	0,92	700	1,13	26,3	23,2	12	2	83,2	6481	0,96
	2	1,98	0,92	800	1,00	23,5	23,5	11,3	2	80,7	6217	0,93
	2	1,98	0,92	900	0,90	20,9	23,3	10,9	2	77,9	5918	0,88
	2	1,98	0,92	1000	0,80	18,4	22,9	10,7	2	74,9	5588	0,83
N80_20	2	1,96	0,88	600	1,29	29,2	22,6	12,4	2	85,8	6717	1,00
	2	1,96	0,88	700	1,11	26,2	23,5	11,3	2	83,5	6502	0,97
	2	1,96	0,88	800	0,99	23,4	23,7	10,7	2	81	6238	0,93
	2	1,96	0,88	900	0,89	20,9	23,5	10,3	2	78,2	5939	0,88
	2	1,96	0,88	1000	0,80	18,4	23	10,2	2	75,2	5612	0,84

Tabela II.2: Resultado da gaseificação das amostras torrefadas na atmosfera com ar.

Combustível	Dados do combustível			Gaseificador temperatura	H2/CO	Composição do gás [vol%]				Prop. Energ.		
	umidade	H/C	O/C			H2	CO	CO2	CH4	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	PCI [kJ/Nm3]
Torrefada 275°	2	1,32	0,57	600	0,70	22,1	31,5	5,8	2	87,6	7078	1,00
	2	1,32	0,57	700	0,67	20,5	30,7	6	2	85,5	6808	0,96
	2	1,32	0,57	800	0,63	18,8	29,9	6,2	2	83,2	6523	0,92
	2	1,32	0,57	900	0,59	17,1	29	6,4	2	80,8	6221	0,88
	2	1,32	0,57	1000	0,55	15,3	28	6,7	2	78,1	5902	0,83
T70_30	2	1,50	0,73	600	0,88	24,7	28	9,5	2	86,7	6916	0,98
	2	1,50	0,73	700	0,80	22,5	28	9,1	2	84,5	6671	0,94
	2	1,50	0,73	800	0,74	20,3	27,6	8,9	2	82,1	6396	0,90
	2	1,50	0,73	900	0,67	18,2	27,1	8,9	2	79,5	6096	0,86
	2	1,50	0,73	1000	0,61	16,1	26,3	8,9	2	76,7	5773	0,82
T80_20	2	1,44	0,68	600	0,82	23,9	29,1	8,4	2	87	6966	0,98
	2	1,44	0,68	700	0,76	21,8	28,8	8,1	2	84,8	6714	0,95
	2	1,44	0,68	800	0,70	19,8	28,3	8,1	2	82,5	6436	0,91
	2	1,44	0,68	900	0,64	17,8	27,7	8,1	2	79,9	6135	0,87
	2	1,44	0,68	1000	0,59	15,9	26,8	8,3	2	77,1	5813	0,82

Tabela II.3: Resultado da gaseificação das amostras in natura na atmosfera com vapor/ar = 0,25.

Combustível	Dados do combustível			Gaseificador temperatura	H2/CO	Composição do gás [vol%]				Prop. Energ.		
	umidade	H/C	O/C			H2	CO	CO2	CH4	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	PCI [kJ/Nm3]
In natura	10	1,93	0,8	600	2,98	34,9	11,7	19,4	2	83,4	5949	0,94
	10	1,93	0,8	700	1,85	29,1	15,7	15,8	2	80,6	5840	0,93
	10	1,93	0,8	800	1,53	25,5	16,7	14,6	2	77,5	5573	0,89
	10	1,93	0,8	900	1,31	22,2	17	13,8	2	74,2	5260	0,84
	10	1,93	0,8	1000	1,14	19,2	16,8	13,4	2	70,5	4910	0,78
N70_30	2	1,98	0,92	600	2,28	34	14,9	18,4	2	84,6	6271	1,00
	2	1,98	0,92	700	1,74	29,7	17,1	16,3	2	81,9	6081	0,97
	2	1,98	0,92	800	1,44	26,1	18,1	15	2	78,9	5814	0,92
	2	1,98	0,92	900	1,24	22,8	18,4	14,3	2	75,7	5498	0,87
	2	1,98	0,92	1000	1,08	19,7	18,2	13,8	2	72,1	5146	0,82
N80_20	2	1,96	0,88	600	2,21	33,8	15,3	17,7	2	84,9	6296	1,00
	2	1,96	0,88	700	1,70	29,6	17,4	15,7	2	82,2	6106	0,97
	2	1,96	0,88	800	1,42	26	18,3	14,5	2	79,3	5841	0,93
	2	1,96	0,88	900	1,23	22,8	18,6	13,7	2	76	5529	0,88
	2	1,96	0,88	1000	1,07	19,8	18,5	13,3	2	72,5	5180	0,82

Tabela II.4: Resultado da gaseificação das amostras torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,25.

Combustível	Dados do combustível			Gaseificador temperatura	H2/CO	Composição do gás [vol%]				Prop. Energ.		
	umidade	H/C	O/C			H2	CO	CO2	CH4	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	PCI [kJ/Nm3]
Torrefada 275°	2	1,32	0,57	600	1,27	28,3	22,3	12,6	2	86,8	6585	1,00
	2	1,32	0,57	700	1,10	25,3	23,1	11,5	2	84,4	6368	0,97
	2	1,32	0,57	800	0,97	22,6	23,4	10,9	2	81,8	6105	0,93
	2	1,32	0,57	900	0,87	20,1	23,2	10,6	2	79	5808	0,88
	2	1,32	0,57	1000	0,78	17,6	22,7	10,4	2	75,9	5482	0,83
T70_30	2	1,50	0,73	600	1,60	30,6	19,1	16	2	85,8	6429	0,98
	2	1,50	0,73	700	1,30	26,9	20,7	14,3	2	83,2	6230	0,97
	2	1,50	0,73	800	1,12	23,8	21,3	13,4	2	80,5	5968	0,91
	2	1,50	0,73	900	0,98	20,9	21,3	12,8	2	77,5	5664	0,86
	2	1,50	0,73	1000	0,87	18,2	21	12,5	2	74,2	5327	0,81
T80_20	2	1,44	0,68	600	1,49	29,9	20,1	15	2	86,1	6476	0,98
	2	1,44	0,68	700	1,23	26,4	21,4	13,5	2	83,6	6272	0,95
	2	1,44	0,68	800	1,07	23,4	21,9	12,6	2	80,9	6010	0,91
	2	1,44	0,68	900	0,94	20,6	21,9	12,2	2	77,9	5708	0,87
	2	1,44	0,68	1000	0,84	18	21,5	11,9	2	74,7	5376	0,82

Tabela II.5: Resultado da gaseificação das amostras in natura na atmosfera com vapor/ar = 0,50.

Combustível	Dados do combustível			Gaseificador temperatura	H2/CO	Composição do gás [vol%]				Prop. Energ.		
	umidade	H/C	O/C			H2	CO	CO2	CH4	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	PCI [kJ/Nm3]
In natura	10	1,93	0,8	600	3,50	35,4	10,1	20,5	2	82,5	5801	0,96
	10	1,93	0,8	700	2,45	30,6	12,5	18,1	2	79,4	5593	0,93
	10	1,93	0,8	800	1,93	26,5	13,7	16,6	2	75,9	5305	0,88
	10	1,93	0,8	900	1,62	22,9	14,1	15,7	2	72,2	4967	0,83
	10	1,93	0,8	1000	1,39	19,5	14	15,2	2	68	4591	0,76
N70_30	2	1,98	0,92	600	3,40	36,4	10,7	21,5	2	83,7	5992	1,00
	2	1,98	0,92	700	2,37	31,5	13,3	19	2	80,6	5787	0,96
	2	1,98	0,92	800	1,89	27,4	14,5	17,5	2	77,1	5497	0,91
	2	1,98	0,92	900	1,57	23,6	15	16,5	2	73,4	5155	0,86
	2	1,98	0,92	1000	1,35	20,1	14,9	15,9	2	69,3	4773	0,79
N80_20	2	1,96	0,88	600	3,29	36,2	11	20,8	2	84	6017	1,00
	2	1,96	0,88	700	2,31	31,4	13,6	18,4	2	80,9	5815	0,97
	2	1,96	0,88	800	1,86	27,4	14,7	17	2	77,5	5528	0,92
	2	1,96	0,88	900	1,56	23,7	15,2	16	2	73,9	5192	0,86
	2	1,96	0,88	1000	1,33	20,2	15,2	15,4	2	69,8	4815	0,80

Tabela II.6: Resultado da gaseificação das amostras torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,50.

Combustível	Dados do combustível			Gaseificador temperatura	H2/CO	Composição do gás [vol%]				Prop. Energ.		
	umidade	H/C	O/C			H2	CO	CO2	CH4	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	PCI [kJ/Nm3]
Torrefada 275°	2	1,32	0,57	600	1,99	32,2	16,2	17	2	86	6242	1,00
	2	1,32	0,57	700	1,56	28,2	18,1	15,1	2	83,3	6049	0,97
	2	1,32	0,57	800	1,31	24,8	18,9	14	2	80,4	5786	0,93
	2	1,32	0,57	900	1,14	21,7	19,1	13,4	2	77,2	5479	0,88
	2	1,32	0,57	1000	1,00	18,9	18,9	13	2	73,6	5137	0,82
T70_30	2	1,50	0,73	600	2,47	33,9	13,7	19,9	2	84,9	6105	0,98
	2	1,50	0,73	700	1,84	29,4	16	17,6	2	82	5912	0,95
	2	1,50	0,73	800	1,50	25,7	17,1	16,3	2	78,9	5641	0,90
	2	1,50	0,73	900	1,28	22,3	17,4	15,5	2	75,4	5319	0,85
	2	1,50	0,73	1000	1,10	19,1	17,3	15	2	71,6	4959	0,79
T80_20	2	1,44	0,68	600	2,32	33,4	14,4	19,1	2	85,3	6145	0,98
	2	1,44	0,68	700	1,74	29	16,7	16,9	2	82,4	5953	0,95
	2	1,44	0,68	800	1,44	25,4	17,6	15,6	2	79,4	5685	0,91
	2	1,44	0,68	900	1,23	22,1	17,9	14,8	2	76	5368	0,86
	2	1,44	0,68	1000	1,07	19	17,8	14,4	2	72,3	5014	0,80

III. ANÁLISE DE CRITÉRIOS

Estão disponíveis as tabelas da análise multi-critério, sendo *sd* a dominância forte, *wd* dominância fraca e *dn* a distância métrica.

Tabela III.1: Análise multi-critérios das amostras in natura na atmosfera com ar para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,A}	0,6477	0,0119	0,054	14	10	0,054	93%	67%	91%	84%
BN _{700,A}	0,7803	0,0122	0,090	11	7	0,1452	73%	47%	76%	65%
BN _{800,A}	0,8936	0,0126	0,138	9	4	0,2596	60%	27%	57%	48%
BN _{900,A}	1,0096	0,0131	0,198	6	2	0,3807	40%	13%	38%	30%
BN _{1000,A}	1,1319	0,0137	0,272	2	0	0,5113	13%	0%	16%	10%
BHN70 _{600,A}	0,7492	0,0117	0,004	14	12	0,1015	93%	80%	83%	86%
BHN70 _{700,A}	0,8821	0,0120	0,036	12	9	0,2347	80%	60%	61%	67%
BHN70 _{800,A}	1,0000	0,0124	0,080	9	6	0,3537	60%	40%	42%	47%
BHN70 _{900,A}	1,1148	0,0128	0,135	6	3	0,4708	40%	20%	23%	28%
BHN70 _{1000,A}	1,2446	0,0134	0,202	2	0	0,6045	13%	0%	1%	5%
BHN80 _{600,A}	0,7740	0,0117	0,000	14	12	0,1263	93%	80%	79%	84%
BHN80 _{700,A}	0,8969	0,0120	0,033	12	8	0,2494	80%	53%	59%	64%
BHN80 _{800,A}	1,0128	0,0123	0,077	9	5	0,3662	60%	33%	40%	44%
BHN80 _{900,A}	1,1244	0,0128	0,131	6	3	0,48	40%	20%	21%	27%
BHN80 _{1000,A}	1,2500	0,0133	0,197	3	0	0,6092	20%	0%	0%	7%

Tabela III.2: Análise multi-critérios das amostras in natura na atmosfera com ar para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [Kj/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,A}	0,0119	0,054	12	10	0,054	80%	67%	80%	76%
BN _{700,A}	0,0122	0,090	9	7	0,090	60%	47%	67%	58%
BN _{800,A}	0,0126	0,138	6	4	0,138	40%	27%	49%	39%
BN _{900,A}	0,0131	0,198	3	2	0,198	20%	13%	27%	20%
BN _{1000,A}	0,0137	0,272	0	0	0,272	0%	0%	0%	0%
BHN70 _{600,A}	0,0117	0,004	14	13	0,004	93%	87%	99%	93%
BHN70 _{700,A}	0,0120	0,036	12	10	0,036	80%	67%	87%	78%
BHN70 _{800,A}	0,0124	0,080	8	7	0,080	53%	47%	71%	57%
BHN70 _{900,A}	0,0128	0,135	6	4	0,135	40%	27%	50%	39%
BHN70 _{1000,A}	0,0134	0,202	1	1	0,202	7%	7%	26%	13%
BHN80 _{600,A}	0,0117	0,000	14	14	0,000	93%	93%	100%	96%
BHN80 _{700,A}	0,0120	0,033	12	11	0,033	80%	73%	88%	80%
BHN80 _{800,A}	0,0123	0,077	9	8	0,077	60%	53%	72%	62%
BHN80 _{900,A}	0,0128	0,131	6	5	0,131	40%	33%	52%	42%
BHN80 _{1000,A}	0,0133	0,197	3	2	0,197	20%	13%	28%	20%

Tabela III.3: Análise multi-critérios para as amostras torrefadas na atmosfera com ar para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BT _{600,A}	1,4253	0,0114	0,000	14	9	0,2917	93%	60%	58%	71%
BT _{700,A}	1,4976	0,0117	0,040	11	6	0,3642	73%	40%	48%	54%
BT _{800,A}	1,5904	0,0120	0,085	8	4	0,4578	53%	27%	35%	38%
BT _{900,A}	1,6959	0,0124	0,138	5	1	0,5651	33%	7%	19%	20%
BT _{1000,A}	1,8301	0,0128	0,199	2	0	0,7019	13%	0%	0%	4%
BHT70 _{600,A}	1,1336	0,0115	0,023	14	12	0,023	93%	80%	97%	90%
BHT70 _{700,A}	1,2444	0,0118	0,061	12	9	0,1166	80%	60%	83%	74%
BHT70 _{800,A}	1,3596	0,0122	0,107	10	6	0,2337	67%	40%	67%	58%
BHT70 _{900,A}	1,4890	0,0126	0,161	7	3	0,3661	47%	20%	48%	38%
BHT70 _{1000,A}	1,6335	0,0130	0,226	3	0	0,5148	20%	0%	27%	16%
BHT80 _{600,A}	1,2176	0,0115	0,016	14	12	0,0842	93%	80%	88%	87%
BHT80 _{700,A}	1,3211	0,0118	0,054	12	9	0,189	80%	60%	73%	71%
BHT80 _{800,A}	1,4293	0,0121	0,100	9	6	0,2995	60%	40%	57%	52%
BHT80 _{900,A}	1,5562	0,0125	0,154	6	3	0,4293	40%	20%	39%	33%
BHT80 _{1000,A}	1,6855	0,0130	0,218	3	0	0,563	20%	0%	20%	13%

Tabela III.4: Análise multi-critérios para as amostras torrefadas na atmosfera com ar para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [Kj/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BT _{600,A}	0,0114	0,000	14	14	0,0000	93%	93%	100%	96%
BT _{700,A}	0,0117	0,040	11	11	0,0400	73%	73%	82%	76%
BT _{800,A}	0,0120	0,085	8	8	0,0850	53%	53%	62%	56%
BT _{900,A}	0,0124	0,138	5	5	0,1380	33%	33%	39%	35%
BT _{1000,A}	0,0128	0,199	2	2	0,1990	13%	13%	12%	13%
BHT70 _{600,A}	0,0115	0,023	13	12	0,0230	87%	80%	90%	85%
BHT70 _{700,A}	0,0118	0,061	10	9	0,0610	67%	60%	73%	67%
BHT70 _{800,A}	0,0122	0,107	6	6	0,1070	40%	40%	53%	44%
BHT70 _{900,A}	0,0126	0,161	3	3	0,1610	20%	20%	29%	23%
BHT70 _{1000,A}	0,0130	0,226	1	0	0,2260	7%	0%	0%	2%
BHT80 _{600,A}	0,0115	0,016	13	13	0,0160	87%	87%	93%	89%
BHT80 _{700,A}	0,0118	0,054	10	10	0,0540	67%	67%	76%	70%
BHT80 _{800,A}	0,0121	0,100	7	7	0,1000	47%	47%	56%	50%
BHT80 _{900,A}	0,0125	0,154	4	4	0,1540	27%	27%	32%	28%
BHT80 _{1000,A}	0,0130	0,218	1	1	0,2180	7%	7%	4%	6%

Tabela III.5: Análise multi-critérios para as amostras in natura e torrefadas na atmosfera com ar para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,A}	0,6477	0,0119	0,111	29	16	0,111	97%	53%	91%	80%
BN _{700,A}	0,7803	0,0122	0,148	26	12	0,1773	87%	40%	85%	71%
BN _{800,A}	0,8936	0,0126	0,199	24	7	0,2834	80%	23%	76%	60%
BN _{900,A}	1,0096	0,0131	0,262	21	2	0,4029	70%	7%	66%	48%
BN _{1000,A}	1,1319	0,0137	0,341	17	0	0,535	57%	0%	55%	37%
BHN70 _{600,A}	0,7492	0,0117	0,058	29	22	0,1075	97%	73%	91%	87%
BHN70 _{700,A}	0,8821	0,0120	0,092	27	17	0,239	90%	57%	80%	75%
BHN70 _{800,A}	1,0000	0,0124	0,138	24	12	0,3592	80%	40%	70%	63%
BHN70 _{900,A}	1,1148	0,0128	0,196	21	6	0,4783	70%	20%	60%	50%
BHN70 _{1000,A}	1,2446	0,0134	0,267	14	0	0,6142	47%	0%	48%	32%
BHN80 _{600,A}	0,7740	0,0117	0,054	29	23	0,1295	97%	77%	89%	87%
BHN80 _{700,A}	0,8969	0,0120	0,089	27	16	0,2529	90%	53%	79%	74%
BHN80 _{800,A}	1,0128	0,0123	0,135	24	11	0,3712	80%	37%	69%	62%
BHN80 _{900,A}	1,1244	0,0128	0,192	21	6	0,4869	70%	20%	59%	50%
BHN80 _{1000,A}	1,2500	0,0133	0,261	15	0	0,6182	50%	0%	48%	33%
BT _{600,A}	1,4253	0,0114	0,000	29	9	0,7776	97%	30%	34%	54%
BT _{700,A}	1,4976	0,0117	0,040	26	6	0,8499	87%	20%	28%	45%
BT _{800,A}	1,5904	0,0120	0,085	21	4	0,9429	70%	13%	20%	35%
BT _{900,A}	1,6959	0,0124	0,138	14	1	1,049	47%	3%	11%	20%
BT _{1000,A}	1,8301	0,0128	0,199	9	0	1,1843	30%	0%	0%	10%
BHT70 _{600,A}	1,1336	0,0115	0,023	29	14	0,4859	97%	47%	59%	67%
BHT70 _{700,A}	1,2444	0,0118	0,061	25	11	0,5969	83%	37%	50%	57%
BHT70 _{800,A}	1,3596	0,0122	0,107	21	6	0,7127	70%	20%	40%	43%
BHT70 _{900,A}	1,4890	0,0126	0,161	14	3	0,8433	47%	10%	29%	28%
BHT70 _{1000,A}	1,6335	0,0130	0,226	7	0	0,9897	23%	0%	16%	13%
BHT80 _{600,A}	1,2176	0,0115	0,016	29	14	0,5699	97%	47%	52%	65%
BHT80 _{700,A}	1,3211	0,0118	0,054	27	9	0,6735	90%	30%	43%	54%
BHT80 _{800,A}	1,4293	0,0121	0,100	20	6	0,7821	67%	20%	34%	40%
BHT80 _{900,A}	1,5562	0,0125	0,154	13	3	0,91	43%	10%	23%	25%
BHT80 _{1000,A}	1,6855	0,0130	0,218	7	0	1,041	23%	0%	12%	12%

Tabela III.6: Análise multi-critérios para as amostras in natura e torrefadas na atmosfera com ar para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,A}	0,0119	0,111	21	16	0,1110	70%	53%	67%	64%
BN _{700,A}	0,0122	0,148	16	12	0,1480	53%	40%	57%	50%
BN _{800,A}	0,0126	0,199	10	7	0,1990	33%	23%	42%	33%
BN _{900,A}	0,0131	0,262	3	2	0,2620	10%	7%	23%	13%
BN _{1000,A}	0,0137	0,341	0	0	0,3410	0%	0%	0%	0%
BHN70 _{600,A}	0,0117	0,058	26	23	0,0580	87%	77%	83%	82%
BHN70 _{700,A}	0,0120	0,092	21	18	0,0920	70%	60%	73%	68%
BHN70 _{800,A}	0,0124	0,138	14	13	0,1380	47%	43%	60%	50%
BHN70 _{900,A}	0,0128	0,196	9	7	0,1960	30%	23%	43%	32%
BHN70 _{1000,A}	0,0134	0,267	1	1	0,2670	3%	3%	22%	9%
BHN80 _{600,A}	0,0117	0,054	26	25	0,0540	87%	83%	84%	85%
BHN80 _{700,A}	0,0120	0,089	21	19	0,0890	70%	63%	74%	69%
BHN80 _{800,A}	0,0123	0,135	15	14	0,1350	50%	47%	60%	52%
BHN80 _{900,A}	0,0128	0,192	9	8	0,1920	30%	27%	44%	33%
BHN80 _{1000,A}	0,0133	0,261	3	2	0,2610	10%	7%	23%	13%
BT _{600,A}	0,0114	0,000	29	29	0,0000	97%	97%	100%	98%
BT _{700,A}	0,0117	0,040	26	26	0,0400	87%	87%	88%	87%
BT _{800,A}	0,0120	0,085	21	20	0,0850	70%	67%	75%	71%
BT _{900,A}	0,0124	0,138	14	13	0,1380	47%	43%	60%	50%
BT _{1000,A}	0,0128	0,199	9	6	0,1990	30%	20%	42%	31%
BHT70 _{600,A}	0,0115	0,023	28	27	0,0230	93%	90%	93%	92%
BHT70 _{700,A}	0,0118	0,061	23	22	0,0610	77%	73%	82%	77%
BHT70 _{800,A}	0,0122	0,107	17	16	0,1070	57%	53%	69%	60%
BHT70 _{900,A}	0,0126	0,161	10	10	0,1610	33%	33%	53%	40%
BHT70 _{1000,A}	0,0130	0,226	5	4	0,2260	17%	13%	34%	21%
BHT80 _{600,A}	0,0115	0,016	28	28	0,0160	93%	93%	95%	94%
BHT80 _{700,A}	0,0118	0,054	25	23	0,0540	83%	77%	84%	81%
BHT80 _{800,A}	0,0121	0,100	18	17	0,1000	60%	57%	71%	62%
BHT80 _{900,A}	0,0125	0,154	11	11	0,1540	37%	37%	55%	43%
BHT80 _{1000,A}	0,0130	0,218	5	5	0,2180	17%	17%	36%	23%

Tabela III.7: Análise multi-critérios para as amostras in natura na atmosfera com vapor/ar = 0,25 para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,V25}	0,3352	0,0120	0,058	14	10	0,058	93%	67%	90%	83%
BN _{700,V25}	0,5395	0,0124	0,078	11	9	0,208	73%	60%	66%	66%
BN _{800,V25}	0,6549	0,0129	0,130	8	6	0,3267	53%	40%	46%	47%
BN _{900,V25}	0,7658	0,0135	0,197	5	3	0,4439	33%	20%	27%	27%
BN _{1000,V25}	0,8750	0,0142	0,282	2	0	0,5643	13%	0%	7%	7%
BHN70 _{600,V25}	0,4382	0,0118	0,004	14	12	0,103	93%	80%	83%	85%
BHN70 _{700,V25}	0,5758	0,0122	0,035	12	9	0,2408	80%	60%	60%	67%
BHN70 _{800,V25}	0,6935	0,0127	0,083	8	6	0,3598	53%	40%	41%	45%
BHN70 _{900,V25}	0,8070	0,0132	0,145	5	3	0,4763	33%	20%	22%	25%
BHN70 _{1000,V25}	0,9239	0,0139	0,223	2	0	0,5992	13%	0%	1%	5%
BHN80 _{600,V25}	0,4527	0,0118	0,000	14	12	0,1175	93%	80%	81%	85%
BHN80 _{700,V25}	0,5878	0,0122	0,031	12	9	0,2528	80%	60%	58%	66%
BHN80 _{800,V25}	0,7038	0,0126	0,078	9	6	0,3698	60%	40%	39%	46%
BHN80 _{900,V25}	0,8158	0,0132	0,139	5	3	0,4844	33%	20%	20%	25%
BHN80 _{1000,V25}	0,9343	0,0138	0,215	2	0	0,6082	13%	0%	0%	4%

Tabela III.8: Análise multi-critérios para as amostras in natura na atmosfera com vapor/ar = 0,25 para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,V25}	0,0120	0,058	12	10	0,06	80%	67%	14%	54%
BN _{700,V25}	0,0124	0,078	9	9	0,08	60%	60%	36%	52%
BN _{800,V25}	0,0129	0,130	6	6	0,13	40%	40%	57%	46%
BN _{900,V25}	0,0135	0,197	3	3	0,20	20%	20%	79%	40%
BN _{1000,V25}	0,0142	0,282	0	0	0,28	0%	0%	100%	33%
BHN70 _{600,V25}	0,0118	0,004	14	13	0,00	93%	87%	0%	60%
BHN70 _{700,V25}	0,0122	0,035	12	10	0,04	80%	67%	14%	54%
BHN70 _{800,V25}	0,0127	0,083	7	7	0,08	47%	47%	50%	48%
BHN70 _{900,V25}	0,0132	0,145	5	4	0,15	33%	27%	64%	41%
BHN70 _{1000,V25}	0,0139	0,223	1	1	0,22	7%	7%	93%	35%
BHN80 _{600,V25}	0,0118	0,000	14	14	0,00	93%	93%	0%	62%
BHN80 _{700,V25}	0,0122	0,031	12	11	0,03	80%	73%	14%	56%
BHN80 _{800,V25}	0,0126	0,078	9	8	0,08	60%	53%	36%	50%
BHN80 _{900,V25}	0,0132	0,139	5	5	0,14	33%	33%	64%	44%
BHN80 _{1000,V25}	0,0138	0,215	2	2	0,22	13%	13%	86%	37%

Tabela III.9: Análise multi-critérios para as amostras torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,25 para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BT _{600,V25}	0,7880	0,0115	0,000	14	11	0,1638	93%	73%	76%	80,76%
BT _{700,V25}	0,9130	0,0118	0,034	11	8	0,289	73%	53%	57%	61,21%
BT _{800,V25}	1,0354	0,0122	0,079	8	5	0,4122	53%	33%	39%	41,77%
BT _{900,V25}	1,1542	0,0127	0,134	5	2	0,5328	33%	13%	21%	22,45%
BT _{1000,V25}	1,2898	0,0132	0,201	2	0	0,6717	13%	0%	0%	4,44%
BHT70 _{600,V25}	0,6242	0,0117	0,024	14	12	0,024	93%	80%	96%	89,92%
BHT70 _{700,V25}	0,7695	0,0120	0,057	12	9	0,1482	80%	60%	78%	72,65%
BHT70 _{800,V25}	0,8950	0,0124	0,103	9	6	0,2757	60%	40%	59%	52,98%
BHT70 _{900,V25}	1,0191	0,0129	0,163	6	3	0,4039	40%	20%	40%	33,29%
BHT70 _{1000,V25}	1,1538	0,0135	0,236	3	0	0,5448	20%	0%	19%	12,96%
BHT80 _{600,V25}	0,6722	0,0116	0,017	14	12	0,0487	93%	80%	93%	88,69%
BHT80 _{700,V25}	0,8106	0,0120	0,050	11	9	0,1876	73%	60%	72%	68,47%
BHT80 _{800,V25}	0,9359	0,0124	0,096	8	6	0,3147	53%	40%	53%	48,83%
BHT80 _{900,V25}	1,0631	0,0128	0,154	5	3	0,4451	33%	20%	34%	29,02%
BHT80 _{1000,V25}	1,1944	0,0134	0,225	2	0	0,5816	13%	0%	13%	8,92%

Tabela III.10: Análise multi-critérios para as amostras torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,25 para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BT _{600,V25}	0,0115	0,0000	14	14	0	93%	93%	100%	96%
BT _{700,V25}	0,0118	0,0341	11	11	0,034101	73%	73%	86%	77%
BT _{800,V25}	0,0122	0,0786	8	8	0,078603	53%	53%	67%	58%
BT _{900,V25}	0,0127	0,1338	5	5	0,133805	33%	33%	43%	37%
BT _{1000,V25}	0,0132	0,2012	2	2	0,201207	13%	13%	15%	14%
BHT70 _{600,V25}	0,0117	0,0243	12	12	0,024301	80%	80%	90%	83%
BHT70 _{700,V25}	0,0120	0,0570	10	9	0,057002	67%	60%	76%	68%
BHT70 _{800,V25}	0,0124	0,1034	7	6	0,103404	47%	40%	56%	48%
BHT70 _{900,V25}	0,0129	0,1626	3	3	0,162606	20%	20%	31%	24%
BHT70 _{1000,V25}	0,0135	0,2362	0	0	0,236208	0%	0%	0%	0%
BHT80 _{600,V25}	0,0116	0,0168	13	13	0,0168	87%	87%	93%	89%
BHT80 _{700,V25}	0,0120	0,0499	10	10	0,049903	67%	67%	79%	71%
BHT80 _{800,V25}	0,0124	0,0957	7	7	0,095704	47%	47%	59%	51%
BHT80 _{900,V25}	0,0128	0,1536	4	4	0,153606	27%	27%	35%	29%
BHT80 _{1000,V25}	0,0134	0,2249	1	1	0,224908	7%	7%	5%	6%

Tabela III.11: Análise multi-critérios para as amostras in natura e torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,25 para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,V25}	0,3352	0,0120	0,107	29	16	0,107	97%	53%	89%	80%
BN _{700,V25}	0,5395	0,0124	0,128	26	14	0,2198	87%	47%	77%	70%
BN _{800,V25}	0,6549	0,0129	0,182	22	9	0,3383	73%	30%	65%	56%
BN _{900,V25}	0,7658	0,0135	0,252	18	3	0,4576	60%	10%	52%	41%
BN _{1000,V25}	0,8750	0,0142	0,341	12	0	0,5818	40%	0%	39%	26%
BHN70 _{600,V25}	0,4382	0,0118	0,050	29	23	0,1068	97%	77%	89%	87%
BHN70 _{700,V25}	0,5758	0,0122	0,083	27	17	0,2438	90%	57%	75%	74%
BHN70 _{800,V25}	0,6935	0,0127	0,133	21	12	0,3643	70%	40%	62%	57%
BHN70 _{900,V25}	0,8070	0,0132	0,198	16	6	0,4831	53%	20%	50%	41%
BHN70 _{1000,V25}	0,9239	0,0139	0,280	10	0	0,6091	33%	0%	36%	23%
BHN80 _{600,V25}	0,4527	0,0118	0,046	29	23	0,1198	97%	77%	87%	87%
BHN80 _{700,V25}	0,5878	0,0122	0,078	27	18	0,2551	90%	60%	73%	74%
BHN80 _{800,V25}	0,7038	0,0126	0,127	22	12	0,3736	73%	40%	61%	58%
BHN80 _{900,V25}	0,8158	0,0132	0,191	15	6	0,4905	50%	20%	49%	40%
BHN80 _{1000,V25}	0,9343	0,0138	0,271	10	0	0,617	33%	0%	36%	23%
BT _{600,V25}	0,7880	0,0115	0,000	29	16	0,4528	97%	53%	53%	68%
BT _{700,V25}	0,9130	0,0118	0,034	26	10	0,5778	87%	33%	40%	53%
BT _{800,V25}	1,0354	0,0122	0,079	21	5	0,7005	70%	17%	27%	38%
BT _{900,V25}	1,1542	0,0127	0,134	13	2	0,8202	43%	7%	14%	21%
BT _{1000,V25}	1,2898	0,0132	0,201	8	0	0,9576	27%	0%	0%	9%
BHT70 _{600,V25}	0,6242	0,0117	0,024	29	21	0,2891	97%	70%	70%	79%
BHT70 _{700,V25}	0,7695	0,0120	0,057	25	14	0,4346	83%	47%	55%	62%
BHT70 _{800,V25}	0,8950	0,0124	0,103	20	8	0,561	67%	27%	41%	45%
BHT70 _{900,V25}	1,0191	0,0129	0,163	13	3	0,687	43%	10%	28%	27%
BHT70 _{1000,V25}	1,1538	0,0135	0,236	7	0	0,8251	23%	0%	14%	12%
BHT80 _{600,V25}	0,6722	0,0116	0,017	29	20	0,337	97%	67%	65%	76%
BHT80 _{700,V25}	0,8106	0,0120	0,050	25	13	0,4756	83%	43%	50%	59%
BHT80 _{800,V25}	0,9359	0,0124	0,096	19	6	0,6015	63%	20%	37%	40%
BHT80 _{900,V25}	1,0631	0,0128	0,154	12	3	0,7302	40%	10%	24%	25%
BHT80 _{1000,V25}	1,1944	0,0134	0,225	6	0	0,8643	20%	0%	10%	10%

Tabela III.12: Análise multi-critérios para as amostras in natura e torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,25 para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,V25}	0,0120	0,107	23	16	0,107001	77%	53%	69%	66%
BN _{700,V25}	0,0124	0,128	17	14	0,128003	57%	47%	62%	55%
BN _{800,V25}	0,0129	0,182	10	9	0,182005	33%	30%	47%	37%
BN _{900,V25}	0,0135	0,252	4	3	0,252008	13%	10%	26%	16%
BN _{1000,V25}	0,0142	0,341	0	0	0,341011	0%	0%	0%	0%
BHN70 _{600,V25}	0,0118	0,050	26	24	0,050001	87%	80%	85%	84%
BHN70 _{700,V25}	0,0122	0,083	21	18	0,083003	70%	60%	76%	69%
BHN70 _{800,V25}	0,0127	0,133	13	13	0,133005	43%	43%	61%	49%
BHN70 _{900,V25}	0,0132	0,198	8	7	0,198007	27%	23%	42%	31%
BHN70 _{1000,V25}	0,0139	0,280	1	1	0,28001	3%	3%	18%	8%
BHN80 _{600,V25}	0,0118	0,046	26	25	0,046001	87%	83%	87%	86%
BHN80 _{700,V25}	0,0122	0,078	21	20	0,078003	70%	67%	77%	71%
BHN80 _{800,V25}	0,0126	0,127	15	14	0,127005	50%	47%	63%	53%
BHN80 _{900,V25}	0,0132	0,191	8	8	0,191008	27%	27%	44%	32%
BHN80 _{1000,V25}	0,0138	0,271	2	2	0,27101	7%	7%	21%	11%
BT _{600,V25}	0,0115	0,000	29	29	0	97%	97%	100%	98%
BT _{700,V25}	0,0118	0,034	26	26	0,034001	87%	87%	90%	88%
BT _{800,V25}	0,0122	0,079	21	19	0,079003	70%	63%	77%	70%
BT _{900,V25}	0,0127	0,134	13	12	0,134005	43%	40%	61%	48%
BT _{1000,V25}	0,0132	0,201	8	6	0,201007	27%	20%	41%	29%
BHT70 _{600,V25}	0,0117	0,024	27	27	0,024001	90%	90%	93%	91%
BHT70 _{700,V25}	0,0120	0,057	23	22	0,057002	77%	73%	83%	78%
BHT70 _{800,V25}	0,0124	0,103	18	16	0,103004	60%	53%	70%	61%
BHT70 _{900,V25}	0,0129	0,163	10	10	0,163006	33%	33%	52%	40%
BHT70 _{1000,V25}	0,0135	0,236	4	4	0,236008	13%	13%	31%	19%
BHT80 _{600,V25}	0,0116	0,017	28	28	0,017	93%	93%	95%	94%
BHT80 _{700,V25}	0,0120	0,050	24	23	0,050002	80%	77%	85%	81%
BHT80 _{800,V25}	0,0124	0,096	18	17	0,096004	60%	57%	72%	63%
BHT80 _{900,V25}	0,0128	0,154	11	11	0,154005	37%	37%	55%	43%
BHT80 _{1000,V25}	0,0134	0,225	5	5	0,225008	17%	17%	34%	22%

Tabela III.13: Análise multi-critérios para as amostras in natura na atmosfera com vapor/ar = 0,50 para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,V50}	0,2853	0,0121	0,037	14	11	0,037	93%	73%	92%	86,37%
BN _{700,V50}	0,4085	0,0126	0,076	11	9	0,1322	73%	60%	73%	68,78%
BN _{800,V50}	0,5170	0,0132	0,134	8	6	0,2458	53%	40%	50%	47,72%
BN _{900,V50}	0,6157	0,0139	0,211	5	3	0,3569	33%	20%	27%	26,83%
BN _{1000,V50}	0,7179	0,0147	0,311	2	0	0,4806	13%	0%	2%	5,08%
BHN70 _{600,V50}	0,2940	0,0119	0,004	14	12	0,009	93%	80%	98%	90,50%
BHN70 _{700,V50}	0,4222	0,0124	0,040	11	9	0,138	73%	60%	72%	68,39%
BHN70 _{800,V50}	0,5292	0,0130	0,095	8	6	0,2486	53%	40%	49%	47,53%
BHN70 _{900,V50}	0,6356	0,0136	0,167	5	3	0,3625	33%	20%	26%	26,45%
BHN70 _{1000,V50}	0,7413	0,0144	0,261	2	0	0,4829	13%	0%	1%	4,92%
BHN80 _{600,V50}	0,3039	0,0119	0,000	14	12	0,0186	93%	80%	96%	89,85%
BHN80 _{700,V50}	0,4331	0,0124	0,035	12	9	0,1485	80%	60%	70%	69,90%
BHN80 _{800,V50}	0,5365	0,0129	0,088	8	6	0,2547	53%	40%	48%	47,11%
BHN80 _{900,V50}	0,6414	0,0135	0,159	5	3	0,3664	33%	20%	25%	26,18%
BHN80 _{1000,V50}	0,7525	0,0143	0,250	2	0	0,4899	13%	0%	0%	4,44%

Tabela III.14: Análise multi-critérios para as amostras in natura na atmosfera com vapor/ar = 0,50 para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,V50}	0,0121	0,037	12	11	0,037001	80%	73%	88%	80%
BN _{700,V50}	0,0126	0,076	9	9	0,076003	60%	60%	76%	65%
BN _{800,V50}	0,0132	0,134	6	6	0,134006	40%	40%	57%	46%
BN _{900,V50}	0,0139	0,211	3	3	0,211009	20%	20%	32%	24%
BN _{1000,V50}	0,0147	0,311	0	0	0,311013	0%	0%	0%	0%
BHN70 _{600,V50}	0,0119	0,004	14	13	0,004	93%	87%	99%	93%
BHN70 _{700,V50}	0,0124	0,040	11	10	0,040003	73%	67%	87%	76%
BHN70 _{800,V50}	0,0130	0,095	7	7	0,095006	47%	47%	69%	54%
BHN70 _{900,V50}	0,0136	0,167	4	4	0,167009	27%	27%	46%	33%
BHN70 _{1000,V50}	0,0144	0,261	1	1	0,261012	7%	7%	16%	10%
BHN80 _{600,V50}	0,0119	0,000	14	14	0	93%	93%	100%	96%
BHN80 _{700,V50}	0,0124	0,035	12	11	0,035004	80%	73%	89%	81%
BHN80 _{800,V50}	0,0129	0,088	8	8	0,088006	53%	53%	72%	59%
BHN80 _{900,V50}	0,0135	0,159	5	5	0,159008	33%	33%	49%	39%
BHN80 _{1000,V50}	0,0143	0,250	2	2	0,250012	13%	13%	20%	15%

Tabela III.15: Análise multi-critérios para as amostras torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,50 para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BT _{600,V50}	0,5031	0,0116	0,000	14	12	0,099	93%	80%	84%	85,66%
BT _{700,V50}	0,6418	0,0120	0,032	11	9	0,2379	73%	60%	61%	64,67%
BT _{800,V50}	0,7621	0,0124	0,079	8	6	0,3593	53%	40%	41%	44,65%
BT _{900,V50}	0,8802	0,0130	0,139	5	3	0,48	33%	20%	21%	24,67%
BT _{1000,V50}	1,0000	0,0136	0,215	2	0	0,6051	13%	0%	0%	4,44%
BHT70 _{600,V50}	0,4041	0,0118	0,022	14	12	0,022	93%	80%	96%	89,90%
BHT70 _{700,V50}	0,5442	0,0122	0,056	11	9	0,143	73%	60%	76%	69,90%
BHT70 _{800,V50}	0,6654	0,0127	0,107	8	6	0,2671	53%	40%	56%	49,73%
BHT70 _{900,V50}	0,7803	0,0133	0,174	5	3	0,3882	33%	20%	36%	29,73%
BHT70 _{1000,V50}	0,9058	0,0140	0,259	2	0	0,5237	13%	0%	13%	8,93%
BHT80 _{600,V50}	0,4311	0,0117	0,016	14	12	0,0288	93%	80%	95%	89,52%
BHT80 _{700,V50}	0,5759	0,0121	0,049	11	9	0,1731	73%	60%	71%	68,24%
BHT80 _{800,V50}	0,6929	0,0126	0,098	8	6	0,2925	53%	40%	52%	48,33%
BHT80 _{900,V50}	0,8100	0,0132	0,163	5	3	0,4145	33%	20%	31%	28,28%
BHT80 _{1000,V50}	0,9368	0,0138	0,245	2	0	0,5494	13%	0%	9%	7,51%

Tabela III.16: Análise multi-critérios para as amostras torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,50 para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BT _{600,V50}	0,0116	0,000	14	14	0	93%	93%	100%	96%
BT _{700,V50}	0,0120	0,032	11	11	0,032002	73%	73%	88%	78%
BT _{800,V50}	0,0124	0,079	8	8	0,079004	53%	53%	69%	59%
BT _{900,V50}	0,0130	0,139	5	5	0,139007	33%	33%	46%	38%
BT _{1000,V50}	0,0136	0,215	2	2	0,215009	13%	13%	17%	15%
BHT70 _{600,V50}	0,0118	0,022	12	12	0,022001	80%	80%	92%	84%
BHT70 _{700,V50}	0,0122	0,056	9	9	0,056003	60%	60%	78%	66%
BHT70 _{800,V50}	0,0127	0,107	6	6	0,107006	40%	40%	59%	46%
BHT70 _{900,V50}	0,0133	0,174	3	3	0,174008	20%	20%	33%	24%
BHT70 _{1000,V50}	0,0140	0,259	0	0	0,259011	0%	0%	0%	0%
BHT80 _{600,V50}	0,0117	0,016	13	13	0,016	87%	87%	94%	89%
BHT80 _{700,V50}	0,0121	0,049	10	10	0,049003	67%	67%	81%	71%
BHT80 _{800,V50}	0,0126	0,098	7	7	0,098005	47%	47%	62%	52%
BHT80 _{900,V50}	0,0132	0,163	4	4	0,163008	27%	27%	37%	30%
BHT80 _{1000,V50}	0,0138	0,245	1	1	0,24501	7%	7%	5%	6%

Tabela III.17: Análise multi-critérios para as amostras in natura e torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,50 para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,V50}	0,2853	0,0121	0,076	29	20	0,076	97%	67%	89%	84,26%
BN _{700,V50}	0,4085	0,0126	0,116	25	15	0,1508	83%	50%	79%	70,81%
BN _{800,V50}	0,5170	0,0132	0,177	20	9	0,262	67%	30%	64%	53,44%
BN _{900,V50}	0,6157	0,0139	0,257	15	4	0,3757	50%	13%	48%	37,08%
BN _{1000,V50}	0,7179	0,0147	0,360	9	0	0,5035	30%	0%	30%	20,06%
BHN70 _{600,V50}	0,2940	0,0119	0,042	29	23	0,0421	97%	77%	94%	89,17%
BHN70 _{700,V50}	0,4222	0,0124	0,079	25	18	0,1452	83%	60%	80%	74,40%
BHN70 _{800,V50}	0,5292	0,0130	0,136	20	12	0,2573	67%	40%	64%	57,00%
BHN70 _{900,V50}	0,6356	0,0136	0,211	15	6	0,3742	50%	20%	48%	39,37%
BHN70 _{1000,V50}	0,7413	0,0144	0,308	9	0	0,4987	30%	0%	31%	20,28%
BHN80 _{600,V50}	0,3039	0,0119	0,037	29	23	0,0385	97%	77%	95%	89,33%
BHN80 _{700,V50}	0,4331	0,0124	0,073	25	18	0,1535	83%	60%	79%	74,02%
BHN80 _{800,V50}	0,5365	0,0129	0,129	20	12	0,2621	67%	40%	64%	56,77%
BHN80 _{900,V50}	0,6414	0,0135	0,202	15	6	0,3766	50%	20%	48%	39,26%
BHN80 _{1000,V50}	0,7525	0,0143	0,296	9	0	0,5039	30%	0%	30%	20,04%
BT _{600,V50}	0,5031	0,0116	0,000	29	21	0,2178	97%	70%	70%	78,82%
BT _{700,V50}	0,6418	0,0120	0,032	26	12	0,3566	87%	40%	51%	59,07%
BT _{800,V50}	0,7621	0,0124	0,079	20	6	0,4775	67%	20%	34%	40,15%
BT _{900,V50}	0,8802	0,0130	0,139	13	3	0,5974	43%	10%	17%	23,50%
BT _{1000,V50}	1,0000	0,0136	0,215	7	0	0,7211	23%	0%	0%	7,78%
BHT70 _{600,V50}	0,4041	0,0118	0,022	29	24	0,1191	97%	80%	83%	86,72%
BHT70 _{700,V50}	0,5442	0,0122	0,056	24	15	0,2598	80%	50%	64%	64,66%
BHT70 _{800,V50}	0,6654	0,0127	0,107	18	9	0,3829	60%	30%	47%	45,63%
BHT70 _{900,V50}	0,7803	0,0133	0,174	12	3	0,5021	40%	10%	30%	26,79%
BHT70 _{1000,V50}	0,9058	0,0140	0,259	5	0	0,6352	17%	0%	12%	9,53%
BHT80 _{600,V50}	0,4311	0,0117	0,016	29	22	0,1459	97%	73%	80%	83,26%
BHT80 _{700,V50}	0,5759	0,0121	0,049	24	15	0,2911	80%	50%	60%	63,21%
BHT80 _{800,V50}	0,6929	0,0126	0,098	18	9	0,4095	60%	30%	43%	44,40%
BHT80 _{900,V50}	0,8100	0,0132	0,163	12	3	0,5299	40%	10%	27%	25,51%
BHT80 _{1000,V50}	0,9368	0,0138	0,245	6	0	0,6629	20%	0%	8%	9,36%

Tabela III.18: Análise multi-critérios para as amostras in natura e torrefadas na atmosfera com vapor/ar = 0,50 para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,V50}	0,0121	0,076	23	20	0,076002	77%	67%	79%	74%
BN _{700,V50}	0,0126	0,116	17	15	0,116004	57%	50%	68%	58%
BN _{800,V50}	0,0132	0,177	11	9	0,177007	37%	30%	51%	39%
BN _{900,V50}	0,0139	0,257	4	4	0,25701	13%	13%	29%	18%
BN _{1000,V50}	0,0147	0,360	0	0	0,360013	0%	0%	0%	0%
BHN70 _{600,V50}	0,0119	0,042	26	24	0,042001	87%	80%	88%	85%
BHN70 _{700,V50}	0,0124	0,079	20	19	0,079004	67%	63%	78%	69%
BHN70 _{800,V50}	0,0130	0,136	13	13	0,136007	43%	43%	62%	50%
BHN70 _{900,V50}	0,0136	0,211	7	7	0,211009	23%	23%	41%	29%
BHN70 _{1000,V50}	0,0144	0,308	1	1	0,308013	3%	3%	14%	7%
BHN80 _{600,V50}	0,0119	0,037	26	25	0,037001	87%	83%	90%	87%
BHN80 _{700,V50}	0,0124	0,073	21	20	0,073004	70%	67%	80%	72%
BHN80 _{800,V50}	0,0129	0,129	14	14	0,129007	47%	47%	64%	52%
BHN80 _{900,V50}	0,0135	0,202	8	8	0,202009	27%	27%	44%	32%
BHN80 _{1000,V50}	0,0143	0,296	2	2	0,296012	7%	7%	18%	10%
BT _{600,V50}	0,0116	0,000	29	29	0	97%	97%	100%	98%
BT _{700,V50}	0,0120	0,032	26	24	0,032002	87%	80%	91%	86%
BT _{800,V50}	0,0124	0,079	20	19	0,079004	67%	63%	78%	69%
BT _{900,V50}	0,0130	0,139	13	12	0,139007	43%	40%	61%	48%
BT _{1000,V50}	0,0136	0,215	7	6	0,215009	23%	20%	40%	28%
BHT70 _{600,V50}	0,0118	0,022	27	27	0,022001	90%	90%	94%	91%
BHT70 _{700,V50}	0,0122	0,056	22	21	0,056003	73%	70%	84%	76%
BHT70 _{800,V50}	0,0127	0,107	16	15	0,107006	53%	50%	70%	58%
BHT70 _{900,V50}	0,0133	0,174	10	9	0,174008	33%	30%	52%	38%
BHT70 _{1000,V50}	0,0140	0,259	3	3	0,259011	10%	10%	28%	16%
BHT80 _{600,V50}	0,0117	0,016	28	28	0,016	93%	93%	96%	94%
BHT80 _{700,V50}	0,0121	0,049	23	23	0,049003	77%	77%	86%	80%
BHT80 _{800,V50}	0,0126	0,098	17	17	0,098005	57%	57%	73%	62%
BHT80 _{900,V50}	0,0132	0,163	11	11	0,163008	37%	37%	55%	43%
BHT80 _{1000,V50}	0,0138	0,245	5	5	0,24501	17%	17%	32%	22%

Tabela III.19: Análise multi-critérios para as amostras in natura em todas as atmosferas para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,A}	0,6477	0,0119	0,054	44	22	0,3628	98%	49%	62%	69,72%
BN _{700,A}	0,7803	0,0122	0,090	39	12	0,496	87%	27%	49%	54,02%
BN _{800,A}	0,8936	0,0126	0,138	32	6	0,6107	71%	13%	37%	40,44%
BN _{900,A}	1,0096	0,0131	0,198	23	2	0,7292	51%	4%	25%	26,73%
BN _{1000,A}	1,1319	0,0137	0,272	12	0	0,8559	27%	0%	12%	12,73%
BHN70 _{600,A}	0,7492	0,0117	0,004	44	19	0,4639	98%	42%	52%	64,02%
BHN70 _{700,A}	0,8821	0,0120	0,036	42	11	0,5968	93%	24%	38%	52,03%
BHN70 _{800,A}	1,0000	0,0124	0,080	37	6	0,715	82%	13%	26%	40,55%
BHN70 _{900,A}	1,1148	0,0128	0,135	29	3	0,8307	64%	7%	14%	28,41%
BHN70 _{1000,A}	1,2446	0,0134	0,202	18	0	0,9623	40%	0%	1%	13,51%
BHN80 _{600,A}	0,7740	0,0117	0,000	44	17	0,4887	98%	38%	49%	61,68%
BHN80 _{700,A}	0,8969	0,0120	0,033	42	10	0,6116	93%	22%	37%	50,78%
BHN80 _{800,A}	1,0128	0,0123	0,077	37	5	0,7278	82%	11%	25%	39,37%
BHN80 _{900,A}	1,1244	0,0128	0,131	29	3	0,8402	64%	7%	13%	28,09%
BHN80 _{1000,A}	1,2772	0,0133	0,197	20	0	0,9674	44%	0%	0%	14,81%
BN _{600,V25}	0,3352	0,0120	0,129	42	29	0,1314	93%	64%	86%	81,40%
BN _{700,V25}	0,5395	0,0124	0,150	39	19	0,2705	87%	42%	72%	66,98%
BN _{800,V25}	0,6549	0,0129	0,205	31	10	0,3895	69%	22%	60%	50,28%
BN _{900,V25}	0,7658	0,0135	0,277	24	3	0,5094	53%	7%	47%	35,78%
BN _{1000,V25}	0,8750	0,0142	0,368	16	0	0,6341	36%	0%	34%	23,34%
BHN70 _{600,V25}	0,4382	0,0118	0,071	44	31	0,1578	98%	69%	84%	83,45%
BHN70 _{700,V25}	0,5758	0,0122	0,105	42	22	0,295	93%	49%	70%	70,58%
BHN70 _{800,V25}	0,6935	0,0127	0,155	35	13	0,4155	78%	29%	57%	54,57%
BHN70 _{900,V25}	0,8070	0,0132	0,222	24	4	0,5348	53%	9%	45%	35,65%
BHN70 _{1000,V25}	0,9239	0,0139	0,305	14	0	0,661	31%	0%	32%	20,93%
BHN80 _{600,V25}	0,4527	0,0118	0,067	44	31	0,1709	98%	69%	82%	83,00%
BHN80 _{700,V25}	0,5878	0,0122	0,100	42	22	0,3061	93%	49%	68%	70,19%
BHN80 _{800,V25}	0,7038	0,0126	0,150	36	13	0,4248	80%	29%	56%	54,99%
BHN80 _{900,V25}	0,8158	0,0132	0,215	25	4	0,542	56%	9%	44%	36,14%
BHN80 _{1000,V25}	0,9343	0,0138	0,297	15	0	0,6691	33%	0%	31%	21,39%
BN _{600,V50}	0,2853	0,0121	0,158	44	22	0,158	98%	49%	84%	76,78%
BN _{700,V50}	0,4085	0,0126	0,201	40	18	0,2154	89%	40%	78%	68,87%
BN _{800,V50}	0,5170	0,0132	0,266	35	11	0,315	78%	24%	67%	56,55%
BN _{900,V50}	0,6157	0,0139	0,352	29	4	0,4303	64%	9%	56%	42,95%
BN _{1000,V50}	0,7179	0,0147	0,463	22	0	0,5648	49%	0%	42%	30,17%
BHN70 _{600,V50}	0,2940	0,0119	0,121	44	30	0,121	98%	67%	87%	83,98%
BHN70 _{700,V50}	0,4222	0,0124	0,161	40	20	0,1889	89%	44%	80%	71,27%
BHN70 _{800,V50}	0,5292	0,0130	0,222	35	12	0,2941	78%	27%	70%	58,01%
BHN70 _{900,V50}	0,6356	0,0136	0,303	29	5	0,4137	64%	11%	57%	44,26%
BHN70 _{1000,V50}	0,7413	0,0144	0,407	22	0	0,5454	49%	0%	44%	30,84%
BHN80 _{600,V50}	0,3039	0,0119	0,116	44	30	0,1162	98%	67%	88%	84,14%
BHN80 _{700,V50}	0,4331	0,0124	0,155	41	21	0,1909	91%	47%	80%	72,68%
BHN80 _{800,V50}	0,5365	0,0129	0,215	35	13	0,2954	78%	29%	69%	58,71%
BHN80 _{900,V50}	0,6414	0,0135	0,294	29	6	0,4132	64%	13%	57%	45,02%
BHN80 _{1000,V50}	0,7525	0,0143	0,395	21	0	0,5469	47%	0%	43%	30,04%

Tabela III.20: Análise multi-critérios para as amostras in natura em todas as atmosferas para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,A}	0,0119	0,054	42	38	0,054	93%	84%	88%	89%
BN _{700,A}	0,0122	0,090	37	31	0,090001	82%	69%	81%	77%
BN _{800,A}	0,0126	0,138	29	23	0,138003	64%	51%	70%	62%
BN _{900,A}	0,0131	0,198	20	15	0,198005	44%	33%	57%	45%
BN _{1000,A}	0,0137	0,272	10	7	0,272007	22%	16%	41%	26%
BHN70 _{600,A}	0,0117	0,004	44	43	0,004	98%	96%	99%	97%
BHN70 _{700,A}	0,0120	0,036	42	36	0,036001	93%	80%	92%	89%
BHN70 _{800,A}	0,0124	0,080	36	29	0,080003	80%	64%	83%	76%
BHN70 _{900,A}	0,0128	0,135	29	20	0,135004	64%	44%	71%	60%
BHN70 _{1000,A}	0,0134	0,202	17	11	0,202007	38%	24%	56%	40%
BHN80 _{600,A}	0,0117	0,000	44	44	0	98%	98%	100%	99%
BHN80 _{700,A}	0,0120	0,033	42	37	0,033001	93%	82%	93%	89%
BHN80 _{800,A}	0,0123	0,077	37	30	0,077002	82%	67%	83%	77%
BHN80 _{900,A}	0,0128	0,131	29	21	0,131005	64%	47%	72%	61%
BHN80 _{1000,A}	0,0133	0,197	20	12	0,197006	44%	27%	57%	43%
BN _{600,V25}	0,0120	0,129	37	30	0,129	82%	67%	72%	74%
BN _{700,V25}	0,0124	0,150	30	25	0,150002	67%	56%	68%	63%
BN _{800,V25}	0,0129	0,205	19	16	0,205004	42%	36%	56%	45%
BN _{900,V25}	0,0135	0,277	10	9	0,277006	22%	20%	40%	27%
BN _{1000,V25}	0,0142	0,368	3	3	0,368008	7%	7%	21%	11%
BHN70 _{600,V25}	0,0118	0,071	42	38	0,071	93%	84%	85%	87%
BHN70 _{700,V25}	0,0122	0,105	37	29	0,105001	82%	64%	77%	75%
BHN70 _{800,V25}	0,0127	0,155	26	20	0,155003	58%	44%	67%	56%
BHN70 _{900,V25}	0,0132	0,222	16	12	0,222005	36%	27%	52%	38%
BHN70 _{1000,V25}	0,0139	0,305	5	5	0,305008	11%	11%	34%	19%
BHN80 _{600,V25}	0,0118	0,067	42	39	0,067	93%	87%	86%	89%
BHN80 _{700,V25}	0,0122	0,100	37	30	0,100001	82%	67%	78%	76%
BHN80 _{800,V25}	0,0126	0,150	29	22	0,150003	64%	49%	68%	60%
BHN80 _{900,V25}	0,0132	0,215	17	13	0,215005	38%	29%	54%	40%
BHN80 _{1000,V25}	0,0138	0,297	7	6	0,297007	16%	13%	36%	22%
BN _{600,V50}	0,0121	0,158	34	22	0,158001	76%	49%	66%	63%
BN _{700,V50}	0,0126	0,201	25	18	0,201002	56%	40%	57%	51%
BN _{800,V50}	0,0132	0,266	15	11	0,266004	33%	24%	43%	33%
BN _{900,V50}	0,0139	0,352	5	4	0,352007	11%	9%	24%	15%
BN _{1000,V50}	0,0147	0,463	0	0	0,46301	0%	0%	0%	0%
BHN70 _{600,V50}	0,0119	0,121	40	31	0,121	89%	69%	74%	77%
BHN70 _{700,V50}	0,0124	0,161	29	21	0,161002	64%	47%	65%	59%
BHN70 _{800,V50}	0,0130	0,222	17	13	0,222004	38%	29%	52%	40%
BHN70 _{900,V50}	0,0136	0,303	8	6	0,303006	18%	13%	35%	22%
BHN70 _{1000,V50}	0,0144	0,407	1	1	0,407009	2%	2%	12%	6%
BHN80 _{600,V50}	0,0119	0,116	40	32	0,116	89%	71%	75%	78%
BHN80 _{700,V50}	0,0124	0,155	30	23	0,155002	67%	51%	67%	61%
BHN80 _{800,V50}	0,0129	0,215	19	15	0,215003	42%	33%	54%	43%
BHN80 _{900,V50}	0,0135	0,294	10	8	0,294006	22%	18%	37%	26%
BHN80 _{1000,V50}	0,0143	0,395	2	2	0,395009	4%	4%	15%	8%

Tabela III.21: Análise multi-critérios para as amostras torrefadas em todas as atmosferas para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BT _{600,A}	1,4253	0,0114	0,000	44	9	1,0212	98%	20%	28%	48,74%
BT _{700,A}	1,4976	0,0117	0,040	41	6	1,0935	91%	13%	23%	42,61%
BT _{800,A}	1,5904	0,0120	0,085	37	4	1,1864	82%	9%	17%	36,00%
BT _{900,A}	1,6959	0,0124	0,138	28	1	1,2923	62%	2%	9%	24,63%
BT _{1000,A}	1,8301	0,0128	0,199	17	0	1,4273	38%	0%	0%	12,59%
BHT70 _{600,A}	1,1336	0,0115	0,023	44	16	0,7295	98%	36%	49%	60,74%
BHT70 _{700,A}	1,2444	0,0118	0,061	42	10	0,8404	93%	22%	41%	52,23%
BHT70 _{800,A}	1,3596	0,0122	0,107	37	6	0,9559	82%	13%	33%	42,86%
BHT70 _{900,A}	1,4890	0,0126	0,161	27	3	1,0861	60%	7%	24%	30,19%
BHT70 _{1000,A}	1,6335	0,0130	0,226	16	0	1,2319	36%	0%	14%	16,42%
BHT80 _{600,A}	1,2176	0,0115	0,016	44	13	0,8135	98%	29%	43%	56,56%
BHT80 _{700,A}	1,3211	0,0118	0,054	42	9	0,9171	93%	20%	36%	49,69%
BHT80 _{800,A}	1,4293	0,0121	0,100	37	6	1,0255	82%	13%	28%	41,24%
BHT80 _{900,A}	1,5562	0,0125	0,154	28	3	1,153	62%	7%	19%	29,37%
BHT80 _{1000,A}	1,6855	0,0130	0,218	18	0	1,2835	40%	0%	10%	16,69%
BT _{600,V25}	0,7880	0,0115	0,075	44	25	0,3849	98%	56%	73%	75,46%
BT _{700,V25}	0,9130	0,0118	0,111	41	16	0,5107	91%	36%	64%	63,63%
BT _{800,V25}	1,0354	0,0122	0,159	36	9	0,6346	80%	20%	56%	51,85%
BT _{900,V25}	1,1542	0,0127	0,219	28	3	0,7563	62%	7%	47%	38,63%
BT _{1000,V25}	1,2898	0,0132	0,291	20	0	0,896	44%	0%	37%	27,22%
BHT70 _{600,V25}	0,6242	0,0117	0,101	44	29	0,227	98%	64%	84%	82,11%
BHT70 _{700,V25}	0,7695	0,0120	0,136	41	21	0,3716	91%	47%	74%	70,58%
BHT70 _{800,V25}	0,8950	0,0124	0,186	35	12	0,4996	78%	27%	65%	56,48%
BHT70 _{900,V25}	1,0191	0,0129	0,250	28	3	0,6285	62%	7%	56%	41,62%
BHT70 _{1000,V25}	1,1538	0,0135	0,329	21	0	0,7703	47%	0%	46%	30,90%
BHT80 _{600,V25}	0,6722	0,0116	0,093	44	28	0,2718	98%	62%	81%	80,32%
BHT80 _{700,V25}	0,8106	0,0120	0,129	41	19	0,4108	91%	42%	71%	68,18%
BHT80 _{800,V25}	0,9359	0,0124	0,178	34	11	0,5384	76%	24%	62%	54,09%
BHT80 _{900,V25}	1,0631	0,0128	0,240	28	3	0,6694	62%	7%	53%	40,66%
BHT80 _{1000,V25}	1,1944	0,0134	0,317	21	0	0,8069	47%	0%	43%	30,04%
BT _{600,V50}	0,5031	0,0116	0,134	44	28	0,15	98%	62%	89%	83,16%
BT _{700,V50}	0,6418	0,0120	0,170	40	20	0,2637	89%	44%	82%	71,62%
BT _{800,V50}	0,7621	0,0124	0,223	36	12	0,3848	80%	27%	73%	59,90%
BT _{900,V50}	0,8802	0,0130	0,292	30	5	0,5102	67%	11%	64%	47,34%
BT _{1000,V50}	1,0000	0,0136	0,378	24	0	0,6428	53%	0%	55%	36,10%
BHT70 _{600,V50}	0,4041	0,0118	0,159	44	25	0,159	98%	56%	89%	80,73%
BHT70 _{700,V50}	0,5442	0,0122	0,197	41	18	0,2182	91%	40%	85%	71,94%
BHT70 _{800,V50}	0,6654	0,0127	0,255	37	9	0,3253	82%	20%	77%	59,81%
BHT70 _{900,V50}	0,7803	0,0133	0,331	32	3	0,4473	71%	7%	69%	48,81%
BHT70 _{1000,V50}	0,9058	0,0140	0,427	26	0	0,5888	58%	0%	59%	38,84%
BHT80 _{600,V50}	0,4311	0,0117	0,152	44	26	0,1523	98%	58%	89%	81,63%
BHT80 _{700,V50}	0,5759	0,0121	0,189	41	18	0,2278	91%	40%	84%	71,72%
BHT80 _{800,V50}	0,6929	0,0126	0,245	36	10	0,3385	80%	22%	76%	59,50%
BHT80 _{900,V50}	0,8100	0,0132	0,319	31	4	0,4631	69%	9%	68%	48,44%
BHT80 _{1000,V50}	0,9368	0,0138	0,412	24	0	0,6047	53%	0%	58%	36,99%

Tabela III.22: Análise multi-critérios para as amostras torrefadas em todas as atmosferas para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BT _{600,A}	0,0114	0,000	44	44	0	98%	98%	100%	99%
BT _{700,A}	0,0117	0,040	41	38	0,040001	91%	84%	91%	89%
BT _{800,A}	0,0120	0,085	37	31	0,085002	82%	69%	80%	77%
BT _{900,A}	0,0124	0,138	28	22	0,138004	62%	49%	68%	60%
BT _{1000,A}	0,0128	0,199	17	13	0,199005	38%	29%	53%	40%
BHT70 _{600,A}	0,0115	0,023	43	42	0,023	96%	93%	95%	95%
BHT70 _{700,A}	0,0118	0,061	40	34	0,061001	89%	76%	86%	83%
BHT70 _{800,A}	0,0122	0,107	33	25	0,107003	73%	56%	75%	68%
BHT70 _{900,A}	0,0126	0,161	23	17	0,161004	51%	38%	62%	50%
BHT70 _{1000,A}	0,0130	0,226	14	9	0,226006	31%	20%	47%	33%
BHT80 _{600,A}	0,0115	0,016	43	43	0,016	96%	96%	96%	96%
BHT80 _{700,A}	0,0118	0,054	40	35	0,054001	89%	78%	87%	85%
BHT80 _{800,A}	0,0121	0,100	35	27	0,100002	78%	60%	77%	71%
BHT80 _{900,A}	0,0125	0,154	26	18	0,154004	58%	40%	64%	54%
BHT80 _{1000,A}	0,0130	0,218	16	10	0,218006	36%	22%	49%	36%
BT _{600,V25}	0,0115	0,075	43	38	0,075	96%	84%	82%	87%
BT _{700,V25}	0,0118	0,111	37	30	0,111001	82%	67%	74%	74%
BT _{800,V25}	0,0122	0,159	28	22	0,159002	62%	49%	63%	58%
BT _{900,V25}	0,0127	0,219	17	13	0,219004	38%	29%	49%	38%
BT _{1000,V25}	0,0132	0,291	8	7	0,291006	18%	16%	32%	22%
BHT70 _{600,V25}	0,0117	0,101	39	33	0,101	87%	73%	76%	79%
BHT70 _{700,V25}	0,0120	0,136	33	27	0,136001	73%	60%	68%	67%
BHT70 _{800,V25}	0,0124	0,186	24	18	0,186003	53%	40%	56%	50%
BHT70 _{900,V25}	0,0129	0,250	12	9	0,250004	27%	20%	41%	29%
BHT70 _{1000,V25}	0,0135	0,329	4	3	0,329007	9%	7%	23%	13%
BHT80 _{600,V25}	0,0116	0,093	40	36	0,093	89%	80%	78%	82%
BHT80 _{700,V25}	0,0120	0,129	34	28	0,129001	76%	62%	70%	69%
BHT80 _{800,V25}	0,0124	0,178	24	19	0,178003	53%	42%	58%	51%
BHT80 _{900,V25}	0,0128	0,240	15	10	0,240004	33%	22%	44%	33%
BHT80 _{1000,V25}	0,0134	0,317	6	4	0,317006	13%	9%	26%	16%
BT _{600,V50}	0,0116	0,134	40	30	0,134	89%	67%	69%	75%
BT _{700,V50}	0,0120	0,170	31	22	0,170001	69%	49%	60%	59%
BT _{800,V50}	0,0124	0,223	22	14	0,223002	49%	31%	48%	43%
BT _{900,V50}	0,0130	0,292	10	7	0,292004	22%	16%	32%	23%
BT _{1000,V50}	0,0136	0,378	2	2	0,378006	4%	4%	11%	7%
BHT70 _{600,V50}	0,0118	0,159	35	25	0,159001	78%	56%	63%	65%
BHT70 _{700,V50}	0,0122	0,197	25	18	0,197002	56%	40%	54%	50%
BHT70 _{800,V50}	0,0127	0,255	15	9	0,255003	33%	20%	40%	31%
BHT70 _{900,V50}	0,0133	0,331	5	3	0,331005	11%	7%	22%	13%
BHT70 _{1000,V50}	0,0140	0,427	0	0	0,427008	0%	0%	0%	0%
BHT80 _{600,V50}	0,0117	0,152	38	27	0,152	84%	60%	64%	70%
BHT80 _{700,V50}	0,0121	0,189	27	19	0,189001	60%	42%	56%	53%
BHT80 _{800,V50}	0,0126	0,245	17	11	0,245003	38%	24%	43%	35%
BHT80 _{900,V50}	0,0132	0,319	7	5	0,319005	16%	11%	25%	17%
BHT80 _{1000,V50}	0,0138	0,412	1	1	0,412007	2%	2%	4%	3%

Tabela III.23: Parte 1: Análise multi-critérios para todas as amostras em todas as atmosferas para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,A}	0,6477	0,0119	0,111	88	48	0,3658	98%	53%	76%	75,82%
BN _{700,A}	0,7803	0,0122	0,148	80	32	0,4994	89%	36%	68%	64,05%
BN _{800,A}	0,8936	0,0126	0,199	66	18	0,6153	73%	20%	60%	51,18%
BN _{900,A}	1,0096	0,0131	0,262	51	5	0,7356	57%	6%	52%	38,21%
BN _{1000,A}	1,1319	0,0137	0,341	34	0	0,8647	38%	0%	44%	27,28%
BHN70 _{600,A}	0,7492	0,0117	0,058	89	48	0,4642	99%	53%	70%	74,06%
BHN70 _{700,A}	0,8821	0,0120	0,092	86	31	0,5975	96%	34%	61%	63,78%
BHN70 _{800,A}	1,0000	0,0124	0,138	75	19	0,7164	83%	21%	54%	52,70%
BHN70 _{900,A}	1,1148	0,0128	0,196	60	9	0,8331	67%	10%	46%	40,93%
BHN70 _{1000,A}	1,2446	0,0134	0,267	39	0	0,9661	43%	0%	38%	26,95%
BHN80 _{600,A}	0,7740	0,0117	0,054	89	45	0,4889	99%	50%	68%	72,42%
BHN80 _{700,A}	0,8969	0,0120	0,089	86	29	0,6122	96%	32%	60%	62,73%
BHN80 _{800,A}	1,0128	0,0123	0,135	76	17	0,729	84%	19%	53%	52,06%
BHN80 _{900,A}	1,1244	0,0128	0,192	60	9	0,8424	67%	10%	46%	40,72%
BHN80 _{1000,A}	1,2500	0,0133	0,261	41	0	0,971	46%	0%	37%	27,58%
BT _{600,A}	1,4253	0,0114	0,000	89	9	1,14	99%	10%	26%	45,05%
BT _{700,A}	1,4976	0,0117	0,040	86	6	1,2123	96%	7%	22%	41,27%
BT _{800,A}	1,5904	0,0120	0,085	80	4	1,3052	89%	4%	16%	36,30%
BT _{900,A}	1,6959	0,0124	0,138	65	1	1,411	72%	1%	9%	27,35%
BT _{1000,A}	1,8301	0,0128	0,199	47	0	1,5459	52%	0%	0%	17,41%
BHT70 _{600,A}	1,1336	0,0115	0,023	89	18	0,8483	99%	20%	45%	54,67%
BHT70 _{700,A}	1,2444	0,0118	0,061	85	12	0,9592	94%	13%	38%	48,58%
BHT70 _{800,A}	1,3596	0,0122	0,107	78	6	1,0747	87%	7%	30%	41,27%
BHT70 _{900,A}	1,4890	0,0126	0,161	61	3	1,2047	68%	3%	22%	31,06%
BHT70 _{1000,A}	1,6335	0,0130	0,226	37	0	1,3503	41%	0%	13%	17,92%
BHT80 _{600,A}	1,2176	0,0115	0,016	89	15	0,9323	99%	17%	40%	51,75%
BHT80 _{700,A}	1,3211	0,0118	0,054	87	9	1,0358	97%	10%	33%	46,55%
BHT80 _{800,A}	1,4293	0,0121	0,100	78	6	1,1443	87%	7%	26%	39,77%
BHT80 _{900,A}	1,5562	0,0125	0,154	63	3	1,2717	70%	3%	18%	30,36%
BHT80 _{1000,A}	1,6855	0,0130	0,218	41	0	1,402	46%	0%	9%	18,29%
BN _{600,V25}	0,3352	0,0120	0,190	87	48	0,1911	97%	53%	88%	79,21%
BN _{700,V25}	0,5395	0,0124	0,212	81	36	0,2961	90%	40%	81%	70,28%
BN _{800,V25}	0,6549	0,0129	0,270	69	19	0,4125	77%	21%	73%	57,03%
BN _{900,V25}	0,7658	0,0135	0,346	58	6	0,5341	64%	7%	65%	45,52%
BN _{1000,V25}	0,8750	0,0142	0,442	45	0	0,663	50%	0%	57%	35,70%
BHN70 _{600,V25}	0,4382	0,0118	0,129	89	60	0,1789	99%	67%	88%	84,66%
BHN70 _{700,V25}	0,5758	0,0122	0,164	84	42	0,307	93%	47%	80%	73,38%
BHN70 _{800,V25}	0,6935	0,0127	0,217	72	27	0,4277	80%	30%	72%	60,78%
BHN70 _{900,V25}	0,8070	0,0132	0,287	56	11	0,5492	62%	12%	64%	46,31%
BHN70 _{1000,V25}	0,9239	0,0139	0,375	40	0	0,6791	44%	0%	56%	33,51%
BHN80 _{600,V25}	0,4527	0,0118	0,124	89	60	0,1876	99%	67%	88%	84,47%
BHN80 _{700,V25}	0,5878	0,0122	0,159	85	44	0,3165	94%	49%	80%	74,29%
BHN80 _{800,V25}	0,7038	0,0126	0,212	73	27	0,4359	81%	30%	72%	60,97%
BHN80 _{900,V25}	0,8158	0,0132	0,280	56	10	0,5553	62%	11%	64%	45,80%
BHN80 _{1000,V25}	0,9343	0,0138	0,366	41	1	0,6857	46%	1%	56%	34,10%

Tabela III.24: Parte 2: Análise multi-critérios para todas as amostras em todas as atmosferas para a condição 1.

	H2/CO	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BT _{600,V25}	0,7880	0,0115	0,075	89	41	0,5033	99%	46%	67%	70,63%
BT _{700,V25}	0,9130	0,0118	0,111	84	26	0,6289	93%	29%	59%	60,51%
BT _{800,V25}	1,0354	0,0122	0,159	74	14	0,7525	82%	16%	51%	49,70%
BT _{900,V25}	1,1542	0,0127	0,219	54	5	0,8735	60%	6%	43%	36,35%
BT _{1000,V25}	1,2898	0,0132	0,291	36	0	1,0126	40%	0%	34%	24,83%
BHT70 _{600,V25}	0,6242	0,0117	0,101	89	54	0,3419	99%	60%	78%	78,92%
BHT70 _{700,V25}	0,7695	0,0120	0,136	82	35	0,4878	91%	39%	68%	66,15%
BHT70 _{800,V25}	0,8950	0,0124	0,186	69	20	0,6154	77%	22%	60%	53,03%
BHT70 _{900,V25}	1,0191	0,0129	0,250	51	6	0,7433	57%	7%	52%	38,42%
BHT70 _{1000,V25}	1,1538	0,0135	0,329	35	0	0,884	39%	0%	43%	27,24%
BHT80 _{600,V25}	0,6722	0,0116	0,093	89	49	0,3887	99%	54%	75%	76,06%
BHT80 _{700,V25}	0,8106	0,0120	0,129	82	32	0,5279	91%	36%	66%	64,17%
BHT80 _{800,V25}	0,9359	0,0124	0,178	68	17	0,655	76%	19%	58%	50,69%
BHT80 _{900,V25}	1,0631	0,0128	0,240	51	6	0,7853	57%	7%	49%	37,51%
BHT80 _{1000,V25}	1,1944	0,0134	0,317	35	0	0,9218	39%	0%	40%	26,42%
BN _{600,V50}	0,2853	0,0121	0,220	89	37	0,22	99%	41%	86%	75,26%
BN _{700,V50}	0,4085	0,0126	0,266	84	27	0,2745	93%	30%	82%	68,53%
BN _{800,V50}	0,5170	0,0132	0,334	77	14	0,3677	86%	16%	76%	59,11%
BN _{900,V50}	0,6157	0,0139	0,425	69	5	0,4832	77%	6%	69%	50,32%
BN _{1000,V50}	0,7179	0,0147	0,542	57	0	0,6216	63%	0%	60%	41,04%
BHN70 _{600,V50}	0,2940	0,0119	0,181	89	51	0,181	99%	57%	88%	81,28%
BHN70 _{700,V50}	0,4222	0,0124	0,223	84	35	0,239	93%	39%	85%	72,25%
BHN70 _{800,V50}	0,5292	0,0130	0,288	77	20	0,3374	86%	22%	78%	61,98%
BHN70 _{900,V50}	0,6356	0,0136	0,373	68	8	0,4561	76%	9%	70%	51,65%
BHN70 _{1000,V50}	0,7413	0,0144	0,483	57	0	0,592	63%	0%	62%	41,68%
BHN80 _{600,V50}	0,3039	0,0119	0,176	89	52	0,1761	99%	58%	89%	81,76%
BHN80 _{700,V50}	0,4331	0,0124	0,217	84	38	0,2378	93%	42%	85%	73,39%
BHN80 _{800,V50}	0,5365	0,0129	0,280	77	22	0,3356	86%	24%	78%	62,76%
BHN80 _{900,V50}	0,6414	0,0135	0,363	68	9	0,453	76%	10%	71%	52,08%
BHN80 _{1000,V50}	0,7525	0,0143	0,470	56	0	0,5904	62%	0%	62%	41,34%
BT _{600,V50}	0,5031	0,0116	0,134	89	59	0,2335	99%	66%	85%	83,11%
BT _{700,V50}	0,6418	0,0120	0,170	83	39	0,3689	92%	43%	76%	70,56%
BT _{800,V50}	0,7621	0,0124	0,223	71	22	0,4925	79%	24%	68%	57,16%
BT _{900,V50}	0,8802	0,0130	0,292	55	8	0,6175	61%	9%	60%	43,35%
BT _{1000,V50}	1,0000	0,0136	0,378	40	0	0,7483	44%	0%	52%	32,01%
BHT70 _{600,V50}	0,4041	0,0118	0,159	89	56	0,1786	99%	62%	88%	83,19%
BHT70 _{700,V50}	0,5442	0,0122	0,197	81	38	0,2924	90%	42%	81%	71,10%
BHT70 _{800,V50}	0,6654	0,0127	0,255	70	22	0,415	78%	24%	73%	58,46%
BHT70 _{900,V50}	0,7803	0,0133	0,331	57	7	0,5401	63%	8%	65%	45,39%
BHT70 _{1000,V50}	0,9058	0,0140	0,427	40	0	0,6817	44%	0%	56%	33,45%
BHT80 _{600,V50}	0,4311	0,0117	0,152	89	55	0,1877	99%	61%	88%	82,62%
BHT80 _{700,V50}	0,5759	0,0121	0,189	82	40	0,3151	91%	44%	80%	71,72%
BHT80 _{800,V50}	0,6929	0,0126	0,245	69	23	0,4352	77%	26%	72%	58,02%
BHT80 _{900,V50}	0,8100	0,0132	0,319	55	8	0,5614	61%	9%	64%	44,56%
BHT80 _{1000,V50}	0,9368	0,0138	0,412	39	0	0,7023	43%	0%	55%	32,63%

Tabela III.25: Parte 1: Análise multi-critérios para todas as amostras em todas as atmosferas para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BN _{600,A}	0,0119	0,111	78	67	0,111001	87%	74%	80%	80%
BN _{700,A}	0,0122	0,148	67	55	0,148002	74%	61%	73%	69%
BN _{800,A}	0,0126	0,199	48	40	0,199004	53%	44%	63%	54%
BN _{900,A}	0,0131	0,262	29	23	0,262006	32%	26%	52%	36%
BN _{1000,A}	0,0137	0,341	13	9	0,341008	14%	10%	37%	21%
BHN70 _{600,A}	0,0117	0,058	86	80	0,058001	96%	89%	89%	91%
BHN70 _{700,A}	0,0120	0,092	80	67	0,092002	89%	74%	83%	82%
BHN70 _{800,A}	0,0124	0,138	65	52	0,138004	72%	58%	75%	68%
BHN70 _{900,A}	0,0128	0,196	48	34	0,196005	53%	38%	64%	52%
BHN70 _{1000,A}	0,0134	0,267	26	16	0,267007	29%	18%	51%	32%
BHN80 _{600,A}	0,0117	0,054	86	82	0,054001	96%	91%	90%	92%
BHN80 _{700,A}	0,0120	0,089	80	68	0,089002	89%	76%	84%	83%
BHN80 _{800,A}	0,0123	0,135	67	53	0,135003	74%	59%	75%	69%
BHN80 _{900,A}	0,0128	0,192	48	35	0,192005	53%	39%	65%	52%
BHN80 _{1000,A}	0,0133	0,261	29	18	0,261007	32%	20%	52%	35%
BT _{600,A}	0,0114	0,000	89	89	0	99%	99%	100%	99%
BT _{700,A}	0,0117	0,040	86	83	0,040001	96%	92%	93%	93%
BT _{800,A}	0,0120	0,085	80	69	0,085002	89%	77%	84%	83%
BT _{900,A}	0,0124	0,138	65	52	0,138004	72%	58%	75%	68%
BT _{1000,A}	0,0128	0,199	47	33	0,199005	52%	37%	63%	51%
BHT70 _{600,A}	0,0115	0,023	88	87	0,023	98%	97%	96%	97%
BHT70 _{700,A}	0,0118	0,061	83	77	0,061001	92%	86%	89%	89%
BHT70 _{800,A}	0,0122	0,107	74	59	0,107003	82%	66%	80%	76%
BHT70 _{900,A}	0,0126	0,161	57	43	0,161004	63%	48%	70%	60%
BHT70 _{1000,A}	0,0130	0,226	35	27	0,226006	39%	30%	58%	42%
BHT80 _{600,A}	0,0115	0,016	88	88	0,016	98%	98%	97%	98%
BHT80 _{700,A}	0,0118	0,054	85	78	0,054001	94%	87%	90%	90%
BHT80 _{800,A}	0,0121	0,100	76	62	0,100002	84%	69%	82%	78%
BHT80 _{900,A}	0,0125	0,154	61	44	0,154004	68%	49%	72%	63%
BHT80 _{1000,A}	0,0130	0,218	39	28	0,218006	43%	31%	60%	45%
BN _{600,V25}	0,0120	0,190	69	49	0,190001	77%	54%	65%	65%
BN _{700,V25}	0,0124	0,212	53	42	0,212002	59%	47%	61%	55%
BN _{800,V25}	0,0129	0,270	31	25	0,270004	34%	28%	50%	37%
BN _{900,V25}	0,0135	0,346	14	12	0,346006	16%	13%	36%	22%
BN _{1000,V25}	0,0142	0,442	3	3	0,442009	3%	3%	18%	8%
BHN70 _{600,V25}	0,0118	0,129	80	68	0,129001	89%	76%	76%	80%
BHN70 _{700,V25}	0,0122	0,164	65	50	0,164002	72%	56%	70%	66%
BHN70 _{800,V25}	0,0127	0,217	44	35	0,217004	49%	39%	60%	49%
BHN70 _{900,V25}	0,0132	0,287	25	20	0,287006	28%	22%	47%	32%
BHN70 _{1000,V25}	0,0139	0,375	8	6	0,375008	9%	7%	31%	15%
BHN80 _{600,V25}	0,0118	0,124	80	69	0,124001	89%	77%	77%	81%
BHN80 _{700,V25}	0,0122	0,159	66	53	0,159002	73%	59%	71%	68%
BHN80 _{800,V25}	0,0126	0,212	48	38	0,212003	53%	42%	61%	52%
BHN80 _{900,V25}	0,0132	0,280	26	21	0,280006	29%	23%	48%	34%
BHN80 _{1000,V25}	0,0138	0,366	10	8	0,366008	11%	9%	32%	17%

Tabela III.26: Parte 2: Análise multi-critérios para todas as amostras em todas as atmosferas para a condição 2.

	CGE [%]	PCI [kJ/Nm3]	sd	wd	dn	sd	wd	dn	total
BT _{600,V25}	0,0115	0,075	88	81	0,075	98%	90%	86%	91%
BT _{700,V25}	0,0118	0,111	80	71	0,111001	89%	79%	80%	82%
BT _{800,V25}	0,0122	0,159	66	53	0,159002	73%	59%	71%	68%
BT _{900,V25}	0,0127	0,219	43	33	0,219004	48%	37%	60%	48%
BT _{1000,V25}	0,0132	0,291	24	19	0,291006	27%	21%	46%	31%
BHT70 _{600,V25}	0,0117	0,101	84	74	0,101	93%	82%	81%	86%
BHT70 _{700,V25}	0,0120	0,136	73	62	0,136001	81%	69%	75%	75%
BHT70 _{800,V25}	0,0124	0,186	56	47	0,186003	62%	52%	66%	60%
BHT70 _{900,V25}	0,0129	0,250	33	29	0,250004	37%	32%	54%	41%
BHT70 _{1000,V25}	0,0135	0,329	16	14	0,329007	18%	16%	39%	24%
BHT80 _{600,V25}	0,0116	0,093	85	77	0,093	94%	86%	83%	88%
BHT80 _{700,V25}	0,0120	0,129	75	64	0,129001	83%	71%	76%	77%
BHT80 _{800,V25}	0,0124	0,178	57	48	0,178003	63%	53%	67%	61%
BHT80 _{900,V25}	0,0128	0,240	38	30	0,240004	42%	33%	56%	44%
BHT80 _{1000,V25}	0,0134	0,317	19	15	0,317006	21%	17%	42%	26%
BN _{600,V50}	0,0121	0,220	62	37	0,220001	69%	41%	59%	56%
BN _{700,V50}	0,0126	0,266	43	27	0,266003	48%	30%	51%	43%
BN _{800,V50}	0,0132	0,334	23	14	0,334005	26%	16%	38%	26%
BN _{900,V50}	0,0139	0,425	6	5	0,425007	7%	6%	22%	11%
BN _{1000,V50}	0,0147	0,542	0	0	0,54201	0%	0%	0%	0%
BHN70 _{600,V50}	0,0119	0,181	72	52	0,181001	80%	58%	67%	68%
BHN70 _{700,V50}	0,0124	0,223	52	36	0,223002	58%	40%	59%	52%
BHN70 _{800,V50}	0,0130	0,288	28	21	0,288004	31%	23%	47%	34%
BHN70 _{900,V50}	0,0136	0,373	11	9	0,373006	12%	10%	31%	18%
BHN70 _{1000,V50}	0,0144	0,483	1	1	0,483009	1%	1%	11%	4%
BHN80 _{600,V50}	0,0119	0,176	72	54	0,176001	80%	60%	68%	69%
BHN80 _{700,V50}	0,0124	0,217	53	40	0,217002	59%	44%	60%	54%
BHN80 _{800,V50}	0,0129	0,280	31	24	0,280004	34%	27%	48%	36%
BHN80 _{900,V50}	0,0135	0,363	14	11	0,363006	16%	12%	33%	20%
BHN80 _{1000,V50}	0,0143	0,470	2	2	0,470009	2%	2%	13%	6%
BT _{600,V50}	0,0116	0,134	85	68	0,134	94%	76%	75%	82%
BT _{700,V50}	0,0120	0,170	71	53	0,170001	79%	59%	69%	69%
BT _{800,V50}	0,0124	0,223	52	36	0,223002	58%	40%	59%	52%
BT _{900,V50}	0,0130	0,292	28	19	0,292004	31%	21%	46%	33%
BT _{1000,V50}	0,0136	0,378	11	7	0,378006	12%	8%	30%	17%
BHT70 _{600,V50}	0,0118	0,159	78	60	0,159001	87%	67%	71%	75%
BHT70 _{700,V50}	0,0122	0,197	60	45	0,197002	67%	50%	64%	60%
BHT70 _{800,V50}	0,0127	0,255	39	29	0,255003	43%	32%	53%	43%
BHT70 _{900,V50}	0,0133	0,331	19	14	0,331005	21%	16%	39%	25%
BHT70 _{1000,V50}	0,0140	0,427	4	4	0,427008	4%	4%	21%	10%
BHT80 _{600,V50}	0,0117	0,152	83	62	0,152	92%	69%	72%	78%
BHT80 _{700,V50}	0,0121	0,189	63	49	0,189001	70%	54%	65%	63%
BHT80 _{800,V50}	0,0126	0,245	43	32	0,245003	48%	36%	55%	46%
BHT80 _{900,V50}	0,0132	0,319	23	17	0,319005	26%	19%	41%	29%
BHT80 _{1000,V50}	0,0138	0,412	8	6	0,412007	9%	7%	24%	13%