



PROJETO DE GRADUAÇÃO

Avaliação energética de resíduos
lignocelulósicos provenientes de poda para
geração de energia no DF

Por,
Raphael Silva Bastos

Brasília, 11 de Maio de 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Avaliação energética de resíduos lignocelulósicos provenientes de poda para geração de energia no DF

POR,
Raphael Silva Bastos

Relatório submetido como requisito para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico

Banca Examinadora

Prof. Edgar Amaral Silveira
UnB/ ENM (Orientador)

Prof. Carlos Alberto Gurgel Veras
UnB/ ENM

Prof. Armando de Azevedo Caldeira Pires
UnB/ ENM

Brasília, 11 de Maio de 2021

Dedico este trabalho
de graduação à minha família, meus
amigos e a sociedade.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, os meus pais Shirlei e Charles, os meus irmãos Lucas e Matheus. Agradeço pelo apoio e cuidado que tiveram comigo durante toda a minha graduação e por toda a minha vida.

Agradeço aos meus amigos e amigas que nunca desacreditaram de mim e que na minha graduação foram os responsáveis por eu seguir firme e de cabeça levantada mesmo com todas as adversidades que surgiram ao longo da jornada. Agradeço também, à Isadora por participar e estar presente nas fases mais difíceis para me apoiar, despertando o que há de melhor em mim diariamente.

Agradeço ao meu professor orientador Edgar por sua dedicação e apoio. Por entrar em contato comigo e ter sido totalmente solícito a todos os questionamentos levantados.

Obrigado ao pessoal do Laboratório de Produtos Florestais que me auxiliaram e disponibilizaram tempo e espaço para que esse trabalho fosse realizado.

Agradeço ao Maurício, estudante de mestrado que está a realizar o projeto em paralelo ao meu e que sem ele o trabalho seria bem mais complexo.

E por fim, eu gostaria de agradecer a equipe Draco Volans Aerodesign e a TECMEC - Empresa Júnior de Engenharia Mecânica - que despertaram em mim o ímpeto de fazer parte de algo, buscando sempre os melhores resultados por meio do trabalho duro e da dedicação, entregando algo útil para a sociedade.

Resumo

Estimulado pelo desenvolvimento industrial e tecnológico, o consumo mundial de energia vem sendo a preocupação do século. A dependência dos recursos fósseis, nocivos ao meio ambiente, obriga aos diversos países a tomarem medidas estratégicas visando o consumo e produção de energia economicamente sustentável. A possibilidade da utilização da biomassa em termoelétricas e siderúrgicas aparece como alternativa a dependência dos combustíveis fósseis. No Distrito Federal existe um problema com a gestão de fim de vida dos resíduos urbanos lignocelulósicos. Material esse que, se pré-tratado, apresenta um potencial energético a ser explorado. Neste contexto, esse projeto de graduação visa a valorização dos resíduos urbanos lignocelulósicos (poda) do Distrito Federal, através da aplicação de processos de conversão termoquímica para o combustível formado pelo blend dos resíduos de diferentes espécies de árvores do DF. Os efeitos desses processos na biomassa serão avaliados através da caracterização do material in natura e torrefado (análise elementar, imediata e calorífica). O biocombustível obtido in natura e torrefado foram submetidos a um modelo numérico de gaseificação permitindo identificar a influência do tratamento de torrefação na gaseificação da biomassa. Os resultados obtidos experimentalmente neste trabalho mostram a importância do tratamento do biocombustível na linha de conversão termoquímica e na valorização de resíduos do Distrito Federal.

Palavras chave: biomassa, resíduo urbano lignocelulósico, torrefação, gaseificação, gás de síntese.

Abstract

Stimulated by industrial and technological development, world energy consumption has been the concern of the century. The dependence on fossil resources, harmful to the environment, obliges the different countries to take general measures to consume and produce economically sustainable energy. The possibility of using biomass in thermoelectric and steel plants appears as an alternative to dependence on fossil fuels. In the Federal District, there is a problem with the end-of-life management of lignocellulosic urban waste. The material that, if pre-treated, presents an energetic potential to be explored. In this context, this graduation project aims at the valorization of lignocellulosic urban waste (pruning) from the Federal District, through the application of thermo-chemical conversion processes formed by the mixture of residues from different species of trees in the Federal District. The effects are processes in the biomass obtained through the characterization of the raw and torrefied material (elementary, proximate and calorific analysis). The biofuel recognizing in natura and roasting a numerical model of gasification has been identified allowing to identify the influence of the torrefaction treatment in the biomass gasification. The results obtained experimentally in this work show the importance of biofuel treatment in the thermochemical conversion line and in the valorization of residues in the Federal District.

Keywords: biomass, lignocellulosic urban waste, torrefaction, gasification, syngas.

Sumário

SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivos específicos	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Processos termoquímicos	5
2.2 Torrefação	6
2.3 Gaseificação	8
2.4 Biomassa	10
2.4.1 Tipos	10
2.4.1.1 Vegetais não lenhosos	10
2.4.1.2 Vegetais lenhosos	10
2.4.1.3 Resíduos orgânicos	11
2.4.1.4 Biofluidos	11
2.5 Biomassa Lignocelulósica	11
2.5.1 Poda	11
2.5.2 Composição	12

2.5.3	Caracterização	14
2.5.3.1	Teor de umidade	14
2.5.3.2	Análise imediata	14
2.5.3.3	Análise elementar	15
2.5.3.4	Poder Calorífico	15
3	MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1	Identificação das espécies	16
3.2	Amostragem	17
3.3	Pré processamento	18
3.3.1	Armazenamento	18
3.3.2	Moagem	18
3.3.3	Seleção granulométrica	19
3.3.4	Mistura	20
3.4	Caracterização da mistura	20
3.4.1	Teor de umidade	20
3.4.2	Análise química imediata	21
3.4.2.1	Teor de voláteis	21
3.4.2.2	Teor de cinzas	22
3.4.2.3	Porcentagem de carbono fixo	22
3.4.3	Análise elementar	22
3.4.4	Poder calorífico superior	23
3.4.5	Rendimento gravimétrico	24
3.4.6	Rendimento energético	24
3.5	Torrefação	24
3.6	Gaseificação	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	Caracterização da Biomassa	28
4.2	Torrefação	29
4.3	Gaseificação	30
4.3.1	Biomassa in natura	31
4.3.2	Biomassa Torrefada	36

4.4	Benefícios da rota de torrefação para o gás de síntese	40
5	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE FIGURAS

1.1	Participação de energia renovável na matriz mundial e brasileira (EPE, 2018) . . .	2
1.2	Gráfico da matriz energética brasileira no ano de 2017 (EPE, 2018)	2
1.3	Ciclo energético da biomassa. Elaboração própria a partir de Chew e Doshi (2011).	3
2.1	Vias de conversão da biomassa (RODRIGUES, 2009).	5
2.2	Variação das propriedades da biomassa submetida à torrefação - (GALVÃO, 2018) adaptado de Chen, Peng e Bi (2015).	7
2.3	Rotas de gaseificação baseada no tipo de agente gaseificante (CORTEZ, 2011). . .	9
2.4	Fontes de biomassa. Elaboração própria a partir de Vieira et al. (2014).	10
2.5	Principais componentes da biomassa lignocelulósica (YARRIS, 2012).	12
3.1	Amostras identificadas e armazenadas no LPF.	17
3.2	Amostras: 1) Mangueira. 2) Ficus. 3) Cambuí. 4) Abacateiro.	17
3.3	1) Trabalho de marcenaria no LPF. 2) Amostras 2 após o corte.	18
3.4	Moinho de martelo LIPPEL - TM 05.	19
3.5	Peneiras utilizadas no processo de seleção granulométrica.	20
3.6	Analisador elementar CHNS da marca Perkin Elmer modelo EA 2400 serie II, localizado na Central Analítica do Instituto de Químicas da UnB (CAIQ).	23
3.7	Calorímetro – PARR 6400.	23
3.8	Esquema do reator em escala laboratorial. Lista de equipamentos: 1) Cilindro de N_2 , 2) Rotâmetro de controle de gás, 3) Analisador termogravimétrico TGA- 2000A, 4) Computador. Adaptado de Silveira et al. (2018), Santanna et al. (2020)	25
3.9	Janela do modelo computacional para gaseificação de biomassa (Gasifier).	26
4.1	Principais componentes do gás de síntese do blend de biomassa de Brasília em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2	32

4.2	Principais componentes do gás de síntese do blend de biomassa de Piracicaba em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2	33
4.3	Principais componentes do gás de síntese do blend de biomassa de Campinas em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2	33
4.4	Principais componentes do gás de síntese do blend de biomassa de São Paulo em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2	34
4.5	Poder Calorífico Inferior em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação.	35
4.6	Eficiência do Gás Frio em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação.	35
4.7	Principais componentes do gás de síntese do blend torrefado a 225°C em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2	37
4.8	Principais componentes do gás de síntese do blend torrefado a 250°C em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2	38
4.9	Principais componentes do gás de síntese do blend torrefado a 275°C em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2	38
4.10	Poder Calorífico Inferior em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação para o produto torrefado.	39
4.11	Eficiência do Gás Frio em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação para o produto torrefado.	40
4.12	Componentes do gás de síntese em função da temperatura de torrefação para as duas atmosferas de gaseificação distintas e para duas temperatura de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2	41
4.13	A) Poder Calorífico Inferior e B) Eficiência do Gás Frio em função da temperatura de torrefação para duas atmosferas de gaseificação e para as temperaturas de gaseificação de 600 e 900°C para o produto torrefado.	41

LISTA DE TABELAS

2.1	Classificação e efeitos da temperatura dos componentes da madeira e os produtos formados (GALVÃO, 2018).	8
2.2	Resumo das propriedades da celulose, hemicelulose e lignina de biomassa (GALVÃO, 2018).	13
3.1	Espécies da arborização de Brasília selecionadas.	16
3.2	Quantidade mássica de amostra após o processo de corte.	18
3.3	Proporção das espécies na mistura.	20
3.4	Parâmetros da torrefação.	25
3.5	Parâmetros de entrada no gasifier.	27
4.1	Caracterização da Biomassa de Brasília.	28
4.2	Caracterização de Biomassa em literatura.	29
4.3	Caracterização de Biomassa Torrificada.	30
4.4	Resultados numéricos da gaseificação de termoequilíbrio de biomassa in natura com atmosfera de Ar.	31
4.5	Resultados numéricos da gaseificação de termoequilíbrio de biomassa in natura com atmosfera de Ar/H ₂ O.	31
4.6	Resultados numéricos da gaseificação de termoequilíbrio da biomassa in natura e após os processos de torrefação com atmosfera Ar.	36
4.7	Resultados numéricos da gaseificação de termoequilíbrio da biomassa in natura e após os processos de torrefação com atmosfera Ar/H ₂ O.	36

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

C	Carbono
C_F	Teor de carbono fixo
C_Z	Teor de cinzas
CH_4	Gás metano
CO	Gás Carbônico
CO_2	Dióxido de Carbono
CV	Força cavalo
g	Gramas
GW	Gigawatts
H	Hidrogênio
h	Horas
H_2	Gás hidrogênio
Id	Número de identificação da amostra
Kg	Quilogramas
KJ	Quilojoules
KW	Quilowatts
Min	Minutos
MJ	Megajoule
mm	Milímetros
MPa	Megapascal
N	Nitrogênio

Nm^3 Newton por metro cúbico

N° Número

O Oxigênio

O_2 Gás Oxigênio

R_E Rendimento energético

R_G Rendimento gravimétrico

S Enxofre

T_u Teor de umidade

V Volume

$^\circ C$ Graus Celsius

Símbolos Gregos

ρ_{ap} Massa específica da biomassa

ρ_{H_2O} Massa específica da água

Grupos Adimensionais

d Densidade

Siglas

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

ASTM American Society for Testing and Materials

bs Base seca

bu Base úmida

CAIQ Central Analítica do Instituto de Químicas da UnB

CHP Combined Heat Power

DF Distrito Federal

DTU Universidade Técnica da Dinamarca

EES Engineering Equation Solver

EGF Eficiência de Gás Frio

EPE Empresa de Pesquisa Energética

FAL	Fazenda Água Limpa
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IEA	International Energy Agency
ISO	International Organization for Standardization
LPF	Laboratório de Produtos Florestais
NBR	Normas Brasileiras
NOVACAP	Companhia Urbanizadora da Nova Capital
OCDE	Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
SVMA	Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente de São Paulo
TCD	Detector de condutividade térmica
TDT	Temperatura de decomposição térmica
UnB	Universidade de Brasília

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A busca incessante pelo desenvolvimento traz consigo uma expansão acentuada do consumo de energia atrelada a possibilidade do esgotamento dos recursos naturais. Outro problema é o impacto ao meio ambiente, como modificação de fauna e flora, emissões de gases poluentes e potenciadores do efeito estufa. Por último, elevados investimentos para pesquisas de novas fontes de energia, mitigação de impactos ambientais e melhorias na eficiência energética (ANEEL, 2008).

A diminuição do uso e da dependência de combustíveis fósseis está se tornando o foco de todas as nações, gerando uma preocupação mundial para pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias e fontes de energia renováveis. O maior crescimento da demanda energética mundial ocorreu no ano de 2018, aumentando em 2,3%. Conseqüentemente, emissões globais de CO_2 subiram, já que a demanda de petróleo continuou em crescente. A oferta de energia elétrica renovável está a crescer mais rapidamente do que a demanda, liderada pelo aumento em geração solar fotovoltaica enquanto a eficiência energética e as outras tecnologias-chave precisam de um impulso (SIMONS, 2019).

No início do século, mais do que três quartos da oferta energética mundial, estimada em 11.435 milhões de toneladas equivalentes de petróleo, eram baseados nos combustíveis fósseis (IEA, 2007). As mudanças climáticas decorrentes das emissões dos gases de efeito estufa apontam uma crise ambiental em escala planetária sem precedentes (BERMANN, 2008). Atualmente, a nova ordem mundial é a busca pela autossuficiência em geração de uma forma de energia compatível com as necessidades da sociedade, aliada a uma diversificação da matriz energética (PACHECO, 2006) e é nesse contexto que as energias renováveis aparecem com o intuito de diminuir a dependência de energia derivada de combustíveis fósseis e reduzir os impactos ambientais.

As energias renováveis são provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, fonte primária de quase toda a energia disponível na Terra e são praticamente inesgotáveis. Estas energias renováveis podem e devem ser utilizadas de forma sustentável, de tal maneira que resulte

no mínimo impacto ao meio ambiente (PACHECO, 2006).

Neste cenário, a energia solar, a eólica, a biomassa e pequenas centrais hidroelétricas começam a disputar atenção com as tecnologias já utilizadas em larga escala, no sentido de aumentar a escala de produção, auferindo preços mais competitivos para a energia consumida (GALDINO et al., 2000).

Segundo a conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, ocorrida em Joanesburgo no ano de 2002, as fontes renováveis de energia aumentam a diversidade e a complementaridade da oferta de energia (PIRES; PAFFARINI; CELLA, 2017). No Brasil, o uso de biomassa como alternativa a essa crise existente tem gerado maiores estudos sobre o aumento do potencial energético dessa fonte, já que a partir dela pode se obter energia e biocombustíveis, resultando na diminuição da dependência de combustíveis fósseis na matriz energética brasileira.

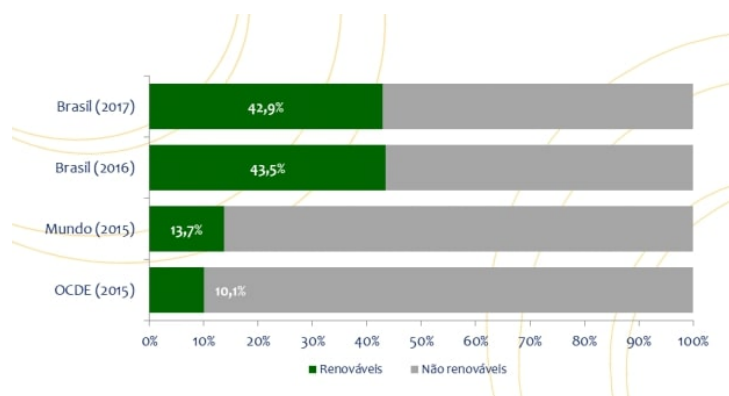


Figura 1.1: Participação de energia renovável na matriz mundial e brasileira (EPE, 2018)

Observando a Fig. 1.1, a matriz energética brasileira possui uma boa participação de energias renováveis, sendo mais elevada do que na matriz energética mundial e dos países da OCDE. Entre as energias renováveis, o uso de biomassa da cana com 17% lidera a porcentagem da matriz energética brasileira, mas ainda está atrás da porcentagem do uso de petróleo e derivados que possui 36,4%, como mostra a Fig. 1.2. São 517 termelétricas abastecidas a biomassa e cerca de 14GW de potência instalada (TOLMASQUIM, 2016).

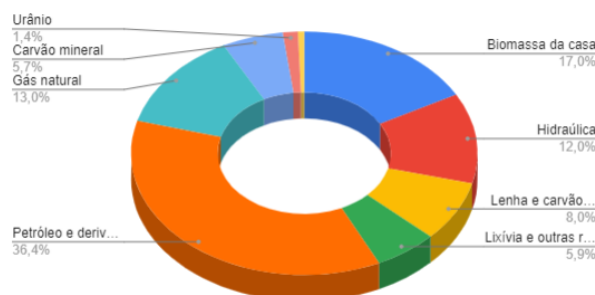


Figura 1.2: Gráfico da matriz energética brasileira no ano de 2017 (EPE, 2018)

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Dela é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina. Ao contrário do que ocorre com outras fontes, como carvão, energia hidráulica ou petróleo, a biomassa não tem sido contabilizada com precisão. Um dos motivos dessa imprecisão é que qualquer galho pode ser considerado biomassa. Outro fator é que a biomassa é utilizada em unidades de pequeno porte isoladas e distantes de grandes centros, não ocorrendo a contabilização correta dessa fonte (SILVA, 2014).

Com o intuito de melhorar as condições do uso da biomassa tradicional, podem ser consideradas algumas rotas tecnológicas para a produção de energia. Os processos de conversão energética da biomassa podem ser classificados em: processos físicos, termoquímicos e biológicos (NOGUEIRA; LORA, 2003; CORTEZ, 2011).

As biomassas são provenientes de resíduos urbanos e industriais, da madeira, de culturas agrícolas, de plantas aquáticas, algas, animais, processamento de alimentos e resíduos, além da obtenção de biofluidos através de óleos (CORTEZ, 2011).

Quando utilizada para uso energético, a biomassa realiza o processo de liberação da energia solar armazenada pelo vegetal através do processo de combustão onde há o consumo de oxigênio e a restituição de dióxido de carbono (CO_2) para o ar atmosférico (NOGUEIRA; LORA, 2003). Considerando que a quantidade de CO_2 liberada nesse processo é equivalente à quantidade absorvida durante o processo de fotossíntese, pode-se entender que a biomassa para transformação energética é neutra na emissão de gases do "efeito estufa" (CHEW; DOSHI, 2011).

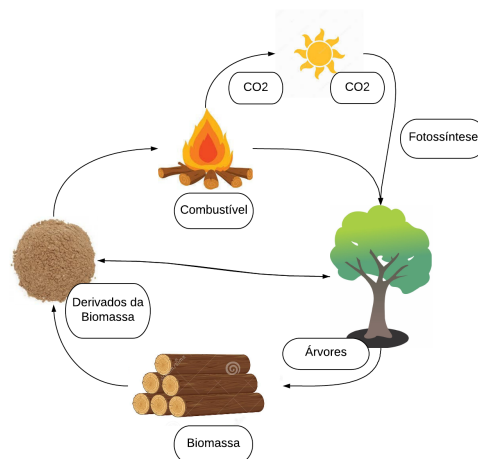


Figura 1.3: Ciclo energético da biomassa. Elaboração própria a partir de Chew e Doshi (2011).

Porém, por se tratarem de matéria orgânica, não possuem um bom balanço energético para geração de alguma forma de energia quando comparados aos combustíveis líquidos (GALVÃO, 2018). Isso se dá pelas características desses resíduos: baixa densidade, baixo poder calorífico e alto teor de umidade, o que dificulta e encarece todo o processo (FELFLI et al., 2011). Para aumentar o potencial energético da biomassa e conseqüentemente torná-la mais atrativa existem alguns tratamentos que servem para melhorar as propriedades indesejadas para

a queima e transformação energética a partir dessa fonte. Dentre as tecnologias usadas para o tratamento da biomassa existem os tratamentos termoquímicos (STOLARSKI et al., 2013).

1.2 Motivação

Segundo (JACINTO, 2001), a árvore é parte fundamental do ecossistema florestal urbano. As principais funções da arborização urbana são: química - absorção do gás carbônico e liberação de oxigênio -, função física - sombra, absorção de ruídos e proteção térmica -, paisagística e ecológica (SILVA, 2014). Para a manutenção desse ecossistema, a poda é uma operação bem comum e o corte de galhos e árvores geram resíduos urbanos (VALE; SARMENTO; ALMEIDA, 2005).

Na cidade de Brasília, as podas são realizadas diariamente e a quantidade de resíduos gerados chega a abastecer seis caminhões por dia. Após uma seleção, uma parte do material é descartado e aquela parte com maiores dimensões é armazenada, sendo periodicamente moído e utilizado para coroamento de covas e outra parcela sendo leiloada. A falta de conhecimento de opções de uso pode ser um dos motivos para a pouca utilização desse material (VALE; SARMENTO; ALMEIDA, 2005).

Diante do exposto, a motivação do trabalho é demonstrar o potencial do uso de biomassa a partir dos resíduos urbanos para transformação energética com o uso dos processos termoquímicos de torrefação e gasificação.

1.3 Objetivos

Avaliar a utilização de resíduos de poda de árvores da cidade de Brasília para aproveitamento energético por meio do mapeamento das espécies do DF, da caracterização física, química e energética da biomassa gerada e avaliar a aplicabilidade dos métodos de potencialização da biomassa após realizar uma análise energética.

1.3.1 Objetivos específicos

- Identificar e selecionar as espécies em conjunto com a NOVACAP ;
- Condicionamento do blend das biomassas para o experimento;
- Realizar a torrefação do biocombustível;
- Realizar as análises químicas do blend in natura e do blend torrefado;
- Realizar a simulação numérica da gaseificação dos biocombustíveis in natura e torrefados;
- Avaliar o impacto da torrefação do biocombustível no gás de síntese (composição, poder calorífico inferior e eficiência do gás frio).

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processos termoquímicos

Existem várias tecnologias capazes de converter a biomassa em energia através de processos termoquímicos. Estes processos são baseados na decomposição térmica da carga combustível primária e na combustão dos produtos resultantes da decomposição (CARDOSO; NASCIMENTO, 2012).

A conversão termoquímica para o aproveitamento energético da biomassa ocorre quando a energia química da biomassa é liberada em forma de calor através de reações de combustão. Dos produtos obtidos desses processos temos sólidos, líquidos e gasosos com alta capacidade energética, dependendo das tecnologias utilizadas e da quantidade de oxigênio fornecido ao processo (GALVÃO, 2018; CARDOSO; NASCIMENTO, 2012; SILVA, 2016).

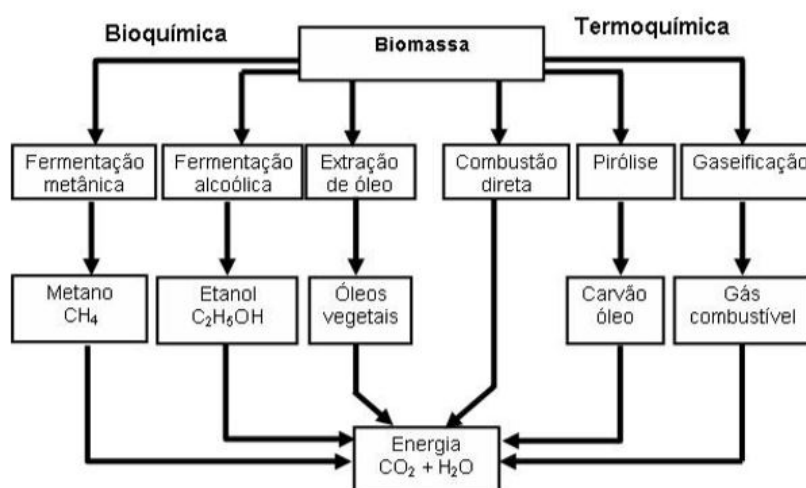


Figura 2.1: Vias de conversão da biomassa (RODRIGUES, 2009).

A Fig. 2.1 apresenta as vias de conversão de biomassa por processos químicos, nesta seção serão apresentados os processos termoquímicos e o processo de torrefação.

A combustão é o processo termoquímico onde ocorre a queima direta do combustível transformando a energia química em calor (NOGUEIRA; LORA, 2003). A queima da biomassa nesse processo ocorre a partir de reações exotérmicas que seguem basicamente 6 etapas: secagem, pirólise com emissão de voláteis, ignição dos voláteis, queima dos voláteis em chama, extinção da chama e dos voláteis, finalizando com a combustão do resíduo do carbono (GALVÃO, 2018).

A pirólise é um processo termoquímico realizado com pouca ou nenhuma presença de oxigênio a temperatura relativamente baixa quando comparada aos outros processos, entre 200°C e 650°C. Ela resulta num combustível energeticamente mais denso, sendo um composto sólido rico em carbono e uma fração volátil (CARDOSO; NASCIMENTO, 2012; RODRIGUES, 2009; GALVÃO, 2018). Segundo MARTINS (1980) citado por Rodrigues (2009), na pirólise da madeira a hemicelulose é o componente mais instável, se degrada entre 225 e 335°C, a celulose em seguida se degrada na faixa de 325 a 375°C e a lignina é o componente mais estável, se degradando entre 250 e 500°C, com maior intensidade entre 310 e 420°C.

A torrefação é considerado como um pré-tratamento de pirólise, já que ele se caracteriza pela ausência parcial ou completa de gases oxidantes a temperaturas limites próximas dos 300°C visando um combustível sólido com a degradação da hemicelulose para saída de voláteis de baixo poder calorífico (RODRIGUES, 2009; GALVÃO, 2018).

A gaseificação é um processo termoquímico que converte a biomassa num gás energético, com temperaturas e injeção de ar controlados. O controle da temperatura se dá porque elas precisam ser maiores que as temperaturas do processo de pirólise e menores que as do processo de combustão para ocorrer uma oxidação parcial (CARDOSO; NASCIMENTO, 2012; GALVÃO, 2018). O controle da injeção do ar é baseado no uso final do gás a ser obtido, quando há a injeção do oxigênio puro o gás gerado tem poder calorífico baixo e quando é inserido uma mistura de gases o poder calorífico é mais alto. O teor de nitrogênio livre no gás gerado é o principal fator para essa diferença de entre os poderes caloríficos (CARDOSO; NASCIMENTO, 2012).

2.2 Torrefação

O pré-tratamento de torrefação da biomassa visa produzir combustíveis com melhores características energéticas. A madeira torrefada é um produto intermediário entre a madeira seca e o carvão vegetal (RODRIGUES, 2009).

A torrefação ocorre em condições semelhantes à pirólise convencional, porém com temperaturas entre 200 e 300°C, com o intuito de concentrar a energia da biomassa retendo os voláteis de maior poder calorífico num produto, com um processo que demande pouco tempo, baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas (CHEN; PENG; BI, 2015; GALVÃO, 2018).

As reações globais desse processo possuem caráter endotérmico, ocorrendo na madeira sob aquecimento e com limite de temperatura próxima a 300°C. A partir desta temperatura, as reações começam a ser exotérmicas e se inicia a produção de carvão. Durante o processo, ocorre a perda de voláteis mais sensíveis ao aquecimento e essa perda gera uma redução de até 30% de massa, mas outras características da madeira também sofrem interferências graduais conforme

o aumento da temperatura (RODRIGUES, 2009).

Segundo Rodrigues (2009), as principais alterações são o aumento da estabilidade dimensional, da resistência a ataques xilófagos, a diminuição da higroscopicidade e a diminuição das propriedades mecânicas. A diminuição da higroscopicidade é importante para o uso energético, pois o produto passa a absorver pouca umidade do ambiente e evita o gasto energético com a evaporação de água.

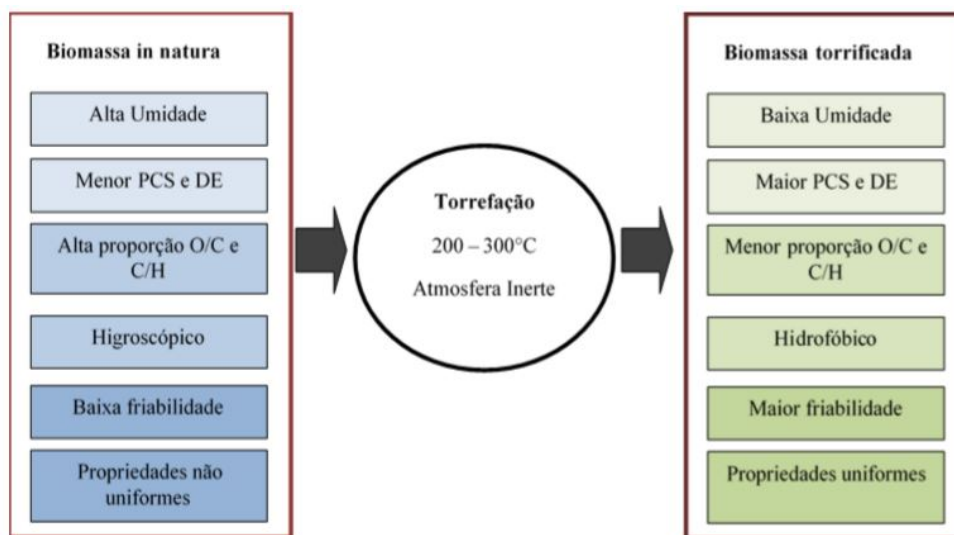


Figura 2.2: Variação das propriedades da biomassa submetida à torrefação - (GALVÃO, 2018) adaptado de Chen, Peng e Bi (2015).

Para Galvão (2018), os benefícios alcançados pela torrefação incluem maior poder calorífico e densidade energética; menor razão atômica de O/C e H/C; baixo teor de umidade; maior hidrofobicidade ou resistência a água; melhora na moagem e reatividade; e aumento na homogeneidade das propriedades da biomassa.

A Fig. 2.2 apresenta de forma resumida as mudanças de características da biomassa após o processo de torrefação. Dependendo das características que se deseja para o combustível sólido gerado após o processo de torrefação é necessário entender quais os principais fatores que afetam o produto final, sendo eles a temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento, umidade, biomassa e tamanho de partícula (CHEN; PENG; BI, 2015).

O processo de torrefação de biomassa pode ser classificado segundo a faixa de temperatura. A classificação é dada em leve, moderado e severo, e as faixas de temperatura são 200 a 235°C, 235 a 275°C e 275 a 300°C, respectivamente (CHEN; PENG; BI, 2015). A Tab. 2.1 apresenta o resumo do efeito da temperatura sobre a degradação dos componentes da biomassa e os produtos formados após a torrefação:

Tabela 2.1: Classificação e efeitos da temperatura dos componentes da madeira e os produtos formados (GALVÃO, 2018).

Classificação	Leve	Moderada	Severa
Temperatura [°C]	200-235	235-275	275-300
Degradação			
Hemicelulose	Leve	Moderada-Severa	Severa
Celulose	Branda	Leve-Moderada	Leve-Severa
Lignina	Branda	Branda	Branda
Cor do líquido	Marrom	Marrom escuro	Preto
Produto			
Gás	H_2 , CO_2 , CO , CH_4 , tolueno, benzeno e C_xH_y		
Líquido	H_2O , Ácido acético, álcoois, aldeídos e cetonas		
Sólido	Biomassa torrificada e cinzas		

Fonte: Galvão (2018).

A temperatura também modifica as características físicas e químicas da biomassa. Quanto maior a temperatura aplicada na torrefação, mais frágil e menos higroscópica a biomassa pode se tornar (FELFLI; LUENGO; SOLER, 2000).

O tempo de residência também é um fator importante para determinar o desempenho da torrefação. A degradação é lenta em períodos longos de tempo de residência. Em condições normais de funcionamento, a temperatura possui maior influência de reação do que o tempo de residência (CHEN; PENG; BI, 2015).

2.3 Gaseificação

Numa busca pelo uso mais eficiente do carvão - reduzindo as taxas de calor da estação líquida e reduzindo as emissões aéreas -, a gaseificação surgiu como uma alternativa à combustão. A gaseificação é o processo no qual a matéria orgânica é transformada num gás combustível através da queima com oxidação parcial a elevadas temperaturas (ANDRADE, 2007).

O gás produzido é conhecido como gás pobre, devido ao seu baixo poder calorífico, tendo na sua composição elementos como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrogênio (H_2) e metano (CH_4).

Segundo Lora, Andrade e Aradas (2004), os gaseificadores podem ser classificados segundo os seguintes parâmetros:

1. Poder calorífico do gás produzido:
 - Gás de baixo poder calorífico - até 5 MJ/Nm³.
 - Gás de médio poder calorífico - de 5 a 10 MJ/Nm³.
 - Gás de alto poder calorífico - de 10 a 40 MJ/Nm³.
2. Tipo de agente de gaseificação:
 - Ar.

- Vapor de água.
 - Oxigênio.
3. Pressão de trabalho:
- Baixa pressão (atmosférica).
 - Pressurizados (até 3 MPa).
4. Direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação:
- Leito em movimento a contrafluxo com o gás (contracorrente).
 - Leito em movimento a fluxo direto com o gás (concorrente).
 - Leito em movimento perpendicular ao fluxo de gás (fluxo cruzado).
 - Leito fluidizado.

A Fig. 2.3 demonstra as rotas de gaseificação baseada no tipo de agente gaseificante.

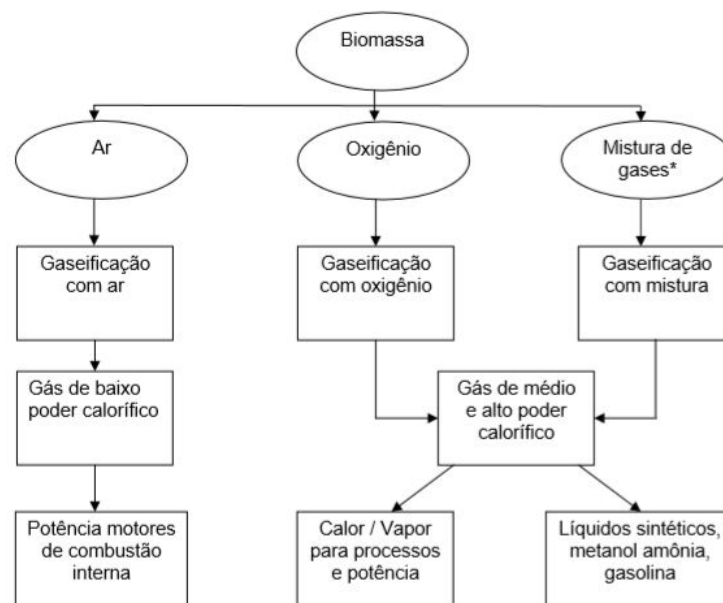


Figura 2.3: Rotas de gaseificação baseada no tipo de agente gaseificante (CORTEZ, 2011).

A gaseificação de biomassa tem as suas vantagens quando comparada a combustão direta: o gás emite menos poluentes, é facilmente distribuído, a sua queima controlada, possui alta eficiência térmica, a energia produzida com a queima dos gases produzidos é limpa. Porém, também possui as suas desvantagens: a biomassa não pode conter outros elementos que possam comprometer o processo de gaseificação e há o potencial de fusão de cinzas quando se usa a biomassa com alto teor de cinzas (LORA; ANDRADE; ARADAS, 2004; ANDRADE, 2007).

Geralmente, para atender aos padrões específicos da gaseificação e a demanda de qualidade do gás produtor é fundamental o processamento da biomassa e sua caracterização (STREZOV; EVANS, 2014).

2.4 Biomassa

Para a ANEEL (2008), conforme o atlas da Energia Elétrica do Brasil, a definição de biomassa é todo o recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia.

2.4.1 Tipos

A Fig. 2.4 representa as fontes de biomassa existentes e traz ênfase para o tipo de biomassa a ser estudado neste projeto:

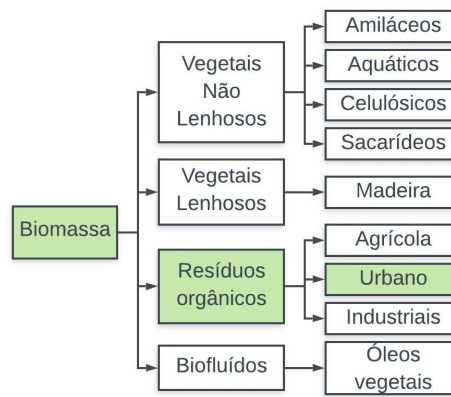


Figura 2.4: Fontes de biomassa. Elaboração própria a partir de Vieira et al. (2014).

2.4.1.1 Vegetais não lenhosos

A biomassa a partir de vegetais não lenhosos são os vegetais que não são capazes de produzir madeira como tecido de suporte dos seus caules. Como representado na Fig. 2.4 a categoria dos amiláceos se dá pela exploração do amido presente nos legumes e frutos (MOLETTA, 2011), analiticamente, as categorias de biomassa celulósicos com a celulose e sacarídeos com a sacarose são determinadas. A categoria de aquáticos tem a sua representatividade dada pelas macrófitas aquáticas.

2.4.1.2 Vegetais lenhosos

A biomassa a partir de vegetais lenhosos, ao contrário dos não lenhosos, se dá aqueles vegetais capazes de produzir madeira como tecido de suporte dos seus caules, oriunda principalmente da biomassa florestal. O carvão vegetal e a lenha são os representantes dessa categoria (SOARES et al., 2006).

2.4.1.3 Resíduos orgânicos

Conforme a NBR 10004, da Associação Brasileira de Normas Técnicas, resíduos sólidos são definidos como quaisquer resíduos que se apresentem nos estados sólido e semi-sólidos resultantes de atividades industrial, domiciliar, hospitalar, comercial, agrícola, e de serviços de varrição (ABNT, 2004).

Resíduos agrícolas são provenientes de atividades agrícolas e exemplos dessa categoria de biomassa são: o bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, palha e sabugo de milho (VIEIRA et al., 2014).

Os exemplos de resíduos industriais são: casca, cavaco e pó de serra derivados de toras de madeira, bagaço de laranjas e de outras frutas. A principal origem é da industrial moveleira (VIEIRA et al., 2014).

Os resíduos urbanos, segundo Bidone e Povinelli (1999) citado por (SOUZA, 2014), são os de origem residencial, comercial, serviços de varrição de feiras livre e poda de árvores. Podem ser sólidos ou líquidos, sendo geralmente encontradas nos aterros sanitários, onde inclusive os gases derivados da combustão podem ser utilizados.

2.4.1.4 Biofluidos

Para biofluidos, os óleos vegetais tem recebido incentivo principalmente a partir da crise do petróleo na década de 70 (NETO et al., 2000). Os processos para obtenção de óleos vegetais se dá através de processos químicos, como a gaseificação, ou através de tratamentos biotecnológicos, como a fermentação. Podemos citar o álcool, o óleo vegetal obtido de mamona ou de colza, e o biodiesel, obtido pela esterificação do óleo vegetal (GENOVESE; UDAETA; GALVAO, 2006).

2.5 Biomassa Lignocelulósica

A biomassa lignocelulósica é compreendida por materiais agroindustriais, pelos resíduos urbanos e pelas madeiras de angiospermas e gimnospermas. Formados por estruturas rígidas e fibrosas e caracterizam-se por ter baixo conteúdo de proteínas e digestibilidade (ORELLANA; MACIEL, 2019).

2.5.1 Poda

As podas de árvores são uns dos resíduos sólidos urbanos mais comuns e são oriundas das atividades de manutenção das áreas verdes no ambiente urbano e os resíduos de poda de árvores são compostos por galhos, folhas, raízes e troncos e podem normalmente serem obtidos ao longo de todo o ano (SOUZA, 2014).

Segundo a SVMA (2005), a técnica de podar pode ser classificada em quatro tipos:

1. Poda de formação: conferir à árvore uma forma adequada durante o seu desenvolvimento;

2. Poda de limpeza: eliminar ramos mortos, danificados, doentes ou praguejados;
3. Poda de emergência: remover partes da árvore que colocam em risco a segurança das pessoas;
4. Poda de adequação: extrair partes da árvore que interferem ou causam danos incontornáveis às edificações, ou aos equipamentos urbanos.

Os resíduos de poda urbana são classificados classe II, biodegradáveis e não perigosos, segundo a NBR 10004/2004. Mesmo sendo classificados como não perigosos, esses resíduos geram um grande volume e por ser difícil a compactação, implica em problemas na hora do descarte, ocupando grandes espaços em aterros e podem interagir química e biologicamente com outros resíduos, causando impactos sobre a qualidade de solo, água e ar (CORTEZ, 2011).

A caracterização desses resíduos é dificultada por sua heterogeneidade entre os indivíduos, o que se dá pela grande gama de componentes que constituem a sua estrutura e pelo fato da sazonalidade, que está diretamente ligada as características das espécies (PEREIRA, 2013).

Os resíduos provenientes de podas de árvores podem ser utilizados com ou sem aproveitamento energético (CORTEZ, 2011). Existem diversas rotas para melhorar o aproveitamento energético desses resíduos, as aplicações estão ligadas aos processos de densificação, termoquímicos e biológicos.

2.5.2 Composição

As árvores podem ser divididas em madeiras duras (angiospermas), que são decíduas e perdem as suas folhas anualmente, e madeiras macias (gimnospermas), que são coníferas, e não as perdem suas folhas. As plantas herbáceas têm caules e folhas que morrem anualmente no final da estação de crescimento (BATES, 2012).

As biomassas herbáceas contêm maior teor de celulose, enquanto as biomassas lenhosas apresentam maior teor lignina (SILVA, 2017). Além desses três componentes, estão presentes também alguns lipídeos e hidrocarbonetos que são solúveis em éter e vários tipos de fenólicos, hidratos de carbono e proteínas que podem ser solúveis em benzeno, etanol ou água.

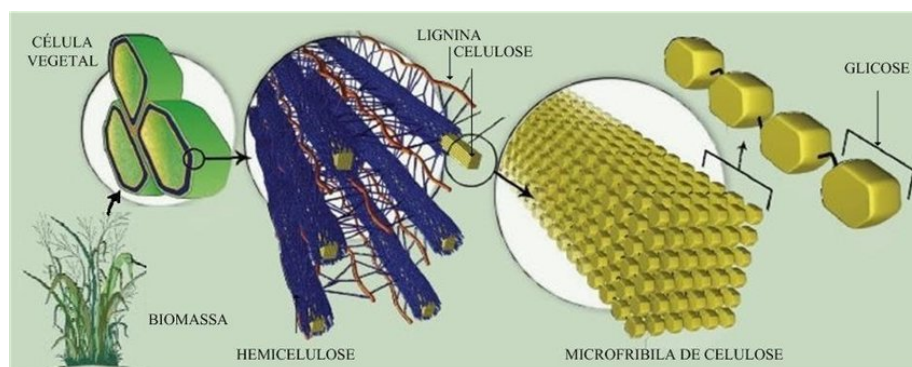


Figura 2.5: Principais componentes da biomassa lignocelulósica (YARRIS, 2012).

Os principais constituintes moleculares da biomassa lignocelulósica são a hemicelulose, celulose e lignina, como representa a Fig. 2.5.

Celulose

Segundo McKendry (2002) a celulose é um polímero de glicose, constituído por cadeias lineares de unidade (1,4)-D-glucopiranoose. Geralmente é a maior fração, chega a representar cerca de 50% da biomassa em peso. A estrutura fibrosa e forte ligação de hidrogênio que a celulose possui, torna ela importante para a resistência da madeira, sendo insolúvel na maioria dos solventes (PENG et al., 2012). Devido à alta resistência da estrutura cristalina da celulose a degradação só se inicia a partir de 180°C (TUMULURU et al., 2011; SILVA, 2017).

Hemicelulose

Também segundo McKendry (2002), a hemicelulose é uma mistura de polissacarídeos, composta quase inteiramente de açúcares como glicose, manose, xilose e arabinose, e ácidos metilglucurônico e galacturônico, com um peso molecular médio de <30.000. A hemicelulose sofre degradação em temperaturas mais baixas que a celulose, possui maior parte da perda percebida acima de 180°C (TUMULURU et al., 2011).

Diferente da celulose, a hemicelulose é um polissacarídeo ramificado heterogêneo que possui ligações firmes com a superfície de cada microfibrila de celuloses, mas não covalentemente (MCKENDRY, 2002).

Lignina

Já a lignina pode ser considerada como um grupo de compostos amorfos, de alto peso molecular e quimicamente relacionados. É altamente ramificado e blocos de construção chamado de fenilpropanos (MCKENDRY, 2002). As ligações são covalentes entre as unidades individuais e insolúvel na maioria dos solventes (PENG et al., 2012).

Tabela 2.2: Resumo das propriedades da celulose, hemicelulose e lignina de biomassa (GALVÃO, 2018).

	Celulose	Hemicelulose	Lignina
Estrutura	Linear	Ramificada	Tridimensional
Fórmula	$(C_6H_{10}O_5) m^a$	$(C_5H_8O_4) m$	$(C_6H_{10}O_5(OCH_3)_{0.9-.7}) m$
Razão atômica O/C	0,83	0,80	0,47 - 0,36
Razão atômica H/C	1,67	1,60	1,19 - 1,53
TDT^b(°C)	315-400	220-315	160-900
Componentes	Glicose	Xilose, glicose, manose, galactose, arabinose e ácido glucurônico	Fenilpropano
Comportamento térmico	Endotérmico (exotérmico se a formação de carvão for significativa)	Exotérmica	Exotérmica

m^a : Grau de polimerização;

TDT^b = Temperatura de composição térmica.

Fonte: Galvão (2018).

Extrativos

Os extrativos são compostos não estruturais, incluindo proteínas, óleos, amidos e açúcares. Eles fornecem odor, cor e durabilidade as plantas e podem ser extraídos com água quente ou outros solventes (TUMULURU et al., 2011). As propriedades da celulose, hemicelulose e lignina estão resumidas na Tab. 2.2.

2.5.3 Caracterização

A caracterização da biomassa ocorre principalmente por meio: do teor de umidade, da análise imediata, a análise elementar e pelo poder calorífico (RODRIGUES, 2009).

2.5.3.1 Teor de umidade

Defini-se como teor de umidade a massa de água contida na biomassa e pode ser expressa em base úmida (bu) e em base seca (bs), sendo medida pela diferença entre os pesos da amostra, antes e logo após ser submetida à secagem (NOGUEIRA; LORA, 2003).

Em valores inferiores a 8% de teor de umidade, o processo de decomposição se inicia na estrutura molecular da biomassa. A perda de umidade gera tensões na estrutura molecular e se manifesta macroscopicamente pela mudança de coloração para preto (RENDEIRO, 2008).

Para fins energéticos, é importante que o teor de umidade da biomassa seja baixo. Para uma madeira em base úmida ser queimada no forno, o seu conteúdo de umidade deve ser no máximo em torno de 65% a 70%. Por causa dessa úmida, sempre haverá perda de calor no gás de combustão em forma de vapor de água, já que a evaporação dessa umidade absorve a energia em combustão. Ou seja, quanto maior o conteúdo de umidade, menor será o seu poder de combustão (QUIRINO et al., 2005).

2.5.3.2 Análise imediata

A análise imediata quantifica os teores de materiais voláteis, de cinzas e de carbono fixo presentes na biomassa. Os materiais voláteis são os gases que evaporam durante a queima da biomassa. Quanto maior o teor de voláteis, maior será a reatividade e a sua ignição, determinando a facilidade com que a biomassa queima (VIEIRA, 2012).

Os resíduos sólidos resultantes da combustão completa de um combustível são caracterizados como teor de cinzas. São resíduos inorgânicos que podem conter carbonatos, fosfatos e sulfatos de sílica, cálcio, magnésio, sódio e potássio, dependendo das fontes e tipos da biomassa utilizada, além dos componentes não inerentes à biomassa que são provenientes de sujeiras e outras impurezas (BATES; GHONIEM, 2012).

O teor de carbono fixo está associado ao poder calorífico, representando a massa resultante da liberação da umidade, dos materiais voláteis e das cinzas (MCKENDRY, 2002).

2.5.3.3 Análise elementar

A análise elementar se caracteriza pela determinação da composição química da biomassa, e através dessa caracterização, o poder calorífico superior (PCS) do combustível. Para a biomassa, a composição elementar é avaliada em porcentagem de massa dos elementos químicos que estão presentes na sua estrutura, como carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), umidade e material residual (GOMES, 2010).

Outro resultado gerado após a análise elementar são as razões entre as populações de átomos de hidrogênio/carbono e oxigênio/carbono, com essas relações é possível realizar o cálculo do Poder Calorífico Superior e Inferior (PCS e PCI), pois há a correlação entre o PCS e PCI e as razões H/C e O/C (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

2.5.3.4 Poder Calorífico

O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de calorias que um material libera na sua combustão completa, ou como energia térmica liberada após a combustão completa e é mensurada em energia por conteúdo por unidade de massa (NOGUEIRA; LORA, 2003; QUIRINO, 2002). O poder calorífico pode ser dividido em Poder Calorífico Superior e Inferior (PCS e PCI):

- Poder Calorífico Superior (PCS): representa a quantidade máxima de energia que pode ser obtida na transferência de calor do combustível. O PCS pode ser calculado de duas maneiras, por uma Bomba Calorimétrica e por meio da Análise Elementar (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).
- Poder Calorífico Inferior (PCI): representa a quantidade de calor liberado na combustão com a água no estado de vapor. O PCI é calculado a partir do PCS (RENDEIRO, 2008).

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Identificação das espécies

A cidade de Brasília se destaca pelo seu planejamento na arborização urbana. Contudo, houve uma grande modificação da vegetação nativa e o ecossistema cerrado sofreu grande impacto derivado do desmatamento agressivo. Com a necessidade de arborizar a cidade, a solução técnica encontrada foi a de trazer o plantio de espécies nativas do cerrado e espécies exóticas, nativas de outros ecossistemas, com melhor adaptação às condições de solo e climas locais (LIMA, 2009).

Conforme o levantamento das espécies, do número de árvores e do número de pedidos de podas, realizado pela NOVACAP, tem-se ao total 28 espécies principais. Para a composição do biocombustível derivado dos resíduos de poda do DF, foram selecionadas as 6 espécies com a maior representatividade em função da maior ocorrência em número de árvores e em número de pedidos solicitados para se realizar a poda, conforme a Tab. 3.1:

Tabela 3.1: Espécies da arborização de Brasília selecionadas.

Nome	Nome científico	Identificação	Nº de indivíduos	Nº de Pedidos
Mangueira	Mangifera indica	1	4005	3754
Ficus	Ficus benjamina	2	2311	2916
Cambuí	Pelthophorum dubium	3	1891	2253
Abacateiro	Persea americana	4	1898	1996
Angico	Anadenanthera colubrina	5	658	855
Pombeiro	Tapirira guianensis	6	744	761

As amostras foram coletadas no dia 8 de outubro de 2019, em uma visita ao viveiro II da NOVACAP, com o auxílio do funcionário especializado pela área. Sendo que, as amostras 3, 5 e 6 são consideradas espécies nativas e as amostras 1,2 e 4 são consideradas espécies exóticas.

3.2 Amostragem

Os parâmetros definidos para cada amostra foram: o diâmetro da base mínimo de 5 cm e comprimento mínimo de 50 cm, sendo selecionadas 5 galhos para cada espécie. Essas amostras foram identificadas com os números contidos na Tab. 3.1 e levadas ao Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro, onde foram armazenadas.



Figura 3.1: Amostras identificadas e armazenadas no LPF.



Figura 3.2: Amostras: 1) Mangueira. 2) Ficus. 3) Cambuí. 4) Abacateiro.

3.3 Pré processamento

3.3.1 Armazenamento

As amostras foram armazenadas em sacos de polietileno a temperatura ambiente ($25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) até sua utilização. Os sacos foram identificados para cada espécie dentro do LPF.

3.3.2 Moagem

As amostras apresentadas nas Figuras 3.1 e 3.2 foram cortadas na marcenaria do LPF para adequação das dimensões da amostra para a etapa de moagem no moinho de martelo. Para cada espécie, as amostras foram cortadas e separadas. A Fig 3.3 representa o trabalho de corte realizado em uma plaina, o aspecto e dimensão das amostras após esse processo.



Figura 3.3: 1) Trabalho de marcenaria no LPF. 2) Amostras 2 após o corte.

As dimensões não precisam ser exatas, já que as amostras serão reduzidas a cavacos no moinho de martelo. Após os cortes, obteve-se amostra de material para cada espécie. A Tab. 3.2 apresenta a quantidade obtida para cada espécie:

Tabela 3.2: Quantidade mássica de amostra após o processo de corte.

Nome	Nome científico	Id	Amostra [kg]
Mangueira	Mangifera indica	1	8,0
Ficus	Ficus benamina	2	8,0
Cambuí	Pelthophorum dubium	3	9,0
Abacateiro	Persea americana	4	9,0
Angico	Anadenanthera colubrina	5	12,0
Pombeiro	Tapirira guianensis	6	8,5

Onde: Id é o número de identificação da amostra.

O grau de moagem é caracterizado de acordo com o tamanho das partículas. Sendo assim, as amostras que comporão a mistura foram reduzidas a cavacos antes da torrefação, para isso se utilizou um moinho de martelo, já que ele permite a produção de moagens mais finas quando comparado ao moinho de rolos (SILVEIRA; SCHLICKMANN, 2005).

Realizou-se a moagem da biomassa em um moinho de martelo laboratorial da marca LIPPEL - TM 05, com controle de granulometria via peneira de malha circular com 4 mm de abertura. Sendo triturado uma espécie por dia. Foram descartados os primeiros cavacos de cada processo, a fim de diminuir a contaminação da amostra com partículas de outras amostras.



Figura 3.4: Moinho de martelo LIPPEL - TM 05.

3.3.3 Seleção granulométrica

Segundo Rodrigo et al. (2016), a peneiração é o método mais empregado para seleção granulométrica de amostras de partículas sólidas, devido à simplicidade e aos resultados satisfatórios, quando a biomassa usada é de origem vegetal.

O processo de seleção granulométrica da amostra foi feito com peneiras de 6 MESH (3,36 mm) representadas na Fig. 3.5. A pesagem do material foi realizada em uma balança digital com resolução de 0,01 g.



Figura 3.5: Peneiras utilizadas no processo de seleção granulométrica.

3.3.4 Mistura

Após a seleção granulométrica, a mistura foi definida por percentuais distintos de cada biomassa, ponderando a representatividade (definida pelo número de indivíduos e chamados para poda) avaliada como apresentado na Tab. 3.3:

Tabela 3.3: Proporção das espécies na mistura.

Nome	Nome científico	Id	Amostra [%]
Mangueira	Mangifera indica	1	35%
Ficus	Ficus benjamina	2	20%
Cambuí	Pelthophorum dubium	3	16%
Abacateiro	Persea americana	4	16%
Angico	Anadenanthera colubrina	5	6%
Pombeiro	Tapirira guianensis	6	7%
Total	-	-	100%

3.4 Caracterização da mistura

Os ensaios para caracterização das propriedades físicas, químicas e energéticas da mistura foram realizados no setor de energia do LPF e na Central Analítica do Instituto de Químicas da UnB (CAIQ). Os ensaios foram: teor de umidade segundo a norma ISO 18134-1, a análise imediata (teor de material volátil, de cinzas e de carbono fixo) segundo a norma ISO 18122, análise elementar (porcentagem de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) segundo as normas ASTM E777 e E778 e de poder calorífico superior segundo a norma ABNT NBR 8633/84 com adaptações para a biomassa in natura e as biomassas pós-tratamentos.

3.4.1 Teor de umidade

A determinação do teor de umidade foi medido em duas fases do processo: com as amostras da mistura in natura e após a torrefação. O ensaio foi realizado em duplicata.

Para as amostras in natura, o teor de umidade será obtido conforme a norma ISO 18134-1, separando cerca de 300 g do blend. Na etapa seguinte, se utilizará recipientes para alocar as amostras, sendo necessária a medição da massa de cada recipiente. Após essa etapa, as amostras foram introduzidas em uma estufa a $103 \pm 10^\circ\text{C}$ até que a massa fique constante com variação de massa máxima de 2% de uma medição para outra quando realizada a cada uma hora. Para a determinação do teor de umidade seguiu-se a Equação 3.1:

$$T_u = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Onde:

- T_u : Teor de umidade;
- M_1 : Massa da amostra + massa do recipiente antes da estufa;
- M_2 : Massa da amostra + massa do recipiente após a estufa;
- M_3 : Massa do recipiente;

3.4.2 Análise química imediata

A Análise química imediata compreende a determinação do teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo de uma amostra.

3.4.2.1 Teor de voláteis

Para a determinação do teor de voláteis, se utilizou a mistura que foi moída no moinho de martelo e peneirada até que atingisse partículas abaixo de 18 mesh (1,00 mm). Com a mistura pronta, ela foi alocada na estufa ($105^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) por 24h ou até atingir 0% de umidade. A amostra foi retirada da estufa e inserida em dessecador por aproximadamente 15 minutos para resfriamento.

Trabalhando em duplicata, mediu-se 1 grama de massa da amostra para cada cadinho de porcelana com tampa, que foram inseridos em uma mufla a 900°C . A amostra foi alocada por 7 minutos no interior da mufla com a tampa fechada. Após esse procedimento, as amostras foram retiradas e novamente inseridas em um dessecador para resfriamento.

Mediu-se novamente a massa para realizar o cálculo do teor de material volátil com precisão de 2% pela Equação 3.2:

$$M_V = \frac{M_2 - M_3}{M_1} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Onde:

- M_V : Teor de material volátil;

- M_1 : Massa da amostra;
- M_2 : Massa do cadinho + amostra;
- M_3 : Massa do cadinho após a mufla á 900°C;

3.4.2.2 Teor de cinzas

A determinação do teor de cinzas foi realizada segundo a norma ISO 18122, com auxílio de um macro analisador termogravimétrico (macro TGA). O princípio da norma consiste em aquecer uma amostra de biomassa de no mínimo 1 g, com granulometria inferior a 1 mm, até 250°C, mantê-la durante 1 hora nesta temperatura e posteriormente aquecê-la até 550°C até massa constante. Realizamos o ensaio em duplicata. O cálculo do teor de cinzas seguiu a Equação 3.3:

$$C_Z = \frac{M_3 - M_2}{M_1} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Onde:

- C_Z : Teor de cinzas;
- M_1 : Massa da amostra antes do ensaio [g];
- M_2 : Massa do cadinho [g];
- M_3 : Massa do cadinho + resíduo [g];

3.4.2.3 Porcentagem de carbono fixo

Após as análises e com as porcentagens de teor de materiais voláteis (M_V) e teor de cinzas (C_Z) foi possível calcular a porcentagem de carbono fixo (C_F) das amostras com a Equação 3.4:

$$C_F = 100 - (C_Z - M_V) \quad (3.4)$$

3.4.3 Análise elementar

A análise elementar foi realizada pelo Instituto de Química da UnB a partir de um analisador elementar CHNS, marca Perkin Elmer e modelo EA 240e serie II. Equipamento possui dois modos de análise, CHN e CHNS, e conta com um forno de alta temperatura para completa combustão das amostras, retenção seletiva dos gases (separação por cromatografia frontal) e detecção dos gases por TCD (detector de condutividade térmica). Possui ainda uma ultra microbalança AD6 (Perkin Elmer) e carrossel para análise automatizada de até 60 amostras (Fig. 3.6).



Figura 3.6: Analisador elementar CHNS da marca Perkin Elmer modelo EA 2400 serie II, localizado na Central Analítica do Instituto de Químicas da UnB (CAIQ).

A análise elementar foi executada em duas fases do processo: com as amostras da mistura in natura e após a torrefação, seguindo as normas ASTM E777/2008 e E778/2008. Para essa etapa, separou-se 5 gramas do material moído de cada amostra com granulometria abaixo de 1,00 mm a 0% de umidade. O valor do Oxigênio (O) foi obtido por diferença em relação aos outros componentes.

3.4.4 Poder calorífico superior

Obteve-se o PCS de cada amostra através de uma bomba calorimétrica da PARR modelo 6400 – Automatic Isoperibol Calorimeter, instalada na área de energia da biomassa no LPF representado na Fig. 3.7. A bomba calorimétrica mede a energia liberada na combustão completa quando submetida a uma pressão constante. Para se garantir a combustão completa há a injeção de oxigênio no processo. O aparelho conta com display digital e geração de gráfico em tempo real durante a queima da amostra, calculando o PCS [MJ/Kg].



Figura 3.7: Calorímetro – PARR 6400.

A determinação do PCS foi realizada em duas fases do processo: com as amostras da mistura in natura e após a torrefação, seguindo norma ABNT NBR 8633/84.

3.4.5 Rendimento gravimétrico

O rendimento gravimétrico é representado pela razão entre a massa seca de combustível torreficado pela massa do combustível seco (0% de umidade), ou seja, a quantidade de massa que permanece na estrutura ao final do processo de torrefação. Essa razão é representada pela Equação 3.5:

$$R_G = \frac{M_{torreficada}}{M_{seca}} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Onde:

- R_G : Rendimento Gravimétrico em % ;
- $M_{torreficada}$: Massa da madeira torreficada [kg];
- M_{seca} : Massa da madeira seca [kg];

3.4.6 Rendimento energético

Segundo Bergman et al. (2004), o rendimento energético é calculado pela Equação 3.6:

$$R_E = \frac{PCS_{torreficada}}{PCS_{innatura}} \cdot R_G \quad (3.6)$$

Onde:

- R_E : Rendimento Energético em %;
- R_G : Rendimento Gravimétrico em %;
- $PCS_{torreficada}$: PCS da madeira torreficada [MJ/kg];
- $PCS_{innatura}$: PCS da madeira in natura [MJ/kg];

3.5 Torrefação

O processo de torrefação foi realizado no setor de energia da biomassa do LPF e num aparelho macro-termogravimétrico composto por um cilindro de nitrogênio, um rotâmetro para controle de fluxo, uma unidade de reação (TGA 2000A) e um computador para controle de medição de dados representado pela Fig. 3.8

Amostras de $2,60 \pm 0,5$ g foram alocadas em cadinhos de cerâmica tampados durante a torrefação. Os comportamentos térmicos das amostras foram avaliados em três temperaturas, 225°C, 250°C e 275°C com tempo de residência de 60 minutos com taxa de aquecimento de 7°C min^{-1} . Foram realizadas três repetições para o processo de torrefação. A Tab. 3.4 apresenta os parâmetros do processo de torrefação (SANTANNA et al., 2020).

Tabela 3.4: Parâmetros da torrefação.

Condição	Temperatura	Taxa de aquecimento	Tempo de residência
Blend	225°C	7°C min^{-1}	60 min
Blend	250°C	7°C min^{-1}	60 min
Blend	275°C	7°C min^{-1}	60 min

Fonte: Santanna et al. (2020).

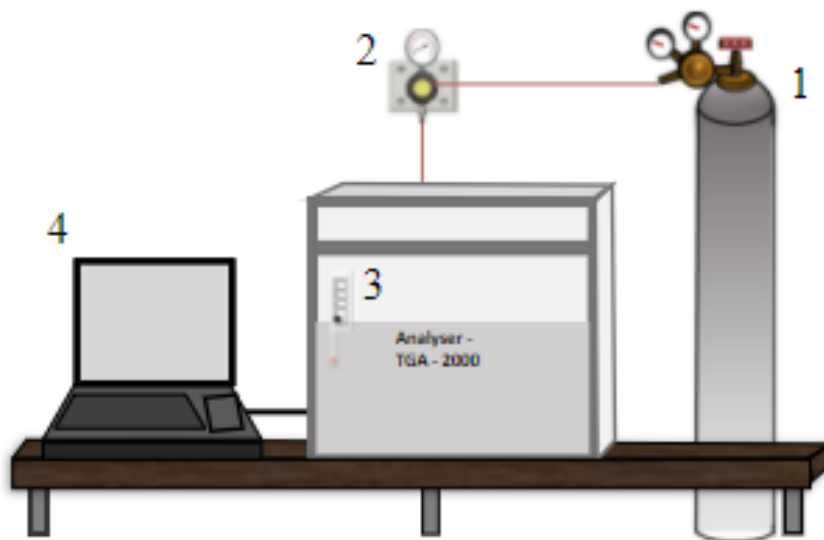


Figura 3.8: Esquema do reator em escala laboratorial. Lista de equipamentos: 1) Cilindro de N_2 , 2) Rotâmetro de controle de gás, 3) Analisador termogravimétrico TGA-2000A, 4) Computador. Adaptado de Silveira et al. (2018), Santanna et al. (2020)

3.6 Gaseificação

Para identificar a influência do pré-tratamento de torrefação na gaseificação do biocombustível proveniente dos resíduos das podas de árvores de Brasília, utilizou-se um modelo computacional de gaseificação de biomassa construído na plataforma "Engineering Equation Solver (EES)" desenvolvido pelos estudantes Felicia Fock e Kristine Thomsen, da Universidade Técnica da Dinamarca - DTU.

O gasifier é um modelo estacionário de uma planta para gaseificação térmica de biomassa. O modelo é restrito a sistemas de gaseificação baseado em gaseificadores de leito fixo co-corrente, conforme os parâmetros de entrada:

- Teor de umidade do combustível;
- Composição elementar (CH_xO_y);
- Temperatura de operação do gaseificador;

- Temperaturas de entrada do reator do combustível, do ar e do vapor;
- Temperatura do gás;
- Fluxos de massa (quantidade de madeira e vapor);
- Concentração de CH_4 no gás produzido;
- Perda de calor do gaseificador expressa em porcentagem da entrada térmica;
- Massa de carvão produzido, expressa em porcentagem da entrada de combustível.

A figura 3.9 representa o layout do modelo computacional "Gasifier":

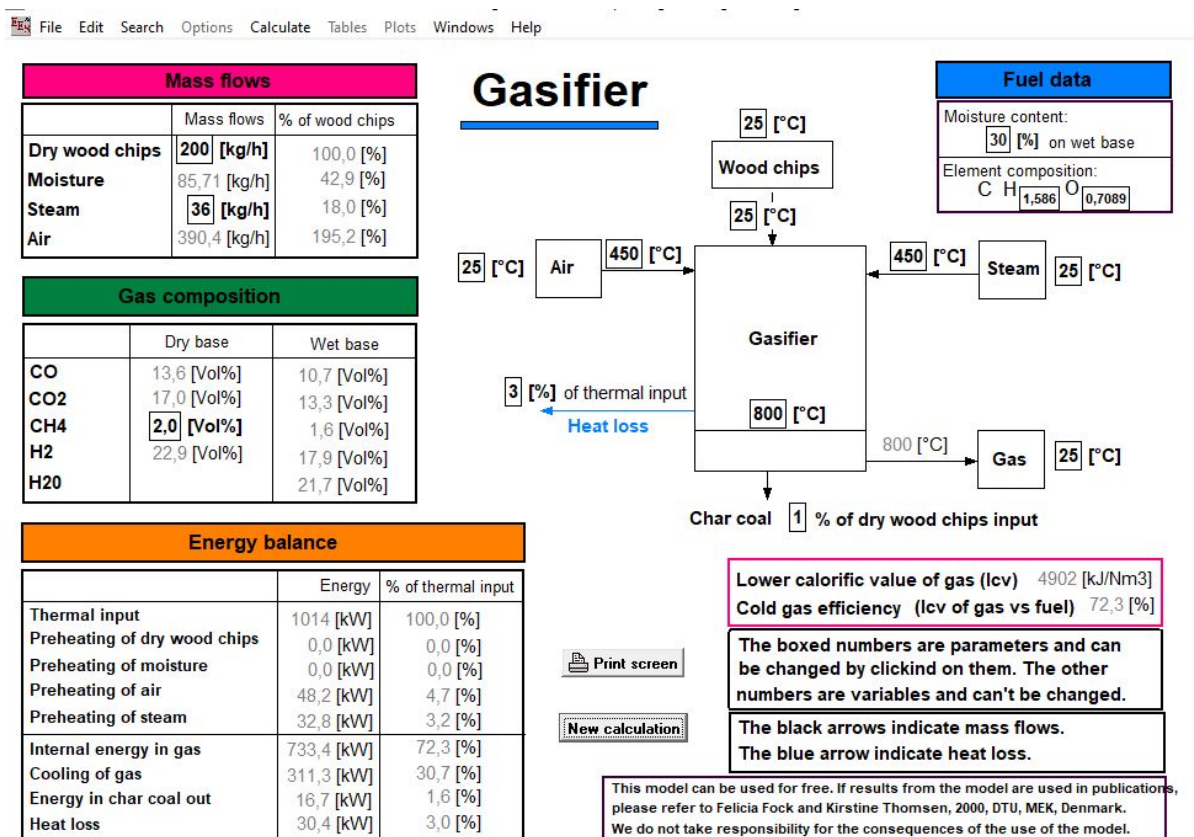


Figura 3.9: Janela do modelo computacional para gaseificação de biomassa (Gasifier).

Inserindo corretamente os dados de entrada, os resultados que o programa entrega são:

- Composição do gás produzido (CO , CO_2 , CH_4 , H_2 , H_2O) expresso em porcentagens volúmicas na base seca e na base úmida;
- Balanço energético do gaseificador;
- Poder calorífico inferior (PCI);
- Eficiência do gás frio (EGF) expressa como razão entre o PCI do gás produzido e o PCI do combustível.

As simulações energéticas foram realizadas para as misturas in natura e torrificadas com o intuito de comparar os dados gerados para cada processo. A Tab. 3.5 apresenta os parâmetros de entrada definidos.

Tabela 3.5: Parâmetros de entrada no gasifier.

Parâmetros	Condição	Dados	Seção
Fluxo de Massa			
Matéria Prima	Constante	75 $Kg.h^{-1}$	3.1 - 3.3
Vapor	Variável	0 e 10 $Kg.h^{-1}$	3.6
Composição do Gás			
CH_4	Constante	2,0%	3.6
Operação do Gaseificador			
Temperatura de operação Gaseificador	Variável	600°C e 900°C	3.6
Temperatura do reator do gás	Constante	25°C	3.6
Temperatura Reator do ar	Constante	350°C	3.6
Temperatura Reator do vapor	Constante	350°C	3.6
Temperaturas externas	Constante	25°C	3.6
Perda calor	Constante	5%	3.6
Carvão Produzido	Constante	3%	3.6
Dados do Combustível			
Teor de Umidade	Variável	Depende do biocombustível	3.4
Composição Elementar	Variável	Depende do biocombustível	3.4

Fonte: Adaptado de (MIRANDA; VERAS; GHESTI, 2020).

Com base no artigo de Miranda, Veras e Ghesti (2020), definimos que o fluxo de alimentação de biomassa no gaseificador seria de 75 Kg/h e a alimentação de vapor variando entre 0 e 10 Kg/h, a fim de comparar as atmosferas apenas com O_2 e O_2/H_2O . Para a composição do gás, manteve-se a concentração de CH_4 no gás produzido em 2%. Com base no mesmo artigo, a temperatura de operação do gaseificador varia entre 600°C e 900°C, as temperaturas do reator do gás, do ar e do vapor estão definidos em 25°C, 350°C e 350°C, respectivamente. A perda de calor para o ar ambiente e a produção de carvão em porcentagem foram definidos como constantes em 5% e 3%, respectivamente. Os dados do combustível como o teor de umidade e a composição elementar irão variar conforme a biomassa analisada.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da Biomassa

A Tab. 4.1 apresenta os valores médios das principais características das amostras de poda de árvores obtidas através das análises imediata e química da amostra.

Tabela 4.1: Caracterização da Biomassa de Brasília.

Biomassa - Blend de Brasília					
Análise Imediata		Análise Elementar		Parâmetros Energético	
Umidade [%]	8,04	C	44,92	Fórmula Empírica	$CH_{1,94}O_{0,79}$
Voláteis [%]	77,61	H	7,25	H/C ratio	1,94
Cinzas [%]	4,49	N	0,65	O/C ratio	0,79
Carbono Fixo [%]	17,90	S	0,13	PCS [$MJ.Kg^{-1}$]	19,32
		O	47,07		

A partir das Tabelas 4.1 e 4.2 pode-se comparar os resultados encontrados nesse estudo de caracterização de biomassa com os estudos de poda urbana de Piracicaba de Souza, Alencar e Mazzonetto (2016), de Campinas de Neves et al. (2013) e de São Paulo de Silva (2014), mostrando coerência nos resultados obtidos.

Para a análise imediata, há uma variação grande de umidade entre as amostras, o que pode ser justificado pelas diferentes condições climáticas resultantes de cada região e da época de amostragem. A biomassa do estudo possui 8,04% de umidade e segundo Braz (2014) um baixo teor de umidade é favorável quando se trata de conversão termoquímica.

A porcentagem de material volátil do blend de Brasília (cerca de 77%) é aproximadamente a média aritmética simples do material volátil encontrado em literatura, sendo apenas 8% mais baixo que o teor de voláteis do blend de peroba+gabeira e 13% maior que o encontrado no blend do estudo da Silva (2014). O teor de cinzas (4,49%) foi o mais baixo entre os casos apresentados (Tab. 4.2). E finalmente, quando comparamos o teor de carbono fixo da biomassa de Brasília (17,90%) sendo apenas 0,4% mais baixo que o CF mais alto encontrado literatura, esse teor está diretamente associado ao poder calorífico.

Para os resultados obtidos na análise elementar, encontramos o valor de 44,92% para o carbono, próximo à média dos demais blends de poda de árvore. Para o hidrogênio (7,25%), encontramos um nível superior em cerca de 20%. A concentração de nitrogênio (0,65%) foi a segunda mais baixa. Para o enxofre, encontramos o valor de 13%, 39% abaixo do único estudo que demonstrou número para o elemento. O teor de oxigênio, calculado por diferença, apresentou 47,07% o maior valor entre todas as literaturas. A partir dos valores da análise elementar foi possível encontrar as razões entre H/C (1,94) e O/C (0,79). O poder calorífico foi o mais alto entre os estudos.

Tabela 4.2: Caracterização de Biomassa em literatura.

Análises	Piracicaba Poda Urbana (Souza et al 2016)	Piracicaba Poda de Arvore (Mazzonetto et al 2012)	Campinas Peroba + Garapeira (Neves 2013)	São Paulo Poda de Árvore (Dafne Silva 2016)
Análise Imediata				
Umidade [%]	36,62 ± 0,89	60,30 ± 1,41	11,85 ± 0,23	12,00
Voláteis [%]	75,36 ± 0,53	82,37 ± 1,10	84,05 ± 0,44	67,8
Cinzas [%]	8,19 ± 0,44	6,46 ± 0,43	6,95 ± 0,90	13,6 ± 2,3
Carbono Fixo [%]	16,44 ± 0,36	11,17 ± 1,06	9,00 ± 0,58	18,6
Análise Elementar				
C [%]	45,00 ± 0,2	42,73	46,89 ± 0,2	46,2
H [%]	5,86 ± 0,12	5,86	5,99 ± 0,2	5,72
N [%]	1,01 ± 0,09	1,34	0,27 ± 0,2	1,6
S [%]	-	-	-	0,21
O [%]	39,94 ± 0,49	43,61	46,85 ± 0,2	46,27
Parâmetros Energéticos				
Fórmula Empírica	$CH_{1,56}O_{0,67}$	$CH_{1,65}O_{0,77}$	$CH_{1,53}O_{0,75}$	$CH_{1,49}O_{0,75}$
H/C Ratio	1,56	1,65	1,53	1,49
O/C Ratio	0,67	0,77	0,75	0,75
PCS [$kJ.Kg^{-1}$]	16,35 ± 0,14	18,47	19,06 ± 0,11	17,53

Fonte: Souza, Alencar e Mazzonetto (2016), Neves et al. (2013) e Silva (2017).

4.2 Torrefação

A Tab. 4.3 apresenta a comparação dos valores encontrados para a caracterização da biomassa de Brasília in natura e após os três processos de torrefação, onde foram utilizadas as temperaturas de 225°C, 250°C e 275°C.

Para os materiais voláteis, percebeu-se uma perda gradativa o que demonstra a perda de voláteis mais sensíveis ao aquecimento e retendo os voláteis de maior poder calorífico (RODRIGUES, 2009; CHEN; PENG; BI, 2015; GALVÃO, 2018). Observou-se um aumento gradativo do teor de cinzas obtendo-se os valores de 4,49, 4,56 (1,53%), 5,01 (10,4%) e 5,55% (19,1%) para as amostras in natura e torrefadas a 225, 250 e 275°C, respectivamente. Porém, o biocombustível obtido a 275°C atende os requisitos para o processo de gaseificação apresentando teores de cinza menores que 7% (VIEIRA, 2012). Para o carbono fixo houve uma melhora considerável entre o blend in natura (17,90%) e o blend após o processo de torrefação a 275°C (30,20%) com um aumento de cerca de 40%. Enquanto a variação para 225°C e 250°C foram de 10% e 27%,

respectivamente.

Tabela 4.3: Caracterização de Biomassa Torrificada.

Análises	In Natura	225° C	250° C	275° C
Análise Imediata				
Umidade [%]	8,04	2,16	2,09	2,02
Voláteis [%]	77,61	75,56	70,68	64,25
Cinzas [%]	4,49	4,56	5,01	5,55
Carbono Fixo [%]	17,90	19,88	24,31	30,20
Análise Elementar				
C [%]	44,92	48,63	50,52	53,25
H [%]	7,25	6,56	6,31	5,90
N [%]	0,65	0,76	0,68	0,81
S [%]	0,13	0,12	0,13	0,14
O [%]	47,07	43,93	42,37	39,91
Parâmetros Energéticos				
Fórmula Empírica	$CH_{1,94}O_{0,79}$	$CH_{1,62}O_{0,68}$	$CH_{1,50}O_{0,63}$	$CH_{1,33}O_{0,56}$
H/C Ratio	1,94	1,62	1,50	1,33
O/C Ratio	0,79	0,68	0,63	0,56
PCS [$MJ.Kg^{-1}$]	19,32	19,83	20,61	21,47
Rendimento Gravimétrico [%]	-	86,54	76,92	71,15
Rendimento Energético	-	88,82	82,05	79,07

Fonte: adaptado de Santanna et al. (2020)

Para a análise elementar, a variação de carbono também demonstrou um aumento de 8%, 11% e 16% após os processos de torrefação de 225°C, 250°C e 275°C, respectivamente. Observou-se uma diminuição no teor de hidrogênio de 10%, 13% e 19% para as temperaturas de 225°C, 250°C e 275°C, respectivamente. Para o Oxigênio houve uma queda gradativa de concentração, o que representa a melhora da biomassa para processos energéticos, havendo uma diminuição de 7%, 10% e 15% para as temperaturas de 225°C, 250°C e 275°C, respectivamente.

Todas essas mudanças na composição química da biomassa resultaram em uma diminuição nas razões de H/C e O/C, o que influencia positivamente para o aumento do poder calorífico da amostra significando um maior teor de carbono em uma menor massa de material, ou seja, quanto menores essas razões, maior será a densidade energética, logo, uma melhora no potencial energético da biomassa. A melhora do poder calorífico foi de 2,5%, 6% e 10% para as temperaturas de 225°C, 250°C e 275°C, respectivamente (SANTANNA et al., 2020). Segundo Sarkar et al. (2014), o aumento do PCS ocorre devido às baixas razões entre o hidrogênio e o carbono (H/C) e oxigênio e carbono (O/C).

4.3 Gaseificação

A simulação numérica da gaseificação a partir de modelos de equilíbrio termodinâmico pode ser usado para investigar a influência da composição da matéria-prima e dos parâmetros do processo de gaseificação na qualidade do gás produtor independente da tecnologia do gaseificador. Esses modelos de equilíbrio estequiométricos são ferramentas de baixo custo para realizar análises

preliminares do desempenho da gaseificação. Porém, o desempenho real do sistema depende de sistemas experimentais visto que o equilíbrio termodinâmico desejado pode não ser alcançado (MIRANDA; VERAS; GHESTI, 2020).

4.3.1 Biomassa in natura

As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os parâmetros de saída das simulações da gaseificação em equilíbrio térmico no EES para o biocombustível de Brasília in natura (Tab. 4.1) e para os biocombustíveis encontrados na literatura (Tab. 4.2) para atmosferas de Ar e Ar/ H_2O .

Tabela 4.4: Resultados numéricos da gaseificação de termoequilíbrio de biomassa in natura com atmosfera de Ar.

Parâmetros Temp. Gaseificador	Brasília		Piracicaba		Campinas		São Paulo	
	600°C	900°C	600°C	900°C	600°C	900°C	600°C	900°C
Fluxo de massa [Kg/h]								
Matéria Prima	75	75	75	75	75	75	75	75
Ar [350°C]	103,7	135,7	140,2	186,3	101,5	132,7	100,6	131,6
Vapor [350°C]	0	0	0	0	0	0	0	0
Composição do gás [Base Secca%]								
CO	18,2	19,9	8,7	11,8	19,3	20,8	19,5	20,9
CO_2	13,9	11,3	20,5	16,6	15,2	12,7	15,3	12,8
H_2	29,1	20,0	27,4	16,1	26,6	17,7	26,3	17,5
CH_4	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Parâmetros Energéticos								
Energia de entrada [KW]	373	373	393,8	393,8	361,4	361,4	358,8	358,8
Energia Inter. do Gás [KW]	295,2	265,7	275,9	234,2	282,6	253,6	280,2	251,5
PCI [$kJ.Kg^{-1}$]	6148	5380	4776	3944	6026	5250	6022	5244
EGF [%]	79,1	71,2	70,1	59,5	78,2	70,2	78,1	70,1

Tabela 4.5: Resultados numéricos da gaseificação de termoequilíbrio de biomassa in natura com atmosfera de Ar/ H_2O .

Parâmetros Temp. Gaseificador	Brasília		Piracicaba		Campinas		São Paulo	
	600°C	900°C	600°C	900°C	600°C	900°C	600°C	900°C
Fluxo de massa [Kg/h]								
Matéria Prima	75	75	75	75	75	75	75	75
Ar [350°C]	102,6	137,9	140,6	189,2	100,3	134,9	100,6	133,7
Vapor [350°C]	10	10	10	10	10	10	10	10
Composição do gás [Dry wt%]								
CO	14,9	17,6	7,6	10,7	15,7	18,3	15,9	18,4
CO_2	16,2	12,9	21,3	17,3	17,8	14,3	18	14,5
H_2	31,2	20,8	28	16,3	29	18,8	28,8	18,6
CH_4	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Parâmetros Energéticos								
Energia de entrada [KW]	373	373	393,8	393,8	361,4	361,4	358,8	358,8
Energia Inter. do Gás [KW]	293,5	261,6	274,3	230,2	282,6	249,6	278,5	247,5
PCI [$kJ.Kg^{-1}$]	5961	5191	4701	3829	5831	5056	5824	5049
EGF [%]	78,7	70,1	69,7	58,4	77,7	69,1	77,6	69

Com o auxílio das Tabelas 4.4 e 4.5 foi possível gerar os gráficos das Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, que mostram os principais componentes do gás de síntese em função da temperatura de

gaseificação para as duas atmosferas (CO , CO_2 , H_2 e CH_4 (2%)). Podemos ver alguns padrões da composição dos gases com o aumento da temperatura de gaseificação como o incremento da concentração de CO e a diminuição das concentrações de CO_2 e H_2 , onde as maiores variações de concentração ocorreram em atmosfera com vapor (Ar/H_2O). Independente da atmosfera e da temperatura de gaseificação, percebeu-se que as maiores concentrações de CO estão presentes nas biomassas com o teor de umidade mais baixo e que a concentração maior de CO_2 está presente na biomassa com maior teor de umidade, resultado demonstrado no estudo de Plis e Wilk (2011).

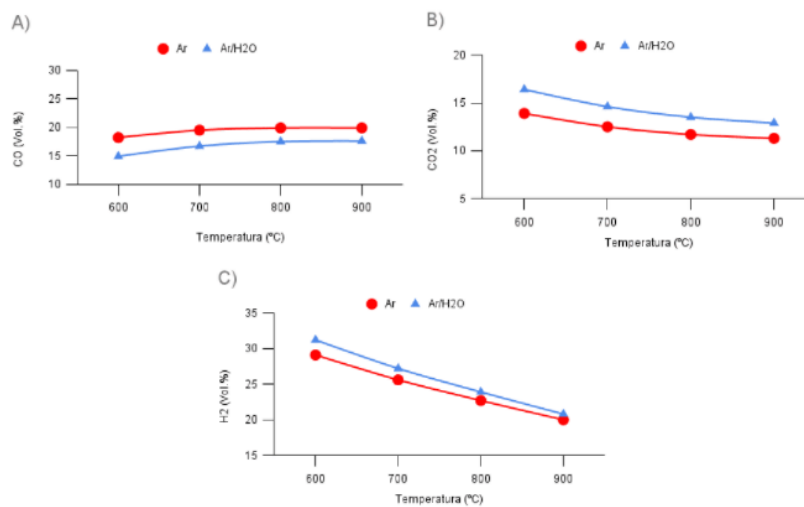


Figura 4.1: Principais componentes do gás de síntese do blend de biomassa de Brasília em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2 .

Para a biomassa de Brasília, observamos que na Fig. 4.1A o ar como agente de gaseificação, a produção de CO aumenta de 18,2 para 19,9% vol.(variação de aprox. 8,5%) quando a temperatura de gaseificação aumenta de 600 para 900°C, mas usando ar/ H_2O a produção cresce de 14,9 para 17,6% vol.(variação de aprox. 15,3%) para o mesmo intervalo de temperatura. No caso de CO_2 (Fig. 4.1B), há uma queda de 13,9 para 11,3% vol.(variação de aprox. 18,7%) com atmosfera de ar e de 16,2 para 12,9% vol.(variação de aprox. 20,4%) para ar/ H_2O . Para o H_2 (Fig. 4.1C), há uma diminuição da sua produção independente da atmosfera - de 29,1 para 20,0% (variação de aprox. 31,3%) e 31,2 para 20,8% (variação de aprox. 33,3%) para as atmosferas com ar e ar/ H_2O , respectivamente.

Utilizando o mesmo intervalo de variação de temperatura de gaseificação para a biomassa de Piracicaba, na Fig. 4.2A apresenta que a produção de CO aumenta de 8,7 para 11,8% vol.(variação de aprox. 26,3%) , e 7,6 para 10,7% vol.(variação de aprox. 29,0%) para as atmosferas com ar e ar/ H_2O , respectivamente. Para CO_2 (Fig.4.2B), as variações foram de 20,5 para 16,6%(variação de aprox. 19,0%) e de 21,3 para 17,3% (variação de aprox. 18,8%) para as atmosferas com ar e ar/ H_2O , respectivamente. Na Fig. 4.2C, a diminuição de produção de H_2 tende a 16% para as curvas das duas atmosferas no estudo, havendo uma maior variação para a que contém ar/ H_2O (aprox. 41,8%).

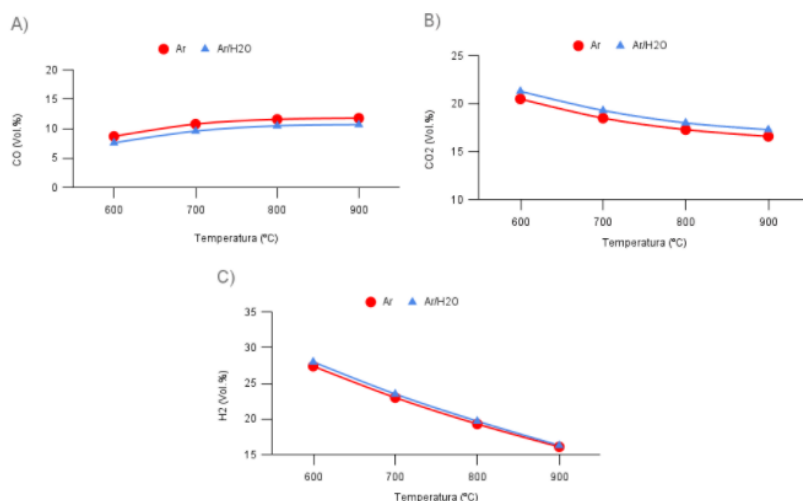


Figura 4.2: Principais componentes do gás de síntese do blend de biomassa de Piracicaba em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2 .

Para a biomassa de Campinas, a Fig. 4.3A mostra que a produção de CO aumenta de 19,3 para 20,8% vol.(variação de aprox. 7,2%) e de 15,7 para 18,3% vol.(variação de aprox. 14,2%) com o acréscimo de temperatura de gaseificação de 600 para 900°C para as atmosferas de ar e ar/ H_2O , respectivamente. No caso de CO_2 (Fig. 4.3B), há uma queda de 15,2 para 12,7% vol.(variação de aprox. 16,4%) com atmosfera de ar e de 17,8 para 14,3% vol.(variação de aprox. 19,6%) para ar/ H_2O . Para o H_2 (Fig. 4.3C), também há uma queda de produção, sendo de 26,6 para 17,7% (variação de aprox. 33,4%) e 29 para 18,8% (variação de aprox. 35,2%) para as atmosferas com ar e ar/ H_2O , respectivamente.

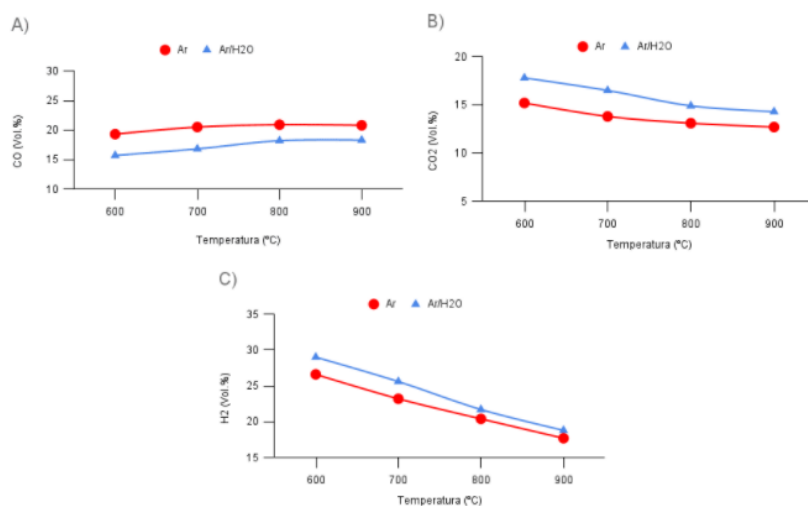


Figura 4.3: Principais componentes do gás de síntese do blend de biomassa de Campinas em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2 .

Em São Paulo (Fig. 4.4), a composição do gás produzido se comporta similarmente as outras para diferentes biomassas. Na Fig. 4.4A, mostra que há um leve aumento na produção de CO para os dois casos com o aumento de temperatura de gaseificação, sendo de 19,5 para 20,9% (variação de aprox. 6,7%) e 15,9 para 18,4% (variação de aprox. 13,6%) para as atmosferas com ar e ar/ H_2O , respectivamente. No caso de CO_2 (Fig. 4.4B), há uma queda de 15,3 para 12,8% vol. (variação de aprox. 16,3%) com atmosfera de ar e de 18,0 para 14,5% vol. (variação de aprox. 19,4%) para ar/ H_2O . Para o H_2 (Fig. 4.4C), há uma diminuição da sua produção independente da atmosfera - de 26,3 para 17,5% (variação de aprox. 33,5%) e 28,8 para 18,6% (variação de aprox. 35,4%) para as atmosferas com ar e ar/ H_2O , respectivamente.

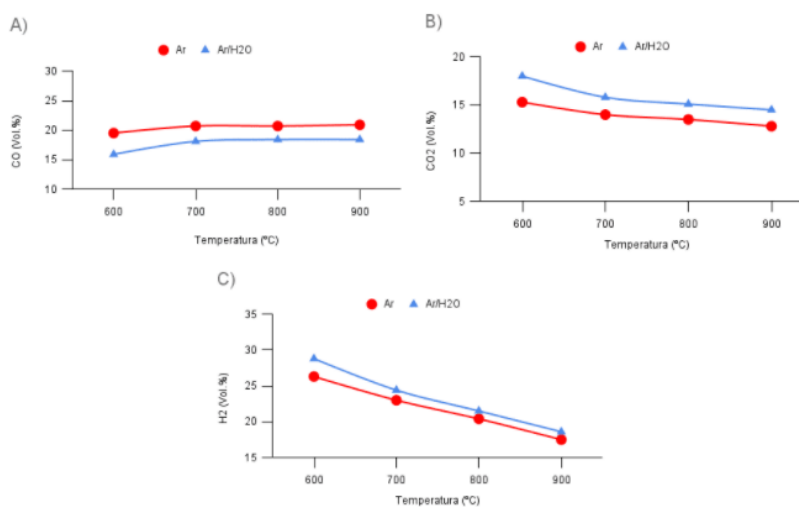


Figura 4.4: Principais componentes do gás de síntese do blend de biomassa de São Paulo em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2 .

Independente das atmosferas e das temperaturas de gaseificação, as maiores concentrações de CO foram encontradas no gás de síntese resultante da biomassa de São Paulo. As maiores concentrações de CO_2 foram encontradas na biomassa de Piracicaba. Para o H_2 , as maiores concentrações (31,2% - ar e 20,8% - ar/ H_2O) foram encontradas no biocombustível de Brasília. Os comportamentos mais próximos entre as biomassas foram entre as de Campinas e de São Paulo, isso pode se dar pela grande proximidade entre as cidades, além do período de coleta das amostras.

A Fig. 4.5 mostra o poder calorífico inferior em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas. Independente da atmosfera, o PCI apresenta uma queda com o aumento da temperatura de gaseificação, sendo os menores valores apresentados no blend de Piracicaba (menor concentração de CO). A diminuição do PCI observado nos gases de síntese se dá principalmente pela queda na concentração de H_2 e do aumento da concentração CO , visto que quanto menor a razão entre H_2 e CO menor será o poder calorífico inferior da amostra. Vemos também que a inclusão de 10% de vapor de água no agente gaseificador abaixa o PCI do gás de síntese.

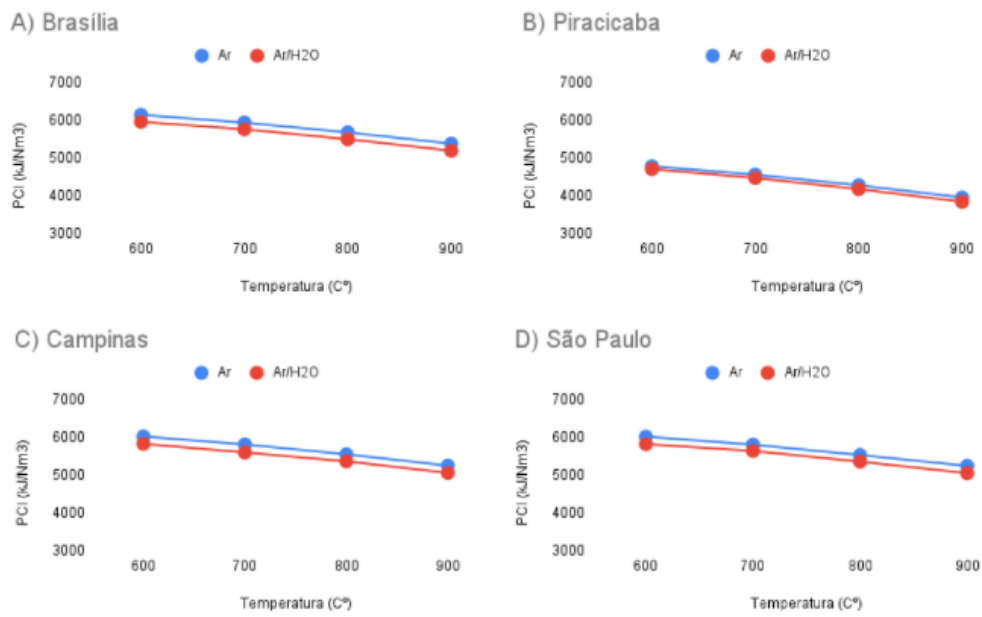


Figura 4.5: Poder Calorífico Inferior em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação.

A Fig. 4.6 apresenta a eficiência do gás frio em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas. Independente da atmosfera, o EGF apresenta uma queda com o aumento da temperatura de gaseificação, sendo os menores valores apresentados no blend de Piracicaba (menor concentração de CO). A diminuição do EGF observado nos gases de síntese se dá principalmente pela queda na concentração de H_2 .

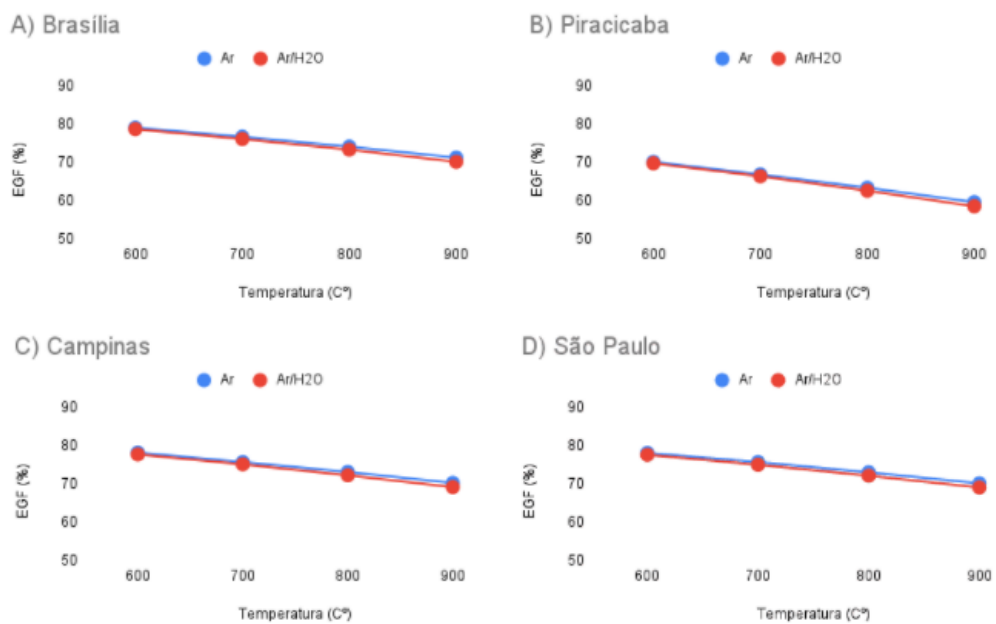


Figura 4.6: Eficiência do Gás Frio em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação.

4.3.2 Biomassa Torrefada

As Tabelas 4.6 e 4.7 resumem os parâmetros de saída das simulações para gaseificação térmica no EES do biocombustível obtido a partir dos parâmetros pré-estabelecidos na Seção 3.6. Realizou-se uma comparação de desempenho entre a gaseificação da biomassa in natura e após os processos de torrefação para as temperaturas de 225°C, 250°C e 275°C, para as temperaturas de gaseificação de 600°C e 900°C e para os dois agentes de gaseificação.

Tabela 4.6: Resultados numéricos da gaseificação de termoequilíbrio da biomassa in natura e após os processos de torrefação com atmosfera Ar.

Parâmetros Temp. Gaseificador	In Natura		225°C		250°C		275°C	
	600°C	900°C	600°C	900°C	600°C	900°C	600°C	900°C
Fluxo de massa [Kg/h]								
Matéria Prima	75	75	75	75	75	75	75	75
Ar [350°C]	103,7	135,7	109,1	138,3	114,4	143,5	122,5	151,5
Vapor [350°C]	0	0	0	0	0	0	0	0
Composição do gás [Base seca%]								
CO	18,2	19,9	24,60	24,2	26,2	25,3	28,8	26,8
CO ₂	13,9	11,3	10,0	9,0	8,9	8,3	7,2	7,4
H ₂	29,1	20,0	25,4	18,4	24,0	17,6	22,0	16,5
CH ₄	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Parâmetros Energéticos								
Energia de entrada [KW]	373	373	393,8	393,8	406,2	406,2	425,2	425,2
Energia Inter. do Gás [KW]	295,2	265,7	320,6	292,3	332,3	303,6	350,2	320,9
PCI [<i>kJ.Kg⁻¹</i>]	6148	5380	6560	5757	6623	5806	6721	5882
EGF [%]	79,1	71,2	81,4	74,2	81,8	74,7	82,4	75,5

Tabela 4.7: Resultados numéricos da gaseificação de termoequilíbrio da biomassa in natura e após os processos de torrefação com atmosfera Ar/H₂O.

Parâmetros Temp. Gaseificador	In Natura		225°C		250°C		275°C	
	600°C	900°C	600°C	900°C	600°C	900°C	600°C	900°C
Fluxo de massa [Kg/h]								
Matéria Prima	75	75	75	75	75	75	75	75
Ar [350°C]	102,6	137,9	107,1	140,0	112,1	145,0	120,0	152,8
Vapor [350°C]	10	10	10	10	10	10	10	10
Composição do gás [Base Secca%]								
CO	14,9	17,6	20,1	21,4	21,5	22,3	23,7	23,7
CO ₂	16,2	12,9	13,3	11,0	12,4	10,5	10,9	9,6
H ₂	31,2	20,8	28,4	19,7	27,3	19,1	25,5	18,1
CH ₄	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Parâmetros Energéticos								
Energia de entrada [KW]	373	373	393,8	393,8	406,2	406,2	425,2	425,2
Energia Inter. do Gás [KW]	293,5	261,6	318,9	288,2	330,6	299,6	348,4	316,9
PCI [<i>kJ.Kg⁻¹</i>]	5961	5191	6316	5542	6371	5590	6459	5663
EGF [%]	78,7	70,1	81,0	73,2	81,4	73,7	81,9	74,5

Como apresentado na Seção 4.3.1, os gráficos das Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 também apresentam os principais componentes do gás de síntese em função da temperatura de gaseificação para as duas atmosferas, agora para o blend torrefado. Diferente das amostras in natura, os comportamentos das amostras (225, 250 e 275°C) não seguem o mesmo padrão no mesmo intervalo de temperatura de gaseificação.

Para a biomassa torrefada a 225°C, a composição de CO (Fig. 4.7A) as curvas passam por seu ponto máximo onde, para a atmosfera de ar varia de 24,6% a 600°C para 24,2% a 900°C com máximo no intervalo de 700-800°C e para a atmosfera ar/ H_2O com máximo entre 800-900°C varia de 20,1 para 21,4% a 600 e 900°C, respectivamente. Para a concentração de CO_2 (Fig. 4.7B) as concentrações diminuem de 10,0 para 9,0% (aprox. 10,0%) no intervalo de 600 a 900°C para a atmosfera com ar e de 13,3 para 11,0% (aprox. 17,3%) para a atmosfera com ar/ H_2O no mesmo intervalo de temperatura de gaseificação. No caso do H_2 (Fig. 4.7C), independente da atmosfera há uma queda consideração na concentração, variando de 25,4 para 18,4% (aprox. 27,5) para atmosfera de ar no intervalo de 600 a 900°C e uma variação de 28,4 para 19,7% (aprox. 30,6%) para a atmosfera de ar/ H_2O no mesmo intervalo de temperatura de gaseificação.

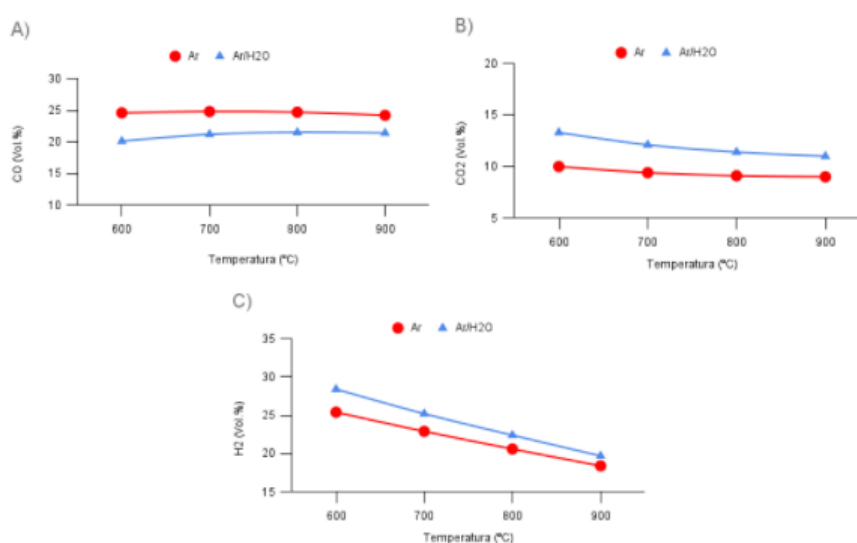


Figura 4.7: Principais componentes do gás de síntese do blend torrefado a 225°C em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2 .

Na Fig. 4.8 vemos a concentração dos principais componentes do gás de síntese para o blend torrefado a 250°C. Para as concentrações de CO (Fig. 4.8A) segue o padrão de alcançar pontos máximos, onde para a atmosfera de O_2 ele encontra-se entre as temperaturas de 600-700°C, e a partir dessa temperatura a concentração segue em queda saindo de 26,2 para 25,3% (aprox. 3,5%) e para o caso com atmosfera composta por ar/ H_2O , o ponto máximo da curva se encontra entre 800-900°C, começando a cair a partir desse intervalo. Para a concentração CO_2 , as duas curvas possuem uma queda suave, onde para a atmosfera de ar sai de 8,9 para 8,3% (aprox. 6,7%) para as temperaturas de 600 e 900°C, respectivamente, e no mesmo intervalo de temperatura de gaseificação com uma atmosfera de ar/ H_2O a variação é de 12,4 para 10,5% (aprox. 15,3%). No caso do H_2 (Fig. 4.8C), independente da atmosfera há uma queda consideração na concentração, variando de 24,0 para 17,6% (aprox. 26,6%) para atmosfera de ar no intervalo de 600 a 900°C e uma variação de 27,3 para 19,1% (aprox. 30,0%) para a atmosfera de ar/ H_2O no mesmo intervalo de temperatura de gaseificação.

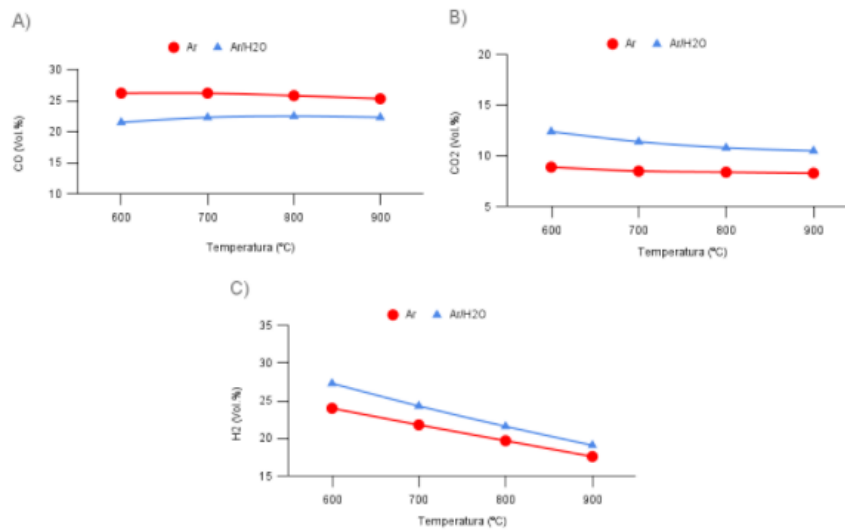


Figura 4.8: Principais componentes do gás de síntese do blend torrefado a 250°C em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2 .

Para o blend torreficado a 275°C, diferente das amostras anteriores, a Fig. 4.9A mostra que a produção de CO cai de 28,8 para 26,8% vol.(variação de aprox. 6,9%) nas temperaturas de 600 e 900°C, respectivamente, e para a atmosfera de ar alcança o seu ponto máximo no intervalo de 700-800°C para a atmosfera composta por ar/ H_2O mantendo uma simetria na curva. No caso de CO_2 (Fig. 4.9B), há uma um aumento de 7,2 para 7,4% vol.(aprox. 2,7%) com atmosfera de ar, alcançando um ponto mínimo no intervalo de 700-800°C, e uma queda de 10,9 para 9,6% vol.(aprox. 11,9%) para ar/ H_2O nas temperaturas de 600 e 900°C, respectivamente. Para o H_2 (Fig. 4.3C), também há uma queda de produção, sendo de 22,0 para 16,5% (aprox. 25,0%) e 25,5 para 18,1% (aprox. 29,0%) para as atmosferas com ar e ar/ H_2O , respectivamente.

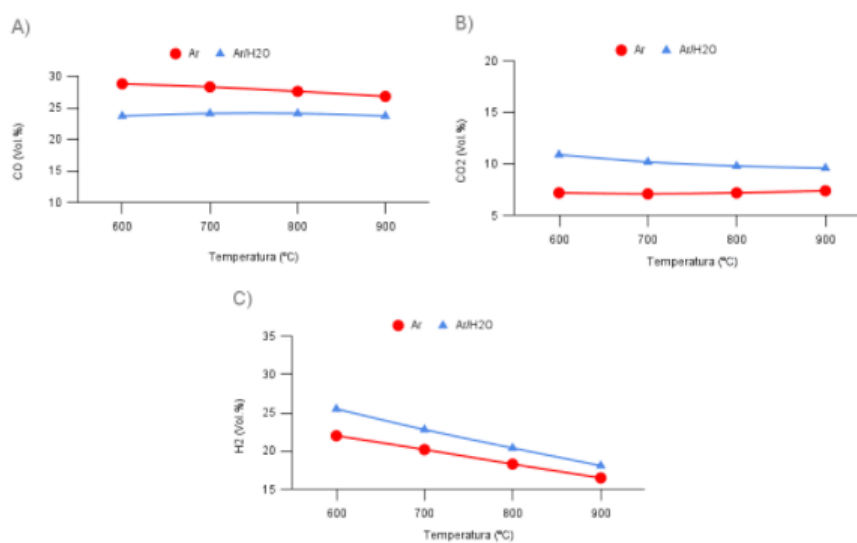


Figura 4.9: Principais componentes do gás de síntese do blend torrefado a 275°C em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2 .

A Fig. 4.10 mostra o poder calorífico inferior em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas. Quando observamos cada amostra de forma independente, o PCI apresenta uma queda com o aumento da temperatura de gaseificação, sendo os menores valores apresentados no blend in natura (menor concentração de CO). A diminuição do PCI observado nos gases de síntese se dá principalmente pela queda na concentração de H_2 e do aumento da concentração CO , visto que quanto menor a razão entre H_2 e CO menor será o poder calorífico inferior da amostra (SARKAR et al., 2014). Vemos também que a inclusão de H_2O a atmosfera abaixa o PCI do gás de síntese, resultado condizente com o estudo de Adánez-Rubio et al. (2020).

Porém, quando comparamos as amostras entre si, o processo torreficação apresenta melhoras significativas para o PCI do blend. Para o processo gaseificação com atmosfera de ar a $600^\circ C$, houve um aumento de 6148, 6560, 6623 e 6721 para as amostras in natura, $225^\circ C$, $250^\circ C$ e $275^\circ C$, respectivamente, e para a atmosfera com ar/ H_2O , o aumento foi de 5961, 6316, 6371 e 6459 para as amostras in natura, $225^\circ C$, $250^\circ C$ e $275^\circ C$, respectivamente, para a mesma temperatura de gaseificação. Para o processo gaseificação com atmosfera de ar a $900^\circ C$, houve um aumento de 5380, 5757, 5086 e 5882 para as amostras in natura, $225^\circ C$, $250^\circ C$ e $275^\circ C$, respectivamente, e para a atmosfera com ar/ H_2O , o aumento foi de 5191, 5542, 5590 e 5663 para as amostras in natura, $225^\circ C$, $250^\circ C$ e $275^\circ C$, respectivamente, para a mesma temperatura de gaseificação. O aumento do PCI pode ser devido à diminuição das razões de oxigênio e carbono (O/C) e de hidrogênio e carbono (H/C) como comentado por Sarkar et al. (2014).

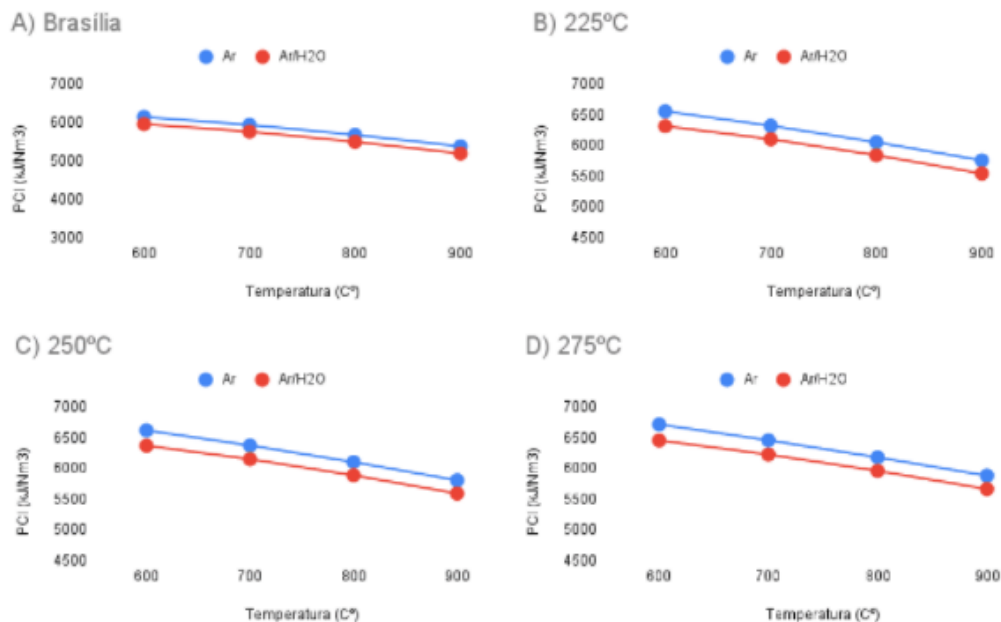


Figura 4.10: Poder Calorífico Inferior em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação para o produto torrefado.

A Fig. 4.11 apresenta a eficiência do gás frio em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas. Quando observamos cada amostra de forma independente, o EGF também apresenta uma queda com o aumento da temperatura de gaseificação, sendo os menores valores apresentados no blend in natura (menor concentração de CO). Porém, há uma melhoria de

rendimento quando comparamos uma amostra com a outra, apresentando os melhores resultado para a EGF no produto torreficado a 275°C. A diminuição do EGF observado nos gases de síntese se dá principalmente pela queda na concentração de H_2 .

Quando comparamos as amostras entre si, como para o caso do PCI, o processo torreficação também apresenta melhoras significativas para o EGF do blend. Para o processo gaseificação com atmosfera de ar a 600°C, houve um aumento de 79,1, 81,4, 81,8 e 82,4% para as amostras in natura, 225°C, 250°C e 275°C, respectivamente, e para a atmosfera com ar/ H_2O , o aumento foi de 78,7, 81,0, 81,4 e 81,9% para as amostras in natura, 225°C, 250°C e 275°C, respectivamente, para a mesma temperatura de gaseificação. E para o processo gaseificação com atmosfera de ar a 900°C, houve um aumento de 71,2, 74,2, 74,7 e 75,5% para as amostras in natura, 225°C, 250°C e 275°C, respectivamente, e para a atmosfera com ar/ H_2O , o aumento foi de 70,1, 73,2, 73,7 e 74,5% para as amostras in natura, 225°C, 250°C e 275°C, respectivamente, para a mesma temperatura de gaseificação. Apresentando que quanto menor a temperatura de gaseificação, maior será a eficiência de gás frio.

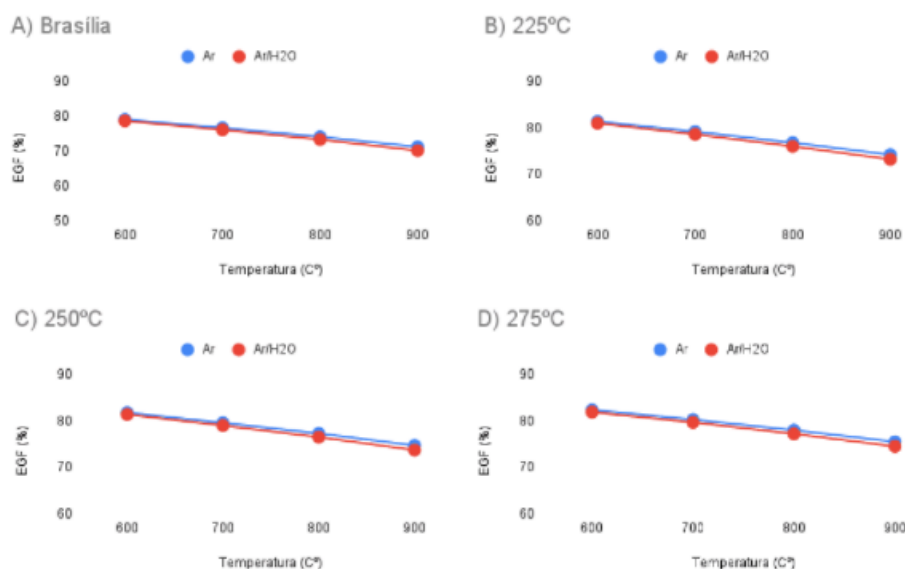


Figura 4.11: Eficiência do Gás Frio em função da temperatura de gaseificação para duas atmosferas de gaseificação para o produto torrefado.

4.4 Benefícios da rota de torrefação para o gás de síntese

Para as mesmas condições de gaseificação (Tab. 3.5) dos resultados apresentados na Seção 4.3, a Fig. 4.12 apresenta as curvas para a composição do gás de síntese em função das temperaturas de torrefação aplicadas ao biocombustível. Os teores de concentração de CO (Fig. 4.12A) aumentam independente da atmosfera e da temperatura de gaseificação. Porém, encontramos o aumento mais significativo para a biomassa gaseificada a 600°C com o ar como agente de gaseificação, partindo de 18,2% in natura para 28,8% a 275°C (variando 36,8%). Para o CO_2 (Fig. 4.12B), todas as curvas apresentam uma queda nos teores de concentração. Novamente a curva com variação mais significativa (48,2%) ocorreu no biocombustível gaseificado

a 600°C usando o ar como agente de gaseificação, que in natura possui a concentração de 13,9% e caía para 7,2% a 275°C. Na Figura 4.12C, os teores de H_2 também reduziram conforme a severidade da torrefação. E conforme as concentrações de CO e CO_2 , a curva que obteve maior variação (24,4%) também foi para o blend gaseificado a 600°C com o ar como agente de gaseificação, onde in natura possui o teor de 29,1% e a 275°C o teor de 22,0%.

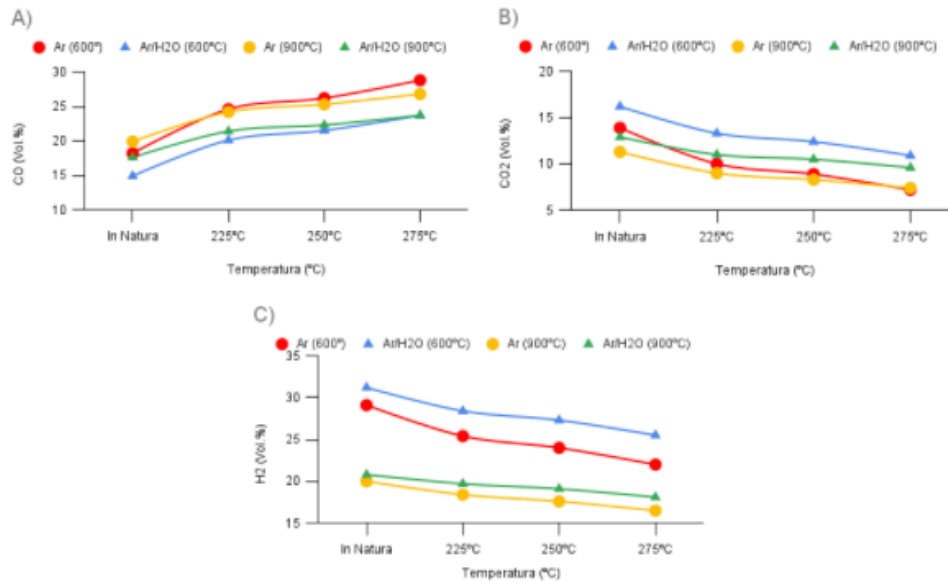


Figura 4.12: Componentes do gás de síntese em função da temperatura de torrefação para as duas atmosferas de gaseificação distintas e para duas temperatura de gaseificação. A) CO , B) CO_2 e C) H_2 .

Para o PCI e a EGF, observa-se que aumentam com o grau de severidade do pré-tratamento de torrefação. Por outro lado, os dois indicadores apresentam valores mais baixos com o aumento da temperatura de gaseificação. No caso do PCI, o agente gaseificador ar apresentou uma melhoria significativa. Para o caso do EGF, o agente não apresentou uma mudança tão significativa assim.

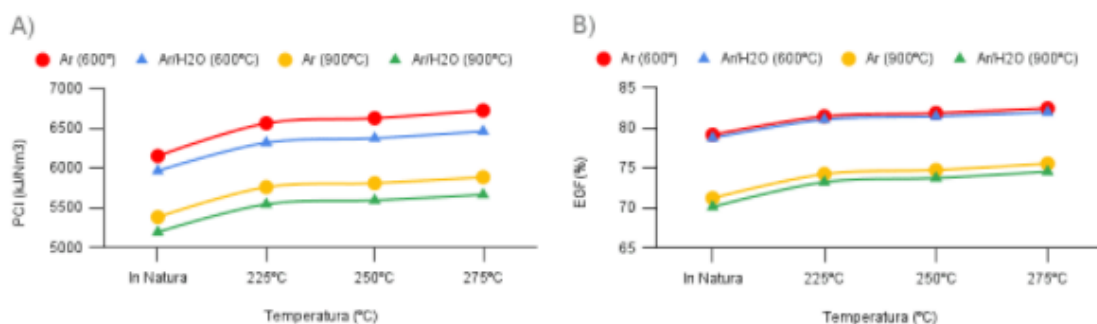


Figura 4.13: A) Poder Calorífico Inferior e B) Eficiência do Gás Frio em função da temperatura de torrefação para duas atmosferas de gaseificação e para as temperaturas de gaseificação de 600 e 900°C para o produto torrefado.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

A necessidade do uso de tecnologias mais limpas para transformação energética é evidente, portanto, este trabalho apresenta um estudo preliminar sobre o impacto da rota de tratamento térmico em resíduos urbanos provenientes de poda para o uso energético, a partir do gás de síntese da gaseificação. Os primeiros resultados encontrados a partir da caracterização do blend in natura mostraram o potencial do produto sólido de Brasília-DF.

A análise imediata da amostra apresentou uma biomassa que absorve pouca umidade (8,04%) o que é favorável para o processo de conversão termoquímica. Uma boa quantidade de voláteis (77,61%), que oferecem o calor necessário ao processo. O menor teor de cinzas (4,49%) encontrado em toda a literatura. E um ótimo teor de carbono fixo (17,90%), fator é associado diretamente ao poder calorífico, quanto maior melhor. A análise elementar apresentou resultados condizentes com outros estudos (44,92% de C, 7,25% de H, 0,65% de N, 0,13% de N e 47,07% de O). Obteve altas razões H/C(1,94) e O/C(0,79) quando comparado aos outros blends in natura, porém com o alto teor de CF, obteve o mais alto PCS ($19,32 \text{ Mj.Kg}^{-1}$).

Após os processos de torrefação (225, 250 e 275°C) a amostra apresentou melhorias em todas as características que influenciam na melhoria do produto final. A umidade caiu (2,16, 2,09 e 2,02%). A concentração de carbono fixo aumentou (19,88, 24,31 e 30,20%). As razões de H/C reduziram (1,62, 1,50 e 1,33) assim como as razões de O/C (0,68, 0,63 e 0,56) resultando em um aumento significativo no PCS do combustível sólido (19,83, 20,61 e 21,47 MJ.Kg^{-1}).

Ao simular a gaseificação desses produtos sólidos, o resultado é condizente com o que se esperava. O gás de síntese da biomassa de Brasília possui os mais altos valores de PCI e EGF quando utilizados os mesmos parâmetros de gaseificação. Dentro da variação da temperatura de gaseificação 600-900°C e da variação de atmosfera ar-ar/ H_2O , os melhores resultado de PCI (6148 KJ.Kg^{-1}) - gás de médio poder calorífico - e EGF (79,1%) foram encontrados para uma atmosfera de ar a temperatura de 600°C.

Os processos de torrefação no blend resultaram em melhoras significativas em todos os cenários tanto para o PCI quanto para o EGF. Como esperado, com todos os parâmetros constantes iguais, os melhores resultados de PCI (6721 KJ.Kg^{-1}) - gás de médio poder calorífico - e EGF (82,4%) foram encontrados para a amostra torrificada a 275°C, em atmosfera de ar a

temperatura de gaseificação de 600°C.

Referências Bibliográficas

- ABNT. **NBR 10004: Resíduos sólidos: classificação**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- ADÁNEZ-RUBIO, I. et al. Soot and char formation in the gasification of pig manure in a drop tube reactor. **Fuel**, Elsevier, v. 281, p. 118738, 2020.
- ANDRADE, R. V. Gaseificação de biomassa: Uma análise teórica e experimental. 2007.
- ANEEL, A. Atlas de energia elétrica do brasil. **Agência Nacional de Energia, Brasília**, 2008.
- BATES, R. B. **Modeling the coupled effects of heat transfer, thermochemistry, and kinetics during biomass torrefaction**. 2012. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology.
- BATES, R. B.; GHONIEM, A. F. Biomass torrefaction: modeling of volatile and solid product evolution kinetics. **Bioresource technology**, Elsevier, v. 124, p. 460–469, 2012.
- BERGMAN, P. et al. Contributions ecn biomass to the'2nd world conference and technology exhibition on biomass for energy, industry and climate protection'. by: Publication date: ECN 1-7-2004, 2004.
- BERMANN, C. Crise ambiental e as energias renováveis. **Ciência e Cultura**, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, v. 60, n. 3, p. 20–29, 2008.
- BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. Conceitos básicos de resíduos sólidos. 1999.
- BRAZ, C. E. M. Caracterização de biomassa lignocelulósica para uso em processos térmicos de geração de energia. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014.
- CARDOSO, B. M.; NASCIMENTO, J. D. Uso da biomassa como alternativa energética. **Monografia (Curso de Engenharia Eletrica)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica**, 2012.
- CHEN, W.-H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 44, p. 847–866, 2015.
- CHEW, J. J.; DOSHI, V. Recent advances in biomass pretreatment–torrefaction fundamentals and technology. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 15, n. 8, p. 4212–4222, 2011.
- CORTEZ, C. L. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia-estudo de caso: AES Eletropaulo**. 2011. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo.
- EPE, E. D. P. E. **Balanco Energético Nacional 2018, ano base 2017**. 2018.

- FELFLI, F. E. F.; LUENGO, C. A.; SOLER, P. B. Torrefação de biomassa: Características, aplicações e perspectivas. In: SCIELO BRASIL. **Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural**. [S.l.], 2000.
- FELFLI, F. F. et al. Biomass briquetting and its perspectives in brazil. **Biomass and bioenergy**, Elsevier, v. 35, n. 1, p. 236–242, 2011.
- GALDINO, M. A. et al. O contexto das energias renováveis no brasil. **Revista da DIRENG**, p. 17–25, 2000.
- GALVÃO, L. G. O. Efeitos da acústica e da temperatura no processo de torrefação e nas propriedades energéticas da madeira de eucalyptus grandis. 2018.
- GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVAO, L. C. R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no brasil e no mundo. **Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural**, SciELO Brasil, 2006.
- GOMES, M. d. S. Produção de bio-óleo através do processo termoquímico de pirólise. **Araçatuba, SP: Fatec**, 2010.
- IEA, I. E. A. **IEA-International Energy Agency. World Energy Statistics, 2007**. 2007.
- JACINTO, J. d. M. **Análise silvicultural urbana de seis espécies florestais utilizadas na arborização de Brasília. 2001. 55p**. 2001. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade de Brasília
- LIMA, R. M. C. Avaliação da arborização urbana do plano piloto. 2009.
- LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; ARADAS, M. E. C. Geração elétrica em pequena escala a partir da gaseificação de biomassa. **Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural**, SciELO Brasil, 2004.
- MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. **CETEC. Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais**, 1980.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource technology**, Elsevier, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002.
- MIRANDA, M. R. da S.; VERAS, C. A. G.; GHESTI, G. F. Charcoal production from waste pequi seeds for heat and power generation. **Waste Management**, Elsevier, v. 103, p. 177–186, 2020.
- MOLETTA, N. R. **Caracterização e aplicação de carvão ativado produzido a partir de biomassa amilácea**. 2011. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- NETO, J. A. d. A. et al. Projeto bio-combustível: processamento de óleos e gorduras vegetais in natura e residuais em combustíveis tipo diesel. In: SCIELO BRASIL. **Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural**. [S.l.], 2000.
- NEVES, R. C. et al. Reforma de gás de gaseificação por meio de tocha de plasma: ensaios preliminares. [sn], 2013.
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. rio de janeiro. **Interciência.**, 2003.

- NOGUEIRA, M. F.; RENDEIRO, G. Caracterização energética da biomassa vegetal. **Combustão e gaseificação da biomassa sólida: soluções energéticas para a amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, p. 52–63, 2008.
- ORELLANA, A.; MACIEL, B. B. Utilização de resíduos de biomassa do distrito federal para fins energéticos. 2019.
- PACHECO, F. Energias renováveis: breves conceitos. **Conjuntura e Planejamento**, v. 149, p. 4–11, 2006.
- PENG, J. et al. Development of torrefaction kinetics for british columbia softwoods. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, De Gruyter, v. 10, n. 1, 2012.
- PEREIRA, A. I. C. **Co-digestão anaeróbia de resíduos verdes e lamas de ETAR para produção de biogás**. 2013. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- PIRES, C. M. P.; PAFFARINI, J.; CELLA, J. R. G. **Direito, Democracia e Sustentabilidade: Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Direito da Faculdade Meridional**. [S.l.]: Editora Deviant, 2017.
- PLIS, P.; WILK, R. Theoretical and experimental investigation of biomass gasification process in a fixed bed gasifier. **Energy**, Elsevier, v. 36, n. 6, p. 3838–3845, 2011.
- QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. [S.l.]: IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, 2002.
- QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, v. 89, n. 100, p. 100–106, 2005.
- RENDEIRO, G. **Combustão e gasificação de biomassa sólida**. [S.l.]: Ministério de Minas e Energia (MME), 2008.
- RODRIGO, A. et al. Caracterização granulométrica de biomassa polidispersa pelo método de peneiramento mecânico. **Engenharia Agrícola**, 2016.
- RODRIGUES, T. O. Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos. 2009.
- SANTANNA, M. S. et al. Enc-2020-0486 urban lignocellulosic waste potential as biofuel. 2020.
- SARKAR, M. et al. Gasification performance of switchgrass pretreated with torrefaction and densification. **Applied energy**, Elsevier, v. 127, p. 194–201, 2014.
- SILVA, D. P. d. **Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando ao aproveitamento energético: o caso do campus da USP na capital**. 2016. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo.
- SILVA, F. T. F. d. Avaliação da torrefação e densificação de resíduos agrícolas no brasil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.
- SILVA, G. V. F. d. Ciclo de cogeração a partir de resíduos de poda de árvores na cidade de guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014.
- SILVEIRA, E. A. et al. Coupling of an acoustic emissions system to a laboratory torrefaction reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Elsevier, v. 129, p. 29–36, 2018.
- SILVEIRA, F. G. d. O. E.; SCHLICKMANN, G. F. Avaliação da moagem e granulometria do milho e consumo de energia no processamento em moinhos de martelos. **Ciência Rural**, SciELO Brasil, v. 35, n. 1, 2005.

- SIMONS, P. **World Energy Outlook 2018 Perspectivas energéticas globais a longo prazo**. [S.l.]: IEA 2019, 2019.
- SOARES, T. S. et al. Uso da biomassa florestal na geração de energia. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 8, p. 1–9, 2006.
- SOUZA, M. M. d. **Properties of briquetts and pellets made by urban solid residues**. 2014. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- SOUZA, N. R. D. de; ALENCAR, L. S.; MAZZONETTO, A. W. Potencial energético do resíduo das podas de árvores no município de piracicaba–sp. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 31, n. 3, p. 237–245, 2016.
- STOLARSKI, M. J. et al. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. **Renewable energy**, Elsevier, v. 57, p. 20–26, 2013.
- STREZOV, V.; EVANS, T. J. **Biomass processing technologies**. [S.l.]: CRC Press, 2014.
- SVMA. **Manual de Poda**. [S.l.]: Secretaria do Verde e do Meio Ambiente do Município de São Paulo, 2005.
- TOLMASQUIM, M. T. Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. **Rio de Janeiro: EPE**, 2016.
- TUMULURU, J. S. et al. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. **Industrial Biotechnology**, Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA, v. 7, n. 5, p. 384–401, 2011.
- VALE, A. T. do; SARMENTO, T. R.; ALMEIDA, A. N. Caracterização e uso de madeiras de galhos de árvores provenientes da arborização de Brasília, df. **Ciência Florestal**, Universidade Federal de Santa Maria, v. 15, n. 4, p. 411–420, 2005.
- VIEIRA, A. Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas. Dissertação (mestrado em Energia na Agricultura), Universidade Estadual do . . . , 2012.
- VIEIRA, G. E. G. et al. Biomassa: uma visão dos processos de pirólise. **Revista Liberato, Novo Hamburgo**, v. 15, n. 24, p. 105–212, 2014.
- YARRIS, L. The evolutionary roat to biofuels. **Retrieved March**, v. 18, p. 2012, 2012.