UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

JARMISON DE ARAÚJO SILVA

ANÁLISE PARAMÉTRICA DA TRANSFORMAÇÃO TERMOQUÍMICA DE BIOMASSA VIA PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO: UMA ABORDAGEM NUMÉRICA.

RECIFE

2016

JARMISON DE ARAÚJO SILVA

ANÁLISE PARAMÉTRICA DA TRANSFORMAÇÃO TERMOQUÍMICA DE BIOMASSA VIA PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO: UMA ABORDAGEM NUMÉRICA.

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henríquez Guerrero

RECIFE
2016

Catalogação na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S586a Silva, Jarmison de Araújo.

Análise paramétrica da transformação termoquímica de Biomassa via processo de gaseificação: uma abordagem Numérica / Jarmison de Araújo Silva - 2016.

104 folhas, Il.; Abr. e Sigl.; Simb. e Tabs.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henríquez Guerrero.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

Inclui Referências e anexos.

1. Engenharia Mecânica. 2. Biomassa. 3. Gaseificação. 4. Simulação numérica. 5. Eficiência Térmica. I. Guerrero, Jorge Recarte Henríquez. (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.) BCTG/2016 – 137

26 de fevereiro de 2016.

"ANÁLISE PARAMÉTRICA DA TRANSFORMAÇÃO TERMOQUÍMICA DE BIOMASSA VIA PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO: UMA ABORDAGEM NUMÉRICA"

JARMISON DE ARAÚJO SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

_____
Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

_____
Profª Drª RENATA ANDRADE FIGUEIREDO
CO-ORIENTADORA

_____
Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
VICE-COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

_____
Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO (UFPE)

_____
Profª Drª RENATA ANDRADE FIGUEIREDO (FBV)

_____
Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA (UFPE)

_____
Profª Drª LUCIETE ALVES BEZERRA (UFPE)

Dedico este trabalho ao meu pai Antônio, minha mãe Engraça pelo carinho, afeto e pelo incentivou aos estudos no crescimento intelectual e moral como cidadão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus de ter me iluminado nas horas mais difíceis dessa jornada e de ter concluído esse trabalho de pesquisa. A meu orientador, Prof. Dr. Jorge R. Henríquez Guerrero pelo acompanhamento, orientação e amizade.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco. Ao Programa Petrobras de Formação de Recursos Humanos (PRFH), e a Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES).

“O desconhecido causa medo, inquietação, não permite avançar e percorrer novos caminhos. Investir no conhecimento e fazer a cada dia algo diferente, desconhecido e inovador é a única maneira de termos melhores resultados nos momentos de crise que permite trilhar os caminhos das oportunidades e ser feliz.”

(Victor prates)

RESUMO

No cenário atual brasileiro a energia de biomassa aparece como uma oportunidade de singular importância por colaborar com um montante de aproximadamente 25% da oferta total de energia do país. Além da biomassa tradicional, contabilizada no balanço energético nacional, existe um grande potencial nos resíduos agrícolas, industriais e urbanos para fins energéticos. No uso da biomassa para fins energéticos, em particular a produção de eletricidade, podem ser utilizadas tecnologias que envolvem combustão direta da biomassa (ciclos a vapor, por exemplo) ou tecnologias que requerem a necessidade de conversão da biomassa em combustíveis líquidos ou gasosos antes da sua combustão. Exemplos do último caso são as tecnologias que fazem uso de gaseificação, biodigestão e pirólise. A grande vantagem na conversão de biomassa em combustíveis líquidos e gasosos é o aumento da flexibilidade de uso destes combustíveis em motores de combustão interna e turbinas a gás. Os processos termoquímicos da pirólise e a gaseificação podem ser definidos como a degradação térmica de qualquer material orgânico sólido na ausência total ou parcial de um agente oxidante, ou em uma quantidade tal que a oxidação não seja completa, dando origem a compostos químicos que tem potencial energético para serem utilizados como combustíveis se assim for requerido. O presente trabalho representa um estudo numérico do processo de gaseificação considerando uma modelagem que envolve equilíbrio químico e as equações de reações principais que atuam na transformação termoquímica via gaseificação. O modelo foi validado com resultados experimentais e aplicado a um estudo paramétrico envolvendo fontes de biomassa da região nordeste do Brasil, diferentes condições de temperatura de reação, dois diferentes agentes de gaseificação e variação da fração do agente de gaseificação em relação à biomassa. Os resultados mostram, entre outras conclusões, que o aumento da temperatura do reator aumenta a fração de H_2 e CO em detrimento da formação de CH_4. Este comportamento ocorre para os dois agentes de gaseificação utilizados (vapor e ar), embora com algumas diferenças nos valores das frações dos gases produzidos. Por sua vez, o aumento na fração do vapor como agente de gaseificação causa um aumento na produção de H_2 e uma redução na produção de CO, enquanto que a produção de CH_4 sofre pouco efeito pela variação da fração de vapor utilizado. O efeito do agente de gaseificação, para uma mesma fração em relação à biomassa, indica que a gaseificação com vapor de água produz uma maior fração de H_2 e CH_4 quando comparado à gaseificação com ar e o contrário acontece em relação à produção de CO.

Palavras Chave: Biomassa, Gaseificação, Simulação numérica, Eficiência Térmica.

ABSTRACT

In the Brazilian current scenario biomass energy appears as an opportunity of singular importance for collaborating with an amount of approximately 25% of total energy supply of the country. In addition to traditional biomass, accounted for in the national energy balance, there is great potential in agricultural, industrial and municipal waste for energy purposes. In the use of biomass for energy purposes, in particular for the production of electricity, may be used technologies involving direct biomass combustion (steam cycles, for example) or technologies that require the need for conversion of biomass into liquid or gaseous fuels before its combustion. Examples of this latter case are the technologies that make use of gasification and pyrolysis digestion. The great advantage of the conversion of biomass into liquid and gas is the increased flexibility of use of these fuels in internal combustion engines and gas turbine engines. The thermochemical processes of pyrolysis and gasification can be defined as the thermal degradation of any solid organic material in the total or partial absence of an oxidizing agent, or in such an amount that oxidation is not complete, giving rise to chemical compounds that have potential energy to be used as fuels if so required. This study is a numerical study of the gasification process considering a modeling involving chemical equilibrium and the main reaction equations that work in the thermochemical conversion via gasification. The model was validated with experimental results and applied to a parametric study of sources of biomass northeast region of Brazil, different reaction temperatures, two different gasification agents and varying the fraction of the gasification agent in relation to biomass. The results show, among other findings, that the increase in reactor temperature increases the fraction of CO and H2 instead of formation of CH4. This behavior occurs for both gasification agents used (steam and air), although with some differences in the values of fractions of produced gases. In turn, the increase in the fraction of steam as gasification agent causes an increase in H2 production and a reduction in CO production while producing CH4 undergoes little effect on the variation of the vapor fraction used. The effect of the gasification agent, to the same fraction in relation to the biomass gasification indicate that the water vapor produces a larger fraction of H_2 and CH 4 when compared with air gasification and the reverse is the case for carbon monoxide production.

Keywords: Biomass gasification, Numerical simulation, Thermal Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.3 - Potência da matriz de energia elétrica brasileira.....21
Figura 2.1 - Análise termogravimétrica do bagaço da cana de açúcar.....29
Figura 3.1 - Gaseificador com extração por cima (*updraft*).....34
Figura 3.2 - Gaseificador com extração por baixo (*downdraft*).....35
Figura 3.3 - Gaseificador de fluxo cruzado (*crossdraft*).....36
Figura 3.4 - Gaseificador de leito fluidizado borbulhante.....38
Figura 3.5 - Gaseificador de leito fluidizado circulante.....39
Figura 3.6 - Reações em um gaseificador (*updraft*).....40
Figura 3.7 - Central termelétrica a gaseificação de biomassa.....43
Figura 4.1 - Fluxograma do algoritmo numérico.....46
Figura 4.2 - Esquema de um gaseificador quaisquer.....52
Figura 4.3 - Comparação da formação do hidrogênio e metano obtido da simulação e experimental da gaseificação de casca de arroz com injeção de vapor de água com V/B=1,32.....62
Figura 4.4 - Comparação da formação do hidrogênio e metano obtido da simulação e experimental de gaseificação da seringueira com injeção de ar a 727°C.....63
Figura 5.1 - Composição do gás de síntese em função da temperatura para a gaseificação de baraúna com 60% em massa de vapor.....67
Figura 5.2 - Composição do gás de síntese em função da temperatura para a gaseificação de baraúna com 100% em massa de vapor.....68
Figura 5.3 - Composição do gás de síntese em função da temperatura para a gaseificação de baraúna com 160% em massa de vapor.....68
Figura 5.4 - Equilíbrio químico na gaseificação da baraúna com 60% de vapor de água em função da temperatura.....69
Figura 5.5 - Formação de hidrogênio na gaseificação da baraúna em diferentes fração de vapor em função da temperatura.....70
Figura 5.6 - Formação de metano na gaseificação da baraúna em diferentes fração de vapor em função da temperatura.....70
Figura 5.7 - PCI do gás de síntese na gaseificação de baraúna em diferentes frações de vapor em função da temperatura.....71

Figura 5.8 - Eficiência do processo da gaseificação de baraúna em função da temperatura em diferentes fração de vapor de água.....72
Figura 5.9 - Eficiência do processo da gaseificação de baraúna em diferentes pressões em função da temperatura com 60% de vapor.....73
Figura 5.10 - Formação de hidrogênio na gaseificação do conjunto de biomassa com V/B=1,35.....74
Figura 5.11 - Formação de metano na gaseificação do conjunto de biomassa com V/B=1,35.....74
Figura 5.12 - Composição do gás de síntese da gaseificação da baraúna em função da variação de vapor de água a 800°C.....75
Figura 5.13 - Formação de H_2 e CH_4 na gaseificação de baraúna em diferentes temperaturas fixa e variando fração de vapor.....76
Figura 5.14 - Eficiência do processo da gaseificação de baraúna em função da fração de vapor a 800, 1000 e 1200°C.....77
Figura 5.15 - Poder calorifico da baraúna e do gás a 800°c e com 30% de vapor em função da umidade da biomassa.....77
Figura 5.16 - Formação do gás de síntese na gaseificação de baraúna a 800°C e 60% de vapor injetado.....78
Figura 5.17 - Formação do gás de síntese na gaseificação de baraúna a 800°C e 100% de vapor.....79
Figura 5.18 - Formação do gás de síntese na gaseificação de baraúna a 800°C e 160% de vapor.....79
Figura 5.19 - PCI do gás de síntese na gaseificação de baraúna em diferentes frações de vapor em função da pressão a 800°C.....80
Figura 5.20 - Composição do gás de síntese em função da temperatura para a gaseificação de baraúna com 20% de ar.....81
Figura 5.21 - Composição do gás de síntese em função da temperatura para a gaseificação de baraúna com 30% de ar.....81
Figura 5.22 - Formação de hidrogênio e metano na gaseificação de baraúna em função da temperatura com de ar seco e úmido.....82
Figura 5.23 - Formação de H_2 da gaseificação de baraúna em diferentes taxa de equivalência em função da temperatura.....83
Figura 5.24 - formação de CH_4 da gaseificação de baraúna em diferentes taxa de equivalência em função da temperatura.....84

Figura 5.25 - Poder calorifico do gás em diferentes taxa de equivalência em função da temperatura.....84
Figura 5.26 - Eficiência do processo da gaseificação da baraúna com taxa de equivalência de ar seco em 20% em diferentes pressões em função da temperatura.....85
Figura 5.27 - Comportamento do H_2 na gaseificação do conjunto de biomassas em função da temperatura com 25% de ar.....86
Figura 5.28 - Comportamento do CH_4 na gaseificação do conjunto de biomassas em função da temperatura com 25% de ar.....86
Figura 5.29 - Composição do gás de síntese em função do percentual de ar a 800°C na gaseificação de baraúna.....87
Figura 5.30 - Formação de metano e hidrogênio em temperatura fixa em função da taxa de equivalência.....88
Figura 5.31 - Eficiência do processo da gaseificação da baraúna a 600 e 1000°C em função da taxa de equivalência.....88
Figura 5.32 - Composição do gás de síntese com taxa de equivalência de 25% a 800°c em função da pressão.....89
Figura 5.33 - Formação do metano e hidrogênio em diferentes taxa de equivalência a 800°c em função da pressão.....90
Figura 5.34 - Poder calorifico do gás em diferentes taxa de equivalência a 800°C em função da pressão.....91
Figura 5.35 - Comparação da formação de hidrogênio e metano dos processos da gaseificação de baraúna com 20% de vapor e taxa de equivalência de 20% de ar.....92
Figura 5.36 - Comparação do poder calorífico do gás de síntese do processo da gaseificação com 20 e 30% de vapor e taxa de equivalência de ar em 20 e 30% em função da temperatura.....92
Figura 5.37 - Comparação da eficiência do processo da gaseificação de baraúna com 20, 30 e 40% de vapor e taxa de equivalência de ar em 20, 30 e 40% em função da temperatura.....93
Figura 5.38 - Comparação da eficiência dos processos da gaseificação de baraúna a 800, 1100 e 1400°C em função da taxa de oxidante.....94

Figura 5.39 - Comparação da eficiência dos processos da gaseificação de baraúna com 20, 30 e 40% de vapor e taxa de equivalência de ar a 20, 30 e 40% a 800°C em função da pressão.....95
Figura 5.40 - Comparação do poder calorifico obtido dos processos da gaseificação de baraúna com 20 e 30% de vapor e taxa de equivalência de ar em 20 e 30% a 800°c em função da pressão.....96
Figura 5.41 - Comparação da eficiência dos modelos da gaseificação de baraúna a 800°C com 20 e 30% de vapor e taxa de equivalência de 20 e 30% em função da pressão.....96
Figura 5.42 - Comparação da produção de hidrogênio entre os processos de gaseificação de baraúna a 800,1000 e 1400°C em função do oxidante.....97
Figura 5.43 - Comparação da produção de metano entre os processos de gaseificação de baraúna a 800, 1000 e 1400°c em função do oxidante.....97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Emissão de GEE de países.....19
Tabela 1.2 - Matriz de energia elétrica brasileira.....20
Tabela 2.1 - Caracterização energética de algumas biomassas vegetal.....26
Tabela 2.2 - Composição de algumas biomassa.....26
Tabela 2.3 - Gaseificação experimental de serragem de pinho com injeção de ar...30
Tabela 2.4 - Comparação do modelo e experimental da gaseificação de pinho com injeção de ar.....31
Tabela 4.1 - Biomassas da região nordeste do brasil.....47
Tabela 4.2 - Comparação do modelo e experimental de gaseificação da casca de arroz com injeção de vapor de água.....62
Tabela 4.3 - Comparação do modelo experimental de gaseificação da seringueira com injeção de ar.....63
Tabela 5.1 - Composição do gás de síntese da gaseificação do conjunto de biomassa com 25% de vapor de água a 800°C.....64
Tabela 5.2 - Composição do gás de síntese da gaseificação do conjunto de biomassa com 25% de ar injetado a 800°C.....65
Tabela 5.3 - Gaseificação do processo do conjunto de biomassa com 25% de vapor de água a 800°C.....66
Tabela 5.4 - Gaseificação do processo do conjunto de biomassas com injeção de ar em 25% a 800°C.....66

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

GEE – Gases de Efeito Estufa

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

MME – Ministério de Minas e Energia

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

Mt.CO2 – Tonelada métrica de dióxido de carbono

PCS – Poder calorífico superior

A/C – Relação de ar combustível

V/B – massa de vapor de água em relação a massa de biomassa

ER – Taxa de equivalência de ar

PCI – Poder calorífico inferior

es – Pressão parcial exercida pelo vapor de água máximo absorvido pelo ar

UR – Umidade relativa do ar

LISTA DE SÍMBOLOS

x – Moles de carbono

y – Moles de hidrogênio

z – Moles de oxigênio

w – Moles de água da biomassa

m – Moles de vapor de água injetado

A_{Ar} – Moles de ar

u – Moles de água contido no ar

$\sum$ – Somatório

N – Número de moles

$H°f$ – Entalpia de formação

ΔH – Variação de entalpia

ΔS – Variação de entropia

T_0 – Temperatura de referência (ambiente)

K – Constante de equilíbrio químico

R – Constante universal dos gases

$[H_2]$ – Concentração de hidrogênio

$[H_2O]$ – Concentração de água

$[CH_4]$ – Concentração de metano

$[CO]$ – Concentração de monóxido de carbono

$[CO_2]$ – Concentração de dióxido de carbono

a – Coeficiente correspondente ao número de moles de hidrogênio

b – Coeficiente correspondente ao número de moles de monóxido de carbono

c – Coeficiente correspondente ao número de moles de dióxido de carbono

d – Coeficiente correspondente ao número de moles de água

e – Coeficiente correspondente ao número de moles de metano

f – Coeficiente correspondente ao número de moles de nitrogênio

ΔG – Variação de Gibbs

C_p – Calor específico

M – Massa molecular

Q – Calor de reação ou entalpia de reação

$\mathcal{E}$ – Eficiência

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....18

1.1 JUSTIFICATIVA.....19

1.2 OBJETIVOS.....23

CAPÍTULO 2.....25

2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....25

CAPÍTULO 3.....32

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....32

3.1 HISTÓRICO DA GASEIFICAÇÃO.....32

3.2 TECNOLOGIA DE GASEIFICADORES.....33

3.3 PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA.....39

3.4 CENTRAL TERMELÉTRICA A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA.....42

CAPÍTULO 4.....45

4. METODOLOGIA.....45

4.1 BIOMASSAS SELECIONADAS DA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL.....47

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA.....47

4.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS.....61

CAPÍTULO 5.....64

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....64

5.1 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA COM INJEÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA.....66

5.2 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA COM INJEÇÃO DE AR.....80

5.3 COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA.....91

CAPÍTULO 6.....98

6. CONCLUSÕES 98

6.1 TRABALHOS FUTURO.....99

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....**100**

ANEXO.....**104**

ANEXO 1. ARTIGO PUBLICADO.....**104**

1. INTRODUÇÃO

A palavra energia que significa trabalho, ou energia em trânsito surgiu do grego (ergos) e do latim (energia) por volta de 1803. A energia propriamente dita é obtida pela interação entre dois sistemas em estados termodinâmicos diferentes, que ao entrarem em comunicação ocorrerá um fluxo de energia do estado de maior disponibilidade energética até entrar em equilíbrio com a vizinhança ou ambiente em que se encontra atingindo o estado morto termodinâmico, tornando incapaz de realizar trabalho.

A energia não só pode ser transferida como também armazenada no caso das baterias que possuem cargas elétricas. A energia térmica também pode ser armazenada, como exemplo, em forma de combustível ou reservatório térmico capazes de realizar trabalho.

O crescimento industrial no âmbito de suprir necessidades de uma sociedade moderna acaba elevando o nível de consumo de energia também pelo crescimento populacional levando a escassez dos recursos energéticos e tendo a necessidade de um planejamento estratégico da matriz energética, com segurança, confiabilidade e formas de energia renovável.

A geração de energia elétrica no Brasil tem 61,58% de origem hídrica que corresponde a 90303 MW distribuída no seu território. Em períodos de seca o volume de coluna de água que alimenta as turbinas hidráulicas chega a tal ponto de não suprir a demanda de energia de seus consumidores fazendo acionar as termelétricas movida a combustível de origem fóssil ou a biomassa por combustão direta, elevando seu custo de produção além de emitir gases de efeito estufa principalmente na combustão de fontes de origem fóssil (ANEEL, 2016).

O Brasil possui grande quantidade de biomassa de resíduo orgânico oriundo de atividades agroindustriais como o bagaço da cana de açúcar para a produção do álcool e açúcar, bagaço de milho, arroz entre outros e também resultantes da indústria como farelo de madeira, restos de frutas e legumes etc. com grande potencial energético que poder ser aproveitado de forma sustentável.

A biomassa é um material orgânico, fonte de energia térmica e renovável, viável para a produção de biocombustíveis e geração de energia elétrica através de método não convencional por tecnologias de gaseificação. Na gaseificação ocorre a

conversão termoquímica de um combustível líquido ou sólido em gás potencialmente energético tornando o uso mais diversificado.

1.1 JUSTIFICATIVA

A maior parte de toda energia consumida no mundo provém de fontes não renováveis agressiva ao meio ambiente através de perfuração de poços de petróleo e em sua utilização pela emissão de poluentes resultantes da combustão direta, alterando as características da atmosfera e elevando a temperatura atmosférica pela formação de gases efeito de estufa, derretimento acelerado das geleiras causando inundação em locais habitáveis e chuva ácida quando o combustível tem alta concentração de enxofre e nitrogênio em sua composição.

Essas mudanças climáticas estão diretamente e indiretamente relacionadas a gases formados como o CO_2, CH_4 CFC_s, HFC_s NO_x, N_2O entre outros. Alguns desses estão ligados a fenômeno natural do planeta (CH_4 e CO_2) e em processos químicos pelas refinarias, sistemas de refrigeração, processos industriais etc.

A Tabela 1.1 abaixo mostra uma relação de 11 países que emitem Gases de Efeito Estufa (GEE) em tonelada métrica de dióxido de carbono ($Mt.CO_2$) e tonelada de CO_2 por habitante ($t.CO_2$/hab) (EPE, 2013).

TABELA 1.1: EMISSÃO DE GEE DE PAÍSES.

País	Emissões $Mt.CO_2$	Emissões percapta $t.CO_2$/hab
China	7311	5,4
União Europeia	5987	7,3
Estados Unidos	5369	17,3
Rússia	1581	11,2
Índia	1626	1,4
Japão	1143	9
Alemanha	762	9,3
Austrália	383	17
Reino Unido	484	7,8
Coréia do Sul	563	11,5
Brasil	36	0,19

FONTE: (EPE, 2013)

Os dados apresentados na Tabela 1.1 foram calculados pela empresa de pesquisa energética (EPE). Segundo os dados, o Brasil é o país que emite menos GEE emitidos de $Mt.CO_2$ e $t.CO_2$/hab, representando apenas 0,14 e 0,19 % respectivamente, se comparado com os demais países. Esse mesmo país tem uma forte predominância na utilização de fontes fósseis em transporte, indústria e doméstico.

A oferta interna brasileira de energias não renováveis representa 60,6 % da matriz energética nacional brasileira (Petróleo e derivados 39,4 %, Gás natural 13,5 %, carvão mineral 5,7 % e urânio 1,3%) e a de fontes renováveis representa 39,4 % (biomassa da cana-de-açúcar 15,7 %, hidráulica 11,5 %, lenha e carvão vegetal 8,1 % e outras renováveis 4,1%), informações contidas no Balanço Energético Nacional com base em 2014 (BEM, 2015).

Dentre essas reservas, estão distribuídas na Tabela 1.2, a matriz de geração de energia elétrica brasileira por origem, nível, fonte energética e capacidade instalada das usinas.

TABELA 1.2: MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA.

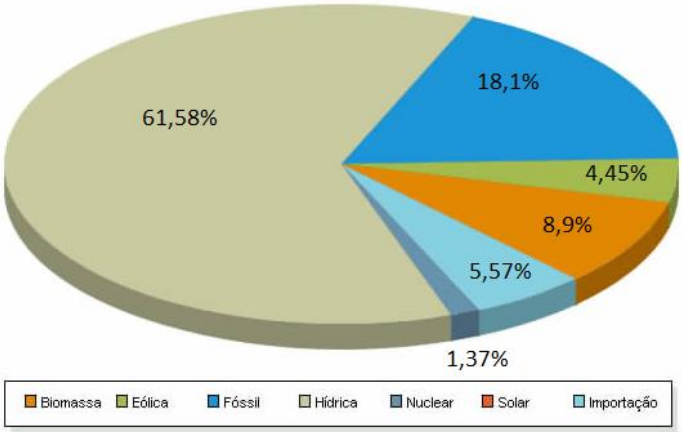
Fonte			**Capacidade instalada**		
Origem	**Fonte nível 1**	**Fonte nível 2**	**N° de usinas**	**kW**	**%**
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar	390	10.436.420	7,1187
		Biogás-AGR	2	1.722	0,0011
		Capim Elefante	3	65.700	0,0448
		Casca de Arroz	11	39.533	0,0269
	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	2	4.350	0,0029
	Floresta	Carvão Vegetal	7	51.397	0,035
		Gás de Alto Forno – Biomassa	8	109.865	0,0749
		Licor Negro	17	1.885.649	1,2862
		Resíduos de Madeira	49	381.925	0,2605
	Resíduos animais (RA)	Biogás - RA	9	1.804	0,0012
	Resíduos sólidos urbanos (RU)	Biogás - RU	11	70.873	0,0483
Eólica	Cinética do vento	Cinética do vento	268	6.537.197	4,459
Fóssil	Carvão mineral (CM)	Calor de Processo (CM)	1	24.400	0,0166
		Carvão Mineral	13	3.389.465	2,3119
		Gás de Alto Forno - CM	9	200.290	0,1366

	Gás natural	Calor de Processo – GN	1	40.000	0,0272
		Gás Natural	141	12.864.357	8,7748
	Outros Fósseis	Calor de Processo – OF	1	147.300	0,1004
	Petróleo	Gás de Refinaria	7	339.960	0,2318
		Óleo Combustível	40	4.091.353	2,7907
		Óleo Diesel	2033	4.503.092	3,0715
		Outros Energéticos de Petróleo	16	937.928	0,6397
Hídrica	Potencial hidráulico	Potencial hidráulico	1183	90.303.686	61,596
Nuclear	Urânio	Urânio	2	1.990.000	1,3573
Solar	Radiação solar	Radiação solar	26	16.236	0,011
Importação	Paraguai			5.650.000	3,8539
	Argentina			2.250.000	1,5347
	Venezuela			200.000	0,1364
	Uruguai			70.000	0,0477
TOTAL			**4250**	**146.604.502**	**100**

FONTE: (ANEEL, 2016)

Fazendo uma alocação de dados por grupo de fonte, pode-se chegar a uma representação Figura 1.3.

FIGURA 1.3: POTÊNCIA DA MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA.



FONTE: (ANEEL, 2016)

O custo de instalação de um empreendimento de geração de energia elétrica, utilizando biomassa (bagaço de cana) em ciclo Rankine é aproximadamente 101,75R$/MWh, sendo o consumo da biomassa da ordem de 1924kg/MWh, carvão de 413kg/MWh, a gás natural 287kg/MWh, petróleo 276kg/MWh e nuclear 0,02kg/MWh (CESARETTI; MOREIRA, 2010).

O custo médio de geração a partir de fonte solar fotovoltaica é de 301,79R$/MWh, que entrará em vigor em agosto de 2017 (ANEEL, 2016).

O custo de energia comercializado em leilões para empreendimento de geração de energia elétrica, calculado pela Empresa de Pesquisa de Energia (EPE), aprovada pela Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), teve edital aprovado no final de março de 2015 com um teto de 281R$/MWh, em usinas térmicas é 210R$/MWh para hidroelétrica com potência igual ou inferior a 50 MW (MME, 2015).

As biomassas tradicionais do bagaço da cana de açúcar contabilizada no balanço energético nacional, além de outras resultantes de resíduos agrícolas e industriais, representam grande potencial para fins energéticos (CORTEZ et al., 2008).

O uso dessas fontes citadas tem grande capacidade para a geração de eletricidade, embora não esteja disseminada por tecnologia de gaseificação, ultimamente tem sido objeto de estudo e aplicações tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento. No entanto, tem levado a competitividade por fontes alternativas de custo reduzido de geração de energia elétrica e com baixa emissão de poluentes.

A biomassa oferece um potencial energético que pode ser extraído por métodos não convencionais, através de processos termoquímicos para a obtenção de combustível líquido ou gasoso, através de método de decomposição térmica ou oxidação parcial como a gaseificação e pirolise.

A tecnologia de conversão torna o uso mais flexível em motores de combustão interna, turbina a gás, células combustíveis ou tecnologias que requerem a necessidade de conversão da biomassa em combustíveis líquidos ou gasosos antes da sua combustão.

Do conjunto de tecnologias mencionadas envolvendo a conversão de biomassa via pirólise e gaseificação para geração de eletricidade são menos disseminadas do estágio comercial por apresentarem menor viabilidade econômica

na atualidade quando comparadas a tecnologias de queima direta (NUSSBAUMER et al., 1998).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar a simulação numérica do processo da gaseificação de biomassa utilizando vapor de água e ar como agente oxidante na obtenção de gás de síntese e avaliar os parâmetros operacionais e termofísicos que afetam a produção e a qualidade energética do gás produzido. Serão analisadas biomassas da região do Nordeste.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir modelo matemático de decomposição térmica;
- Selecionar biomassas em estudo;
- Levantar informações de análise imediata e elementar da biomassa em estudo;
- Fazer modelagem do processo;
- Implementar algoritmo numérico em *software*;
- Validar o modelo matemático;
- Realizar estudos de análise paramétrica com o modelo;

A estrutura do trabalho está dividida em seis capítulos: o segundo capítulo consta uma revisão bibliográfica que traz definições de biomassa, seus elementos químico constituintes e dados da literatura quanto a formação do gás de síntese do processo de gaseificação.

No capítulo três encontra-se a fundamentação teórica da tecnologia de gaseificação onde são descritos cada tipo de gaseificador quanto ao seu surgimento

e aplicações em planta térmica a biomassa, além de discutir as reações químicas e o processo térmico que ocorre dentro de um reator em diferentes zonas.

O capítulo quatro apresenta a metodologia usada para implementar em software os modelos de gaseificação e a modelagem matemática desse processo em forma de algoritmo numérico resolvidos pelo programa, um modelo da reação biomassa-vapor de água e outro biomassa-ar validados entre resultado numérica e experimentais.

No capítulo cinco são apresentados os resultados e discussões da simulação dos dois modelos de gaseificação, um com vapor de água e o outro com injeção de ar na formação dos gases gerados e eficiência do processo variando alguns parâmetros como temperatura, fração de vapor, taxa de ar e pressão; e no capitulo seis consta conclusão e trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A biomassa é toda matéria orgânica resultante de plantas (bagaço de cana de açúcar, casca de arroz, pinheiro, milho, eucalipto) e animais, que diferem dos combustíveis fósseis e traz o átomo de oxigênio em sua composição química. Ela é composta basicamente de três principais componentes: 30-60% celulose, 20-35% hemicelulose (polissacarídeos) e 15-30% lignina (VELDEN et al., 2010).

Em uma análise termogravimétrico (TGA) no qual envolve variação de massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo em uma mesma temperatura de um processo exotérmico pode-se determinar diversas características: decomposição térmica de substância, pirólise, determinação de umidade, teor de voláteis, quantidade de cinzas, estudos cinéticos de reações, curva de adsorção e dessorção.

Em uma análise imediata é possível quantificar as frações em massa de umidade, de carbono fixo, voláteis e cinzas. A capacidade energética da biomassa, ou seja, o poder calorífico, pode ser determinada utilizando-se uma bomba calorimétrica. A Tabela 2.1. Apresenta os resultados da análise imediata e poder calorífico de algumas biomassas.

Onde, PCS (poder calorifico superior) é maior do que o PCI (poder calorifico inferior) porque inclui a entalpia de vaporização ou calor latente na mudança de fase da água em forma de umidade presente na amostra e também resultante do processo da combustão que podem ser obtidos através de experimento em bomba calorimétrica. A título de dimensionamento energético utiliza-se o PCI como parâmetro importante.

TABELA 2.1: CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE ALGUMAS BIOMASSAS VEGETAL.

Nome Comercial	PCS [MJ/kg]	Carbono Fixo [%]	Teor de Voláteis [%]	Teor de Cinzas [%]	Massa Especifica aparente [kg/m³]	Densidade Energética [MJ/m³]
Acapú	20,70	20,9	78,7	0,4	250	5175
Andiroba	19,76	10,1	89,9	0,0	290	5732
Angelim	17,51	15,1	70,0	14,9	280	4904
Angelim Pedra	19,84	17,2	81,6	1,3	265	5258
Angelim vermelho	20,44	20,3	79,6	0,0	250	5109
Bambu	18,98	17,8	81,3	0,9	267	5068
Breo	19,91	14,2	85,6	0,2	259	5158
Buchas trituradas de dendê	17,34	15,2	72,9	9,9	298	5168
Cacho seco de amêndoa	19,35	16,6	80,6	2,9	200	3871
Caroço de açaí	19,16	19,5	79,4	1,1	240	4598
Casca de amêndoa	22,22	20,7	77,7	1,6	220	4889
Casca de palmito	16,18	18,0	76,1	5,9	240	3883
Cascas de castanha do Pará	20,28	27,1	71,0	1,9	240	4867
Cascas de nozes	21,10	22,5	75,9	1,7	260	5485
Cedro	20,21	15,3	84,6	0,1	249	5032
Copaíba	19,91	9,1	90,9	0,1	250	4977
Cumaru	20,14	13,3	86,7	0,1	270	5438
Falso Pau-Brasil	22,01	21,4	78,4	0,2	220	4842
Fibra de coco	18,67	24,7	70,6	4,7	282	5264
Fibra de dendê	16,55	19,6	76,2	4,2	200	3310

FONTE: (RENDEIRO et al., 2008)

Por meio da caracterização da biomassa, através da análise elementar é possível identificar as frações em massa dos elementos que compõe a amostra, a Tabela 2.2 apresenta os resultados de algumas amostras de biomassa.

TABELA 2.2: COMPOSIÇÃO DE ALGUMAS BIOMASSA.

Espécie	C	H	N	S	O	Cinzas
Casca de arroz	38,24	4,40	0,80	0,06	35,50	21
Pinheiro	59	7,2	-	-	32,7	1,1
Caroço de açaí	46	6	0,8	-	46	1,2

FONTE: (RENDEIRO et al., 2008)

Onde C, H, N, S, O são os percentuais em massa de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e cinzas respectivamente.

O método termoquímico se adéqua mais a biomassa seca onde a umidade é menor que 10% (VELDEN et al., 2010). Os processos de transformação termoquímicos podem ser realizados por pirólise e gaseificação. A gaseificação é definida como a degradação térmica de um material orgânico sólido na ausência total ou parcial de um agente oxidante ou em tal quantidade que a oxidação não seja completa.

A gaseificação é caracterizada pela geração de um gás de baixo poder calorífico constituído basicamente por elementos químicos como CO_2, CO, H_2, CH_4, H_2O, N_2, C_xH_y, alcatrão e particulados que são resultantes da oxidação do combustível sólido com fornecimento de ar abaixo da condição estequiométrica.

A pirólise é um processo semelhante e ocorre em temperaturas relativamente menores priorizando a obter produtos líquidos (alcatrão, ácido pirolenhoso e bio-óleo), que pode ser utilizado como combustível ou na indústria química fina e também em menor grau de carvão vegetal e gases combustíveis (NOGUEIRA; LORA, 2003).

A formação desses gases por gaseificação citados anteriormente está relacionada ao equilíbrio químico ou dissociação conhecido pelo princípio Le Châtelier[1], “diz que se um sistema em equilíbrio for perturbado externamente, o sistema ajusta-se a minimizar a ação dessa perturbação”. Essa perturbação referência a variação na concentração, temperatura ou pressão que se distancia o sistema do estado de equilíbrio.

A vantagem da gaseificação é a permanência de cinzas e carbono residual deixando o combustível resultante limpo com ausência de partícula e não tendo a necessidade de controle de poluição, quando utilizado catalizadores a zinco ou alumínio no qual proporciona o aumento de formação de hidrogênio e monóxido de carbono e diminuição de dióxido de carbono.

As cinzas resíduo do processo da oxidação do combustível sólido é rica em elementos minerais inorgânicos que apresentam na forma de óxidos como por exemplo óxido de alumínio (Al_2O_3); Óxido férrico (Fe_2O_3); Óxido de silício (SiO_2); Óxido de potássio (K_2O); Óxido de cálcio (CaO); Óxido de magnésio (MgO); etc. (VISSOTTO et al., 2015).

[1] Henry Louis Le Châtelie (1850-1936). Químico Francês.

Esse aparato tecnológico vem como alternativa de energia renovável com aplicação em países de grande área de cultivo em climas tropicais onde a taxa de crescimento dos vegetais é alta (SILVA; ROUBOA, 2012).

A gaseificação alcança eficiência a frio de 60 a 70% e conversão de carbono de 98 a 99% (QUITETE; SOUZAB, 2014). A conversão de carbono e hidrogênio é aumentada com o tamanho de partícula decrescente de biomassa (CHANG et al., 2011). A pressão de gaseificação de 0,5 MPa e temperatura de 1600 °C com tempo de residência de 1,3 se do carvão alcança 96% de eficiência na conversão da massa (PEREIRA et al., 2012).

A transformação da biomassa sólida em gases combustíveis ocorre com o ganho de temperatura gradativa, apresentando quatro etapas: secagem (perda de umidade por evaporação), pirólise (energização da biomassa até o ponto em que a molécula é quebrada e as frações são volatizadas), gaseificação (formação de gases por dissociação) e combustão.

Essas etapas podem ser obtidas por balanças termogravimétricas podendo ser ajustada a taxa de aquecimento e medida a massa da amostra.

Na pirolise ocorre a decomposição (hemicelulose, celulose, lignina) a 250 a 300 °C, entre 350 a 450 °C produz alcatrão e ácidos leves podem ser condensáveis resultando em alcatrão e ácidos ou não condenáveis (CO, CO_2, H_2, CH_4, O_2) e carvão vegetal (RENDEIRO et al., 2008). A volatizarão do carvão acontece ente 200-400°C e a maior taxa de decomposição é entre 380-900°C (AKINWALE et al., 2012).

A diminuição da massa de farelo de arroz e palha de arroz é de 22,08% e 29,73% respectivamente em temperaturas entre 200-400°C (XU; CHEN, 2013). A análise termoquímica para resíduo de madeira de eucalipto, pirolisa em temperatura 470-650 °C, gaseifica na gama 600-750°C e entra em combustão em um patamar de 650-830°C com granulometria menos de 6 cm (MARTÍNEZ et al., 2011).

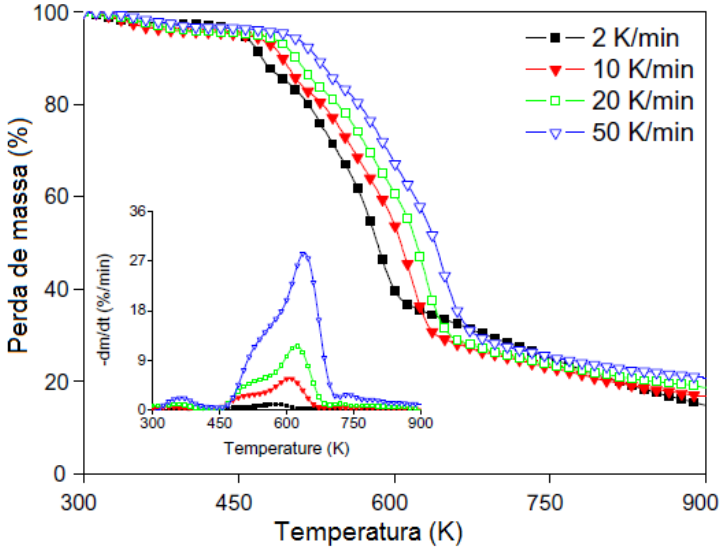
A pirólise é considerada único e independente da ordem de reações, paralelas e usado amplamente para determinar à cinética e parâmetros de decomposição térmica (MA et al., 2012).

A decomposição térmica em uma atmosfera de ar em quantidade abaixo da condição ideal de combustão, ou seja, em taxa de equivalência (ar/combustível) menor que 0,15 é insuficiente para um processo de gaseificação ocorrendo praticamente pirólise e consequentemente o carbono não é convertido em gases,

valores crescentes entre 0,15 a 0,30 beneficiam a gaseificação aumenta a eficiência na conversão do carbono em gás (RENDEIRO et al., 2008).

A degradação térmica do bagaço da cana de açúcar na presença de uma atmosfera de azoto usando uma termogravimétrica não isotérmica em diferentes taxas de aquecimento começa a degradar-se a 473K, perda de massa associada a pirólise hemicelulose no intervalo de 538-543K e taxa de perda de massa do resíduo final foi de 19-26% a afetado pela taxa de aquecimento mostrado na Figura 2.1 (OUNAS et al., 2011).

FIGURA 2.1: ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR.



FONTE: (OUNAS et al., 2011)

A taxa de equivalência (ER) da relação da fração da massa de ar pelo combustível (A/C) de uma reação real por (A/C) estequiométrico influencia no desempenho da gaseificação de biomassa, ER situa entre 0,2 e 0,3 ou seja de 20 a 30% de ar fornecido, abaixo de 20% resulta em uma gaseificação incompleta com formação de carvão excessivo e baixo poder calorífico dos gases gerados, e que de outra forma com ER maior que 40% forma produtos da combustão completa (PRABIR, 2010).

A utilização do ar no processo promove uma resposta mais rápida para atingir e controle na temperatura desejada de operação, que acelera a reação de

gaseificação em menos tempo principalmente quando usa oxigênio puro não havendo a preocupação de fusão das cinzas em temperatura no intervalo de 1300-1400°C (YUN et al., 2012).

Geralmente, o gás produto da gaseificação de biomassa com ar geralmente tem um baixo poder calorífico em torno de 4-7MJ/Nm³, se for utilizado oxigênio puro esse montante energético aumenta em 10-18MJ/Nm³, entretanto o processo torna desvantajoso por ter elevado custo de produção de oxigênio (JARUNGTHAMMACHOTE; DUTTA, 2008).

Condições de gaseificação de biomassa que contribuem na produção de hidrogênio é em temperatura entre 649,85 e 799,85°C, pressões entre 17,5 e 30MPa e tempo de residência de 9 a 46s (Yildiz, 2012). O grau de conversão em massa da folha de palma utilizando taxa de aquecimento de 20°C/min é de 10% em temperatura acima de 250°C, e 70% para semente da mesma biomassa (SAIT et al., 2012).

Dados experimentais da gaseificação de serragem de pinho e com taxa de equivalência de ar (ER = 0,22) a 610°C, cujo biomassa possui teor de umidade de 8,61% e percentual em massa de C, H e O são 49%, 7,65% e 42,19% respectivamente obteve percentual dos seguintes gases na tabela abaixo representando uma eficiência na conversão do carbono 41,61% (GUO et al., 2008).

TABELA 2.3: GASEIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE SERRAGEM DE PINHO COM INJEÇÃO DE AR.

CO_2	CO	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_6	C_3H_8	Unidade
12,41	16,01	4,32	1,38	0,487	0,021	0,005	0,284	% molar

FONTE: (GUO et al., 2008)

Experimento da gaseificação da casca de arroz com vapor de água realizado em reator (50 mm diâmetro interno e 1200 mm comprimento) em leito fluidizado de areia, cujo tamanho do grão varia de 0,3-0,5mm.

A biomassa utilizada tem sua composição percentual em massa de C, H, O, N, S e umidade de 49,07, 3,79, 46,42, 0,63, 0,09 e 9,95%, realizada com uma relação de vapor por massa de biomassa de 1,32 a temperatura de 690°C; os gases formados no processo foram medidos em percentual volumétrico do H_2, CO, CO_2 e CH_4 em 50, 50, 14,30, 26,60 e 8,60% (LOHA; CHATTERJEE; CHATTOPADHYAY, 2010).

A gaseificação com resíduo de eucalipto com taxa de equivalência de ar a 40% e fluxo de 20,69kg/h e biomassa de 8,56kg/h a temperatura de 571°C obtém eficiência de 60,95% (MARTÍNEZ et al., 2011).

A simulação tem capacidade de prever os elementos do gás de síntese obtido de resultados experimentais da gaseificação de pinho com injeção baseado em equilíbrio químico como mostra a comparação dos gases na Tabela 2.4

TABELA 2.4: COMPARAÇÃO DO MODELO E EXPERIMENTAL DA GASEIFICAÇÃO DE PINHO COM INJEÇÃO DE AR.

kmol de unidade por kmol de biomassa	kmol de ar por kmol de biomassa	Composição do gás (mol% base seca)			
			Modelo desenvolvido	(Jayah et al., 2003)	(JARUNGTHAMMACHOTE ; DUTTA, 2008).
Biomass 16%	0.4472	H_2	16.48	17.00	16.81
		CO	17.53	18.40	17.86
		CH_4	1.15	1.30	1.05
		CO_2	11.90	10.60	12.20
		N_2	52.94	52.70	52.18

FONTE: (SILVA; ROUBOA, 2012).

Experimento de gaseificação realizado em reator de leito fluidizado (500mm de altura e 50mm de diâmetro interno) utilizando palha de milho em partículas variando de 0,83 a 1,65 mm e areia industrial como material de leito, cujo granulometria no intervalo de 0,35 a 0,5 mm, injeção de concentração de oxigênio em 40% e taxa de alimentação da biomassa de 1,2kg/h;

Um forno elétrico disponibiliza 2,5kW para o aquecimento do processo a uma temperatura de reação de 700°C, obteve os gases H_2, CO, CH_4, CO_2, C_2H_4, C_2H_6 tem percentual em volume de 8,03, 33,20, 11,43, 35,33, 9,90 e 2,08%.

Mudando a temperatura nas condições de operação anterior para 800°C, e trocando o oxigênio por vapor de água a uma taxa de 1,86kg/h, os gases gerados são H_2, CO, CH_4, CO_2, C_2H_4, C_2H_6 tem percentual em volume de 17,90, 38,52, 14,91, 20,54, 6,94 e 1,21% (SUN et al., 2013).

CAPÍTULO 3

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 HISTÓRICO DA GASEIFICAÇÃO

Os nossos antecedentes utilizavam a lenha como fonte de energia térmica para cozinhar seus alimentos e aquecer ambientes. Com o impulso da revolução industrial na Inglaterra em meados do século XVIII houve uma crescente demanda de carvão na indústria metalúrgica para a produção de ferro realizado em forno de alvenaria, e logo em seguida o carvão vegetal foi substituído pelo coque (de origem mineral).

Gás combustível se tornou um produto comercial na iluminação das cidades, uso doméstico e para a indústria química produzido a partir do coque em processo de pirolise com poder calorífico entre 20-23MJ/m³ e mistura de vapor de água com coque obtendo poder energético aproximadamente 12MJ/m³ (HIGMAN, 2008).

A produção de gás combustível a partir de combustível sólido carbonoso, por processo de gaseificação é um desafio milenar. A técnica é feita pela decomposição térmica por oxidação total ou parcial da biomassa em gaseificador utilizando ar, vapor de água ou mistura de água enriquecido de ar resultante em gases de síntese com baixo poder calorífico.

Esse método ganhou destaque por reduzir a emissão de poluente na combustão direta dos gases gerados por gaseificação ou pirolise em comparado com a combustão da própria biomassa, alcançando boa eficiência além de ter maior flexibilidade em uso em motor de combustão interna, indústria química, e turbina a gás na produção de eletricidade etc.

Utilização desses gases da gaseificação em turbina a gás tem a capacidade de geração de eletricidade na ordem de 100 a 300 MW (HIGMAN, 2008).

3.2 TECNOLOGIA DE GASEIFICADORES

Como a gaseificação é realizada em reatores ou gaseificadores eles podem ser classificados por: quanto ao fornecimento de calor ao reator pode ser de fonte interna (parte da biomassa é queimada dentro do mesmo) ou externa (o calor é introduzido por um trocador de calor), quanto à pressão, pressurizado (pressão interna muito acima da pressão atmosférica) ou atmosférico (pressão interna um pouco abaixo da pressão atmosférica).

Pode ser também classificado quanto ao oxidante na reação química usando ar, oxigênio ou vapor de água; quanto ao arranjo do reator podendo ser de leito fixo (a biomassa fica apoiada numa grelha), leito fluidizado (a biomassa fica em suspensão) e reagente pré-misturado (injetado no reator a mistura biomassa e oxidante).

3.2.1 GASEIFICADORES DE LEITO FIXO

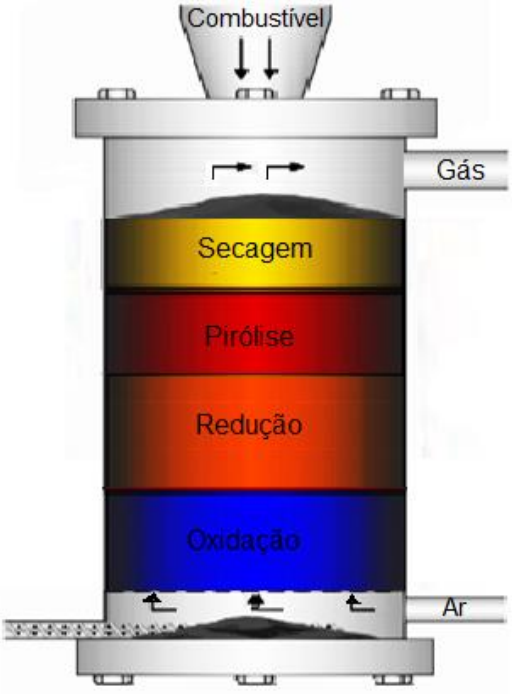
Nesta seção são apresentadas algumas configurações de gaseificador de leito fixo. Nesse tipo a biomassa repousa sobre uma grelha formando um leito poroso fixo.

Esse gaseificador pode ser subdividido em quatro tipos relacionado a forma de como é extraído os gases do reator, podendo ser extraído por cima (*updraft*), extração por baixo (*downdraft*) e extração transversal radial (*cross draft*).

3.2.2 GASEIFICADOR COM EXTRAÇÃO POR CIMA (*UPDRAFT*)

A biomassa é abastecida no topo do reator passando por diferentes reações e processos térmicos e apoiado sobre uma grelha, as cinzas resultantes da decomposição térmica sai da biomassa e cai no cinzeiro por ter partículas com diâmetro menor do que o orifício da grela como mostra a Figura 3.1.

FIGURA 3.1: GASEIFICADOR COM EXTRAÇÃO POR CIMA (*UPDRAFT*).



FONTE: (RENDEIRO et al., 2008)

O ar é forçadamente a entrar no sentido ascendente arrastando as cinzas para fora e atravessando a grelha chagando na biomassa, o oxigênio do ar reage com a superfície do carvão e começa a entrar em combustão de forma incandescente liberando calor e CO, H_2O e CO_2. Esses gases a 950°C e reage com o carbono da biomassa na zona de gaseificação resultando em gases não condensáveis.

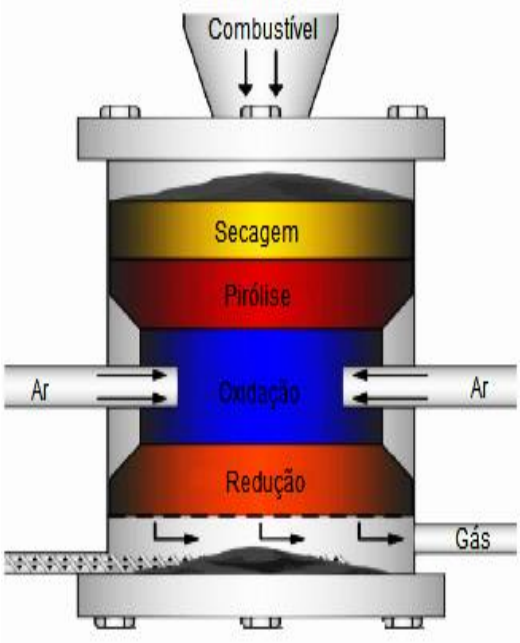
Esses gases formado na gaseificação cruza a região da biomassa seca aumentando sua temperatura e começa a liberar voláteis (temperatura acima do limite de pirolise) e alcatrão a baixa temperatura de 250°C passa pela biomassa úmida retirando sua umidade e provocando a secagem.

Essa configuração apresenta: alto consumo de biomassa por área do reator, percentual de umidade da biomassa menor que 60%, baixa temperatura dos gases na saída, pode operar com granulometria bastante pequena e grande teor de alcatrão (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, aminas aromáticas e compostos inorgânicos) e voláteis dos gases produzidos. Essa tecnologia tem pequena produção e capacidade de potência até 1MW.

3.2.3 GASEIFICADOR COM EXTRAÇÃO POR BAIXO (*DOWNDRAFT*)

O suprimento de biomassa é inserido por cima com injeção de ar em uma região radial central e os gases formados tem sentido descendente onde são extraídos na parte inferior representado na Figura 3.2.

FIGURA 3.2: GASEIFICADOR COM EXTRAÇÃO POR BAIXO (*DOWNDRAFT*).



FONTE: (YUN et al., 2012).

O encontro do ar com a biomassa reage formando uma zona incandescente, abaixo da condição estequiométrica liberando calor e se propagando por condução tanto para cima quanto para baixo da região de oxidação.

O calor produzido na zona de oxidação atravessa a biomassa seca fazendo pirolisar e emitir voláteis e alcatrão, esses voláteis são forçados a escoar para baixo e entra em combustão quando misturado com o ar na região de oxidação.

O alcatrão é craqueado ao passar em uma zona de alta temperatura (quanto maior, melhor) que não reage com o oxigênio. A região de redução ou oxidação, forma gás de síntese e cinzas. Temperatura de gaseificação chega entre 1200 a 1400°C (PRABIR, 2010).

Essa configuração produz baixo teor de alcatrão menos do que 100mg/Nm³, reduz o sistema de limpeza de gás por ciclones, temperaturas elevadas e máxima potência desse gaseificador chega a 500kW.

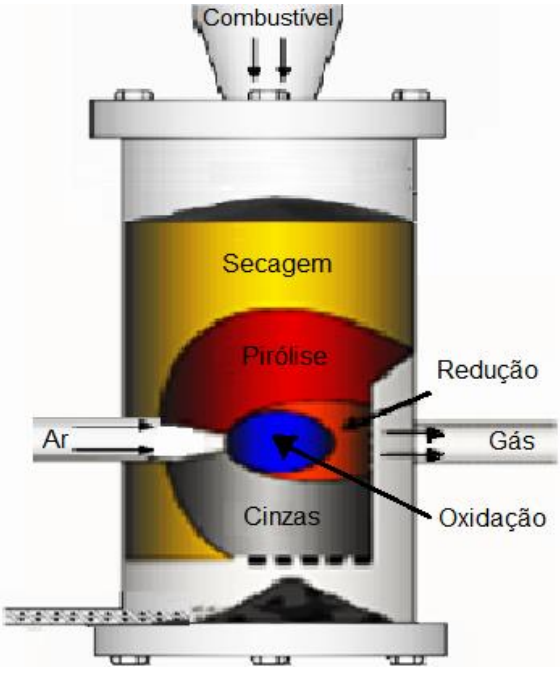
A eficiência é limitada pela seção transversal dificultando a chagada de ar criando zonas frias por onde o alcatrão é destruído. Umidade da biomassa menor que 25% e com granulometria não muito pequena (4-10cm) para não ocorrer o bloqueio dos gases.

3.2.4 GASEIFICADOR DE FLUXO CRUZADO (*CROSSDRAFT*)

O suprimento da biomassa ocorre no topo do gaseificador um processo similar aos gaseificadores do tipo contracorrente e concorrente. O ar é injetado em uma região radial central e a uma região oposta a ela é extraído o gás de síntese a temperatura acima de 1000°C como mostra a Figura 3.3.

Esse gaseificador obtém um gás com baixo poder calorífico e com grande quantidade de voláteis não havendo tempo para craquear o alcatrão, e tem baixa quantidade de cinzas onde são retiradas na parte inferior que cai sob a grelha com capacidade de gaseificação de até 5kW em pequena central térmica.

FIGURA 3.3: GASEIFICADOR DE FLUXO CRUZADO (*CROSSDRAFT*).



FONTE: (RENDEIRO et al., 2008)

3.2.2 GASEIFICADOR DE LEITO FLUIDIZADO

Essa tecnologia foi desenvolvida por Fritz Winkler em 1921. Tem capacidade de conversão de biomassa maior em relação a gaseificador de leito fixo, na ordem de 20t/h.

É caracterizado por um conjunto de partículas solidas em suspensão provocada pela injeção de um gás (ar ou vapor de água), promovendo contato e circulação entre as partículas favorecendo as reações que envolvem o processo, possibilitando uniformidade da temperatura do leito e maior tempo de residência. Pode utilizar material inerte com granulometria média de 250μm para aumentar a taxa de reação e eficiência do processo.

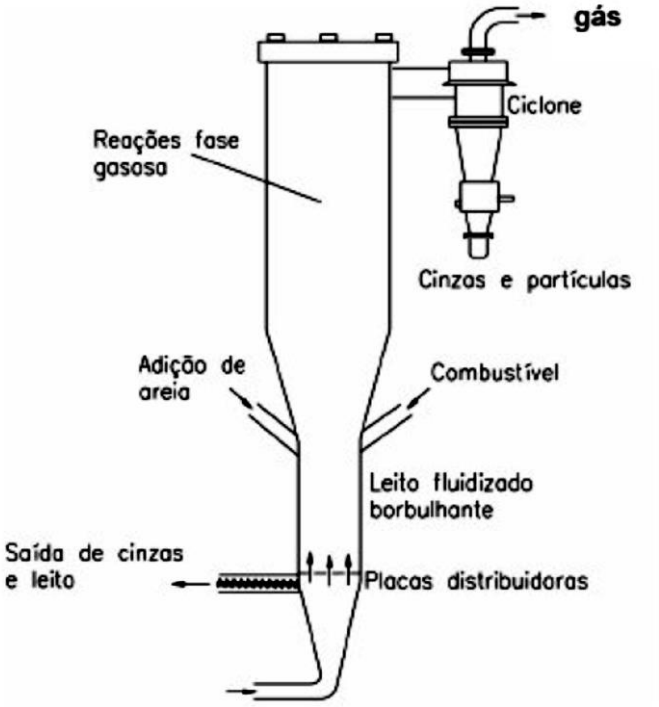
3.2.2.1 GASEIFICADOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

A biomassa e o tipo do leito que no caso é areia ambos injetados acima de uma placa de orifício que passa através dela um gás oxidante que arrastão as partículas para promover o contato desenvolver as reações de gaseificação e promovendo uma temperatura uniforme ao longo do leito, o gás é separado das partículas através de ciclone, uma vez que as partículas são arrastadas do processo não voltam para o leito.

Essas partículas arrastadas pelo processo alcançam velocidades entre 0,5-1,0m/s operando em temperatura entre 700-900°C e controlada pela variação da relação ar/combustível injetado no reator exemplificado na Figura 3.4.

Nessa configuração o gás resultante da reação de gaseificação é extraído no topo do ciclone onde faz a separação das partículas sólidas, esse equipamento tem eficiência menor do que o gaseificador de leito fluidizado circulante e maior em relação ao gaseificador de leito fixo.

FIGURA 3.4: GASEIFICADOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE.



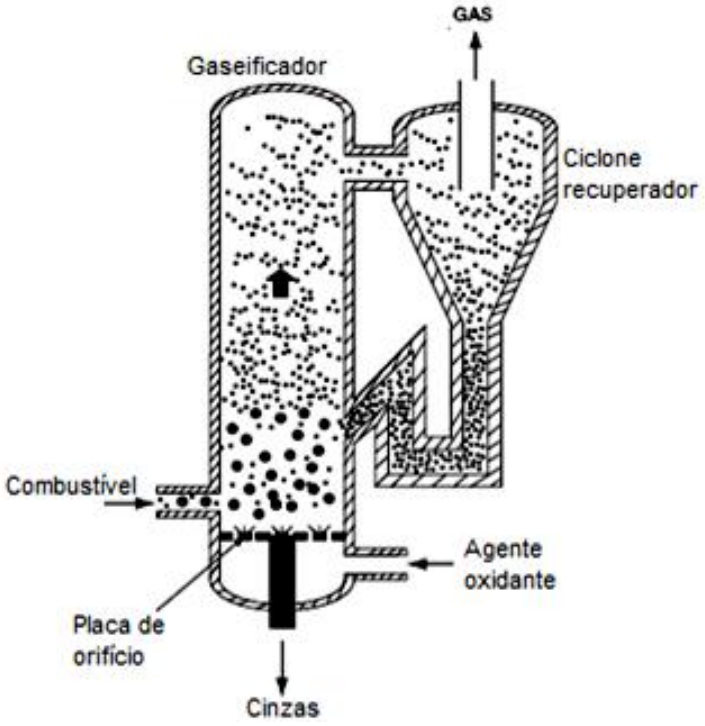
FONTE: (PRABIR, 2010)

3.2.2.2 GASEIFICADOR DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

A biomassa triturada é inserida na parte radial superior a uma placa de orifício e que passa através dela um agente oxidante que arrasta as partículas de biomassa tornando um leito suspenso em que desenvolve as reações intrínseca do processo de gaseificação e o gás é separado das partículas através de ciclone e as partículas voltam para o leito como mostra a Figura 3.5.

As velocidades das partículas chegam entre 3,5-5,5m/s realizada em temperaturas abaixo de 980°C para evitar fusão de cinzas, pressão elevada mantida por volta de 10 bar, diâmetro da biomassa menor que 10mm e alcança potência de até 25MW (PRABIR, 2010).

FIGURA 3.5: GASEIFICADOR DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE.



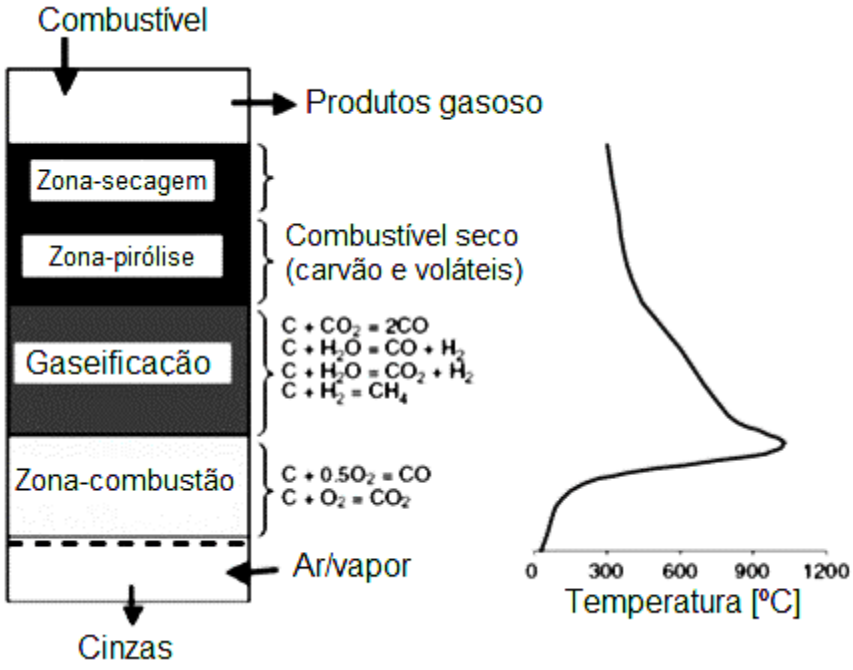
FONTE: (HIGMAN, 2008).

3.3 PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

Para explicar o processo de gaseificação do ponto de vista termoquímico, será utilizado o princípio de funcionamento de um gaseificador clássico tipo leito fixo e extração superior, onde a biomassa é abastecida no topo do reator passando por diferentes reações e processos térmicos, conforme mostrado na Figura 3.6.

Na zona de secagem ocorre a perda de umidade da biomassa em função da troca térmica entre está e os produtos gasosos. Na zona de pirolise ocorre a energização da biomassa e suas moléculas são volatizadas formando coque e alcatrão. Na zona de gaseificação ocorre uma série de reações elementares formando o gás de síntese (CO, CO2, H2, CH4, H2O, N2). Finalmente na zona de combustão o carbono residual oxida na presença de ar e fornece produtos da combustão quentes que participarão nas zonas supracitadas de processo de transferência de calor de transferência de massa ao longo de todo o gaseificador.

FIGURA 3.6: REAÇÕES EM UM GASEIFICADOR (UPDRAFT).



FONTE: (PRABIR, 2010)

O ar a temperatura ambiente é forçadamente a entrar no gaseificador, ocasionando a combustão em uma camada limite inferior do leito poroso, e a biomassa fica de forma incandescente liberando calor, CO, CO_2 e H_2O, as cinzas resultantes da combustão sai da biomassa e cai no cinzeiro.

Entre a zona de combustão e início da gaseificação obtém a máxima temperatura, que no qual vai diminuído à medida que caminha ao longo do leito poroso no sentido ascendente do gaseificador como mostra a Figura 3.6.

Quando uma biomassa é aquecida na presença de oxigênio, ar ou vapor de água sua matéria começa a se decompor ou pirolisar em carbono sólido e gases condensáveis ou não.

Essa decomposição está relacionada com a reatividade do carbono e o meio, o oxigênio é mais ativo seguido por vapor de água e dióxido de carbono. Quando um kmol de carbono entra em combustão ou oxida completamente na presença do ar ou oxigênio pré-aquecido reage produzindo calor e dióxido de carbono.

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \qquad \Delta H = -393{,}770 \ \ MJ/kmol \tag{3.1}$$

Essa é uma característica de reação exotérmica, ou seja, sua camada está acima da temperatura de ignição provocando a combustão e liberando energia em forma de calor. Essa reação ocorre muito rápida consumindo todo o oxigênio disponível, à medida que a reação se propaga acima do leito essa quantidade de oxigênio vai ficando escasso tornando uma oxidação parcial liberando CO e calor.

$$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO \qquad \Delta H = -111 \ MJ/kmol \tag{3.2}$$

A energia liberada pela oxidação parcial reduz em até 72% com relação a combustão completa (PRABIR, 2010). A mistura de CO_2 e CO, gás quente produzido na combustão passam para a zona de gaseificação em temperatura por volta de 100°C

A quantidade de oxigênio foi restringida no consumo da combustão e a concentração de dióxido de carbono reage com o carvão vegetal obtendo uma reação heterogênea de equilíbrio explicada por Boudouard abaixo.

$$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO \qquad \Delta H = +170{,}700 \ MJ/kmol \tag{3.3}$$

Em baixa temperatura favorece a formação de dióxido de carbono, o recíproco beneficia a produção de monóxido de carbono. O hidrogênio presente na biomassa reage com oxigênio formando água e liberando calor.

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow H_2O \qquad \Delta H = -242 \ MJ/kmol \tag{3.4}$$

Um carbono sólido reage com hidrogênio formando metano e liberando energia.

$$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 \qquad \Delta H = -74{,}7 \ MJ/kmol \tag{3.5}$$

A umidade em forma de vapor presente na biomassa reage endotermicamente com um carbono formando monóxido de carbono e hidrogênio.

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 \qquad +131{,}000 \ MJ/kmol \tag{3.6}$$

Essa mesma quantidade molar de carbono realizada por gaseificação tem recuperação de energia de 75 a 88% oriundo da presença de hidrogênio e outros hidrocarbonetos resultando em uma reação endotérmica (absorve de energia) para produzir hidrogénio e dióxido de carbono chamado gás de síntese (PRABIR, 2010).

A formação desse gás de síntese obedece ao princípio do equilíbrio químico na zona de gaseificação com a seguinte composição: CO de 15-20%; H2 de 15-20%; CH4 de 2-6%; CO2 de 7-10% e N2 de 40-50% (YUN et al., 2012).

3.4 CENTRAL TERMELÉTRICA A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

A tecnologia de gaseificação pode ser emprega na produção de energia elétrica utilização em centrais termoelétricas de ciclos combinados conforme será apresentado a seguir neste exemplo de aplicação.

A central termelétrica exemplificada aqui mostra três sistemas acoplados, um sistema de gaseificação de biomassa que produz gás combustível e dois que produz energia elétrica, um deles é através de uma turbina a gás e outro por um ciclo Rankine.

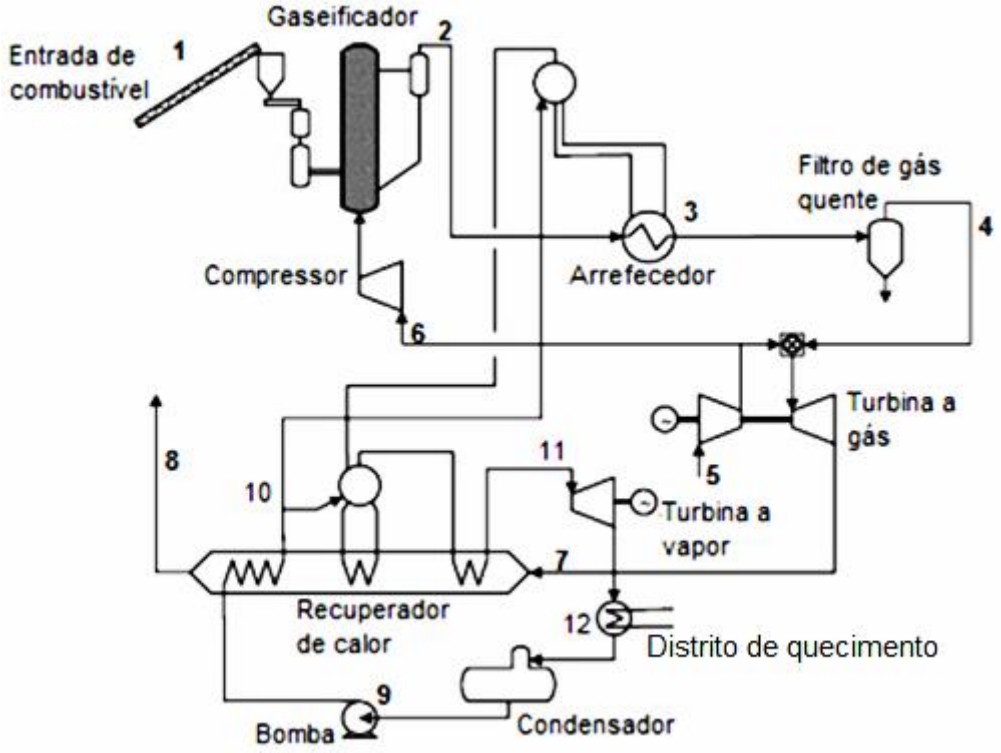
A biomassa é alimentada através de um canal composta de rosca sem-fim para dentro do gaseificador no ponto 1 com injeção de um agente oxidante no ponto 6 através de um compressor mostrado na Figura 3.7.

O gás de síntese resultante da gaseificação é separado das partículas solidas através de um ciclone que saem no ponto 2 onde perde calor no ponto 3 para diminuir

sua temperatura e logo em seguida passa em um filtro para tirar as impurezas que o ciclone não conseguiu retirar obtendo o gás combustível pronto para uso.

O ar entra na turbina a gás no ponto 5 e o gás de síntese entra na câmara de combustão produzindo energia elétrica, os gases de exaustão saem em alta temperatura passando logo em seguida em um recuperado de calor gerando um ponto de aquecimento potencialmente energético.

FIGURA 3.7: CENTRAL TERMELÉTRICA A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA.



FONTE: (HIGMAN, 2008).

A água no ponto 9 é bombeada para trocar calor no recuperador de calor sofrendo um pré-aquecimento ganhando temperatura e em seguida passa no ponto 3 de aquecimento, e volta novamente para a caldeira que sai em alta temperatura alimentando uma turbina a vapor no ponto 11 onde gera energia elétrica; como o vapor de água que sai da turbina está em ciclo Rankine, esse vapor perde calor para mudar para a fase liquida e ser bombeada novamente, a perda de calor é realizada através de um condensador, ou em distrito de aquecimento para outros processos.

Desvantagens e limitações importantes que a biomassa possui como insumo na alimentação desse tipo de sistema é a densidade de energia ser menor que a do petróleo bruto, difícil de manusear sólido, transporta-la a longas distância torna economicamente inviável, necessita de grandes áreas a cultivá-lo.

Na Europa produz de 15-20(t/ha)/ano, se considerar que 1000t/ano gera 150-300kW, então 100km² é susceptível a uma potência no patamar de 30 a 40kW, por outro lado há grandes quantidade de resíduo de biomassa resultante de atividades econômicas como a silvicultura, fabricação de papel e açúcar-de-refino (HIGMAN, 2008).

O custo de instalação de uma unidade de gaseificação tem elevado custo em torno de 10-200 milhões de US$, esse montante pode ser minimizado reduzindo o tamanho do reator e consequentemente o tempo de residência de 5 segundo e pressão limitada a 45 bar pelo processo da gaseificação, essa pressão é determinada de acordo com a turbina a gás a ser utilizada que pode variar de 22-28bar (YUN et al., 2012).

CAPÍTULO 4

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente projeto de dissertação foram construídos modelos matemáticos do processo de gaseificação envolvendo equações que correspondem as reações fundamentais envolvidas e o uso de equilíbrio químico com objetivo de prever a composição do gás.

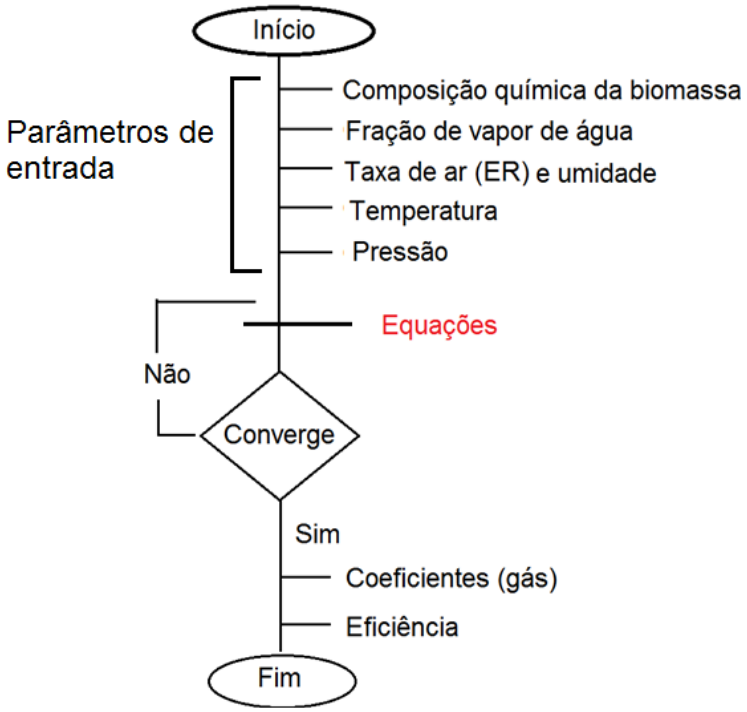
Foram modelados dois casos; um envolvendo a reação da biomassa com injeção de vapor de água como agente da gaseificação, ambos aquecidos e outro envolvendo biomassa com injeção de ar como agente oxidante, também aquecidos. No último caso a quantidade de ar fornecida é menor que a condição estequiométrica já que se trata da oxidação parcial.

Foi considerado que o processo da gaseificação estivesse em regime permanente e alcançado o estado de equilíbrio químico para a formação do gás de síntese baseado na equação genérica da reação biomassa com agente oxidante e nas equações de dissociação que descrevem o equilíbrio químico.

Os modelos foram resolvidos numericamente através da construção de um algoritmo implementado no *software Engineering Equation Solver* (EES), onde consta uma biblioteca das propriedades termofísicas e termodinâmica dos elementos químicos que fazem parte das reações.

Alguns parâmetros de entrada no algoritmo consistem em informações dos elementos químicos da biomassa como os números de moles de carbono, hidrogênio, oxigênio e umidade representados por *x, y, z e w* respectivamente, e alguns parâmetros como a temperatura, pressão, fração de vapor de água, taxa de injeção de ar e umidade representados por *T, P, V/B, ER e UR* representado na Figura 4.1.

FIGURA 4.1: FLUXOGRAMA DO ALGORITMO NUMÉRICO.



A partir desses parâmetros estabelecidos e substituições simultâneas das propriedades termofísicas e termodinâmica é possível determinar as funções de Gibbs que são imprescindíveis na determinação das constantes do equilíbrio químico suficiente para tornar o sistema de equações consistente e convergir para a resolução do problema como os valores dos coeficientes que correspondem a cada composto que formam o gás de síntese resultante da gaseificação e a partir disso é possível determinar a eficiência do processo.

Os modelos numéricos da gaseificação foram validados comparando resultados obtidos da simulação com dados experimentais encontrados na literatura referente a formação dos gases oriundos do processo de decomposição térmica para posteriormente fazer uma análise de diferentes tipos de biomassa da simulação de gasificação que desrespeita a composição do gás de síntese e eficiência energética.

4.1 BIOMASSAS SELECIONADAS DA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

Após calibrar os modelos matemáticos, foram selecionadas seis diferentes biomassas de origem vegetal e nativas da região nordeste do Brasil encontrada na literatura. A análise elementar desses combustíveis sólidos tem percentuais em massa de carbono, hidrogênio, oxigênio, umidade e cinzas apresentados na Tabela 4.1.

TABELA 4.1: BIOMASSAS DA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL. (% massa)

Amostra	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Umidade	Cinzas
Baraúna	37,80	3,71	45,47	11,07	1,95
Burra leiteira	36,81	6,35	43,23	11,12	2,49
Catingueira	38,62	6,28	41,73	11,05	2,31
Jurema Preta	42,63	6,18	39,10	11,05	1,04
Maniçoba	35,97	5,94	43,24	10,76	4,08
Umbuzeiro	39,75	6,57	41,60	10,34	1,74

FONTE: (FIGUEIREDO et al., 2014)

Os dados apresentados na tabela acima são obtidos através da análise imediata, que quantifica por pré-aquecimento em estufa e pesagem da amostra, o quanto tem em massa de umidade, voláteis, cinzas e consequentemente os percentuais em massa dos elementos de carbono, hidrogênio e oxigênio.

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

4.2.1 GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA COM INJEÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA

O processo de conversão termoquímica da gaseificação de biomassa com injeção de vapor de água está regido por uma equação genérica (4.1), tendo como

resultado dessa reação os elementos apresentados do lado direito da equação com seus coeficientes correspondentes de gases formados.

$$\left[C_x H_y O_z + wH_2O\right]_{Biomassa} + \left[mH_2O\right]_{Vapor} \rightarrow aH_2 + bCO + cCO_2 + dH_2O + eCH_4 \quad (4.1)$$

Nesta equação os coeficientes *x, y e z* representam o número de mol associados a quantidade de carbono, hidrogênio e oxigênio respectivamente presente na biomassa obtidos a partir de uma análise elementar.

O coeficiente *w* corresponde ao número de moles associado ao teor de umidade da amostra de biomassa enquanto que *m* corresponde ao coeficiente molar de vapor de água injetado ao processo de gaseificação.

Os coeficientes *a, b, c, d e* representam as quantidades molares dos produtos que formam o gás de síntese resultantes da gaseificação que é encontrado pelo modelo numérico.

Para a determinação das equações algébricas que permitam encontrar os coeficientes *a, b, c, d* e *e* foi necessário utilizar um balanço das espécies químicas; do carbono na Equação (4.2), do hidrogênio (4.3) e também do oxigênio (4.4).

$$b + c + e = x \quad (4.2)$$

$$2a + 2d + 4e = y + 2w + 2m \quad (4.3)$$

$$b + 2c + d = z + w + m \quad (4.4)$$

Uma vez fornecido os valores de entrada do algoritmo das variáveis *x, y, z, w, m*, e feito o balanço das espécies químicas ainda não é possível determinar os valores dos coeficientes *a, b, c, d* e *e* com a apenas cinco variáveis e três equações do balanço das espécies químicas.

Para tornar o sistema de equações consistente é necessário agregar mais duas equações vinda das reações de dissociação. As equações de dissociação importante no processo da gaseificação são representadas pelas equações (4.7) e (4.8).

$$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO \qquad \Delta H = +170{,}700 \ \ MJ/kmol \tag{4.5}$$

$$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 \qquad \Delta H + 131{,}000 \ \ MJ/kmol \tag{4.6}$$

$$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 \qquad \Delta H = -74{,}7 \ \ MJ/kmol \tag{4.7}$$

As reações (4.5) e (4.6) podem ser combinadas e representadas através de uma única equação global indicada pela equação (4.8).

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 \qquad \Delta H = -41{,}2 \ \ MJ/kmol \tag{4.8}$$

As reações de dissociação podem ocorrer em ambas as direções (da esquerda para a direita ou vice-versa), para efeito de cálculo da constante de equilíbrio deve-se definir uma direção específica. O sentido da dissociação altera o valor da constante, no entanto não altera o resultado dos elementos de formação da equação genérica (4.1).

Uma vez considerado que as equações de dissociação reagem da esquerda para a direita, podem ser encontradas as constantes (k) que é a relação das concentrações elevado ao coeficiente que acompanha na dissociação dos produtos pelos reagentes. *K1* para a equação (4.8) pode ser encontrado pela equação (4.9), *k2* para a equação (4.7) poder ser calculado pela equação (4.10).

$$k_1 = \frac{[CO_2]^1.[H_2]^1}{[CO]^1.[H_2O]^1}.\left(\frac{P}{P_0}\right)^{1+1-(1+1)} = \frac{ca}{bd} \tag{4.9}$$

$$k_2 = \frac{[CH_4]^1}{[H_2]^2} \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^{1-(2)} = \frac{e \;\; n_{total}}{a^2}\left(\frac{P_0}{P}\right) \tag{4.10}$$

$$n_{total} = a + b + c + d + e \tag{4.11}$$

Onde, n_{total} é a soma do número de moles dos elementos formados na equação (4.1), P_0 a pressão ambiente e P é a pressão que está acontecendo a dissociação.

A constante de equilíbrio pode ser determinada a partir de tabelas especificas ou de uma forma mais apropriada para uma simulação numérica, a partir da sua definição através da função de Gibbs para cada constante.

$$\ln(k_1) = -\frac{\Delta G_1^{\,0}}{RT} \tag{4.12}$$

$$\ln(k_2) = -\frac{\Delta G_2^{\,0}}{RT} \tag{4.13}$$

Nesta expressão nota-se a dependência da constante de equilíbrio com a temperatura. A função de Gibbs pode ser obtida de uma expressão dependente dos elementos que fazem parte da reação de dissociação.

A variação de Gibbs pode ser entendida como a energia livre do sistema e explicado pela segunda lei da termodinâmica podendo ser determinada para cada equação de dissociação obtida pela multiplicação dos coeficientes que acompanha a reação, pela soma da entalpia de formação (h^0f) em kJ/kmol, variação de entalpia (Δh) em kJ/kmol menos a multiplicação da temperatura atmosférica (T_0) pela variação de entropia (ΔS) em kJ/kmol.K, como é mostrado nas equações abaixo.

$$\Delta G_1^{\,0} = [(h^0 f_{CO_2} + \Delta h_{CO_2} - T_0.\Delta S_{CO_2}) + (h^0 f_{H_2} + \Delta h_{H_2} - T_0.\Delta S_{H_2})]_P - [(h^0 f_{CO} + \Delta h_{CO} - T_0.\Delta S_{CO}) + (h^0 f_{H_2O} + \Delta h_{H_2O} - T_0.\Delta S_{H_2O})]_R \quad (4.14)$$

$$\Delta G_2^{\,0} = [h^0 f_{CH_4} + \Delta h_{CH_4} - T_0.\Delta S_{CH4}]_P - [2(h^0 f_{H_2} + \Delta h_{H_2} - T_0.\Delta S_{H_2})]_R \quad (4.15)$$

Alguns componentes formados estão relacionados ao equilíbrio químico em que a variação da entropia é zero neste ponto, quando uma reação caminha para esta condição chega ao mínimo da curva de Gibbs (deriva da função de Gibbs em função da temperatura e pressão é igual a zero) e que a mudança dessa função para cada elemento dos reagentes e produtos que se formam depende apenas da temperatura e pressão uma vez considerado que seja um gás ideal.

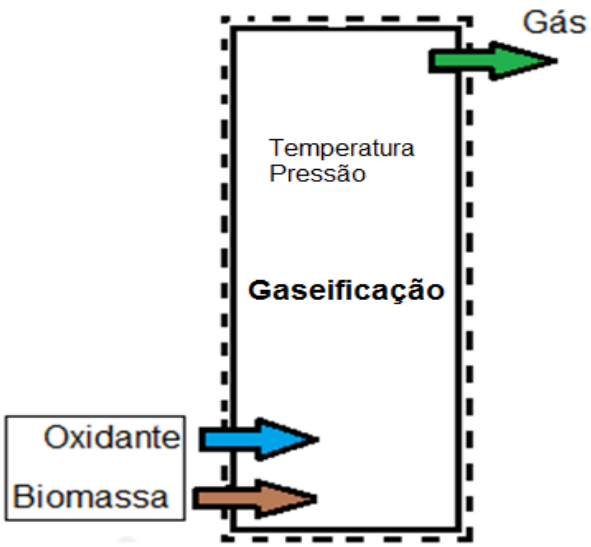
Portanto, o modelo fica estabelecido a partir das Equações (4.2), (4.3), (4.4), (4.12) e (4.13), que regem o processo de gaseificação de biomassa com vapor de água, uma vez convergido os sistemas de equações é possível obter os coeficientes da equação genérica.

4.2.1.1 ANÁLISE ENERGÉTICA DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA COM INJEÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA

A análise energética da gaseificação de biomassa não foi levada em consideração o tipo de gaseificador de leito fixo ou fluidizado, mas sim considerando apenas o equilíbrio químico relacionado a dissociação em uma zona qualquer de gaseificação no interior de um reator isolado mostrado na Figura 4.2.

Supondo que a biomassa e o vapor de água como agente oxidante são inseridos juntos e aquecidos no gaseificador em determinada temperatura e pressão, que por sua vez são convertidos totalmente em gás de síntese desconsiderando as cinzas da biomassa e que esteja em estado de regime permanente do processo de decomposição térmica da gaseificação.

FIGURA 4.2: ESQUEMA DE UM GASEIFICADOR QUALQUER.



Através do fornecimento de dados ao algoritmo dos elementos químicos da biomassa de *x, y, z e w* que representam os números de moles de carbono, hidrogênio, oxigênio e água é possível determinar a energia necessária para aquecer a biomassa até a temperatura desejada de gaseificação pela variação de entalpia da biomassa ($\Delta H_{Biomassa}$) expresso abaixo.

$$\Delta H_{Biomassa} = \left(xCp_C + yCp_H + zCp_O\right)\Delta T + w\Delta H_{H_2O} \tag{4.16}$$

Onde, ΔT é a variação de temperatura; Cp_C, Cp_H, e Cp_O são os calores específicos do carbono, hidrogênio e oxigênio respectivamente; *w* e ΔH_{H2O} são os números de mole de agua contida na biomassa e a variação de entalpia da água. Por analogia, a entalpia para o vapor de água aquecido injetado no processo é expressa na Equação (4.17).

$$\Delta H_{Vapor} = m\Delta H_{H_2O} \tag{4.17}$$

Foi necessário determinar o poder calorífico inferior da biomassa de forma analítica aplicando a primeira lei da termodinâmica para sistemas reagentes expressos na Equação (4.18) em um processo isotérmico a 25°C e isobárico a 1atm. de uma reação molar ideal de combustão com ar (20,95% em volume de oxigênio e 79,05% em volume), quantidade de ar necessário para que o combustível oxide completamente e forme apenas o dióxido de carbono, vapor de água e nitrogênio exemplificada na Equação (4.19).

$$Q = H_{RP} = \sum_{P} n(h^0 f + \Delta h) - \sum_{R} n(h^0 f + \Delta h) \tag{4.18}$$

$$n_C C + n_H H + a_1(O_2 + 3{,}76N_2) = a_2 CO_2 + a_3 H_2 O + a_4 N_2 \tag{4.19}$$

$$n_C = \frac{x}{x + y + z + w} \tag{4.20}$$

Onde, n_c, e n_H são as frações molares de carbono e hidrogênio respectivamente, estes valores são obtidos de cálculos prévios a partir da composição em massa da biomassa de uma análise elementar.

Os valores dos coeficientes $a_{1,2...4}$ são encontrados a partir do balanceamento das espécies químicas do carbono na Equação (4.21), hidrogênio (4.22), oxigênio (4.23) e nitrogênio (4.24).

$$a_2 = n_C \tag{4.21}$$

$$2a_3 = n_H \Rightarrow a_3 = \frac{n_H}{2} \tag{4.22}$$

$$2a_1 = 2a_2 + a_3 \Rightarrow a_1 = \frac{2n_C + \frac{n_H}{2}}{2} \tag{4.23}$$

$$a_4 = 3{,}76a_1 \tag{4.24}$$

Após encontrar os valores dos coeficientes $a_{1,2...4}$ de cada elemento e substituídos na Equação (4.18) da entalpia de reação de combustão ficando em função somente das entalpias de formação já que o processo é isotérmico e a variação de entalpia é zero podendo ser resumida da seguinte forma para uma base molar de 100kmol de biomassa.

$$Q_{Biomassa} = \left[n_C.h^0 f_{CO_2} + \left(\frac{n_H}{2} \right) h^0 f_{H_2O} \right]_{\text{Produtos}} - \left[n_C.h^0 f_C + n_H.h^0 f_{H_2} \right]_{\text{Reagentes}} \tag{4.25}$$

Onde, $h°f_{CO2}$, $h°f_{H2O}$, $h°f_C$ e $h°f_H$ são as entalpias de formação. Para encontrar o poder calorífico inferior em kJ/kg basta dividir o calor da reação estequiométrica pela massa molar da biomassa ($M_{Biomassa}$).

$$M_{Biomassa} = n_C M_C + n_H M_H + n_O M_O + n_w M_{H2O} \tag{4.26}$$

$$PCI_{Biomassa} = \frac{Q_{Biomassa}}{M_{Biomassa}} \tag{4.27}$$

Por analogia, o calor da reação ideal do gás é feito da mesma forma que foi determinado para a biomassa como mostra a expressão abaixo.

$$Q_{gás} = \left[\left(n_{CO} + n_{CO_2} + n_{CH_4} \right) h^0 f_{CO_2} + \left(\frac{2n_{H_2} + 4n_{CH_4}}{2} \right) h^0 f_{H_2O} \right]_P - \left[\begin{matrix} n_{H_2} h^0 f_{H_2} + n_{CO} h^0 f_{CO} + \\ n_{CO_2} h^0 f_{CO_2} + n_{CH_4} h^0 f_{CH_4} \end{matrix} \right]_R \tag{4.28}$$

Onde, n_{CO}, n_{CO2}, n_{CH4} e n_{H2} são as frações molares do monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano e hidrogênio que compõe o gás de síntese. Fazendo para o hidrogênio ficaria:

$$n_{H_2} = \frac{a}{(a+b+c+d+e)} \tag{4.29}$$

O poder calorífico inferior do gás ($PCI_{gás}$) em kJ/kg na Equação (4.33) é obtido pela divisão do calor de reação pela massa molecular do gás ($M_{Gás}$) calculado na Equação (4.29).

$$M_{Gás} = n_{H_2}M_{H_2} + n_{CO}M_{CO} + n_{CO_2}M_{CO_2} + n_{H_2O}M_{H_2O} + n_{CH_4}M_{CH_4} \tag{4.30}$$

$$PCI_{gás} = \frac{Q_{gás}}{M_{gás}} \tag{4.31}$$

A eficiência energética ($\varepsilon_{energética}$) do processo da gaseificação, ou seja, a quantia de energia obtida do gás de síntese da gaseificação pela energia fornecida ou consumida no processo para elevar a temperatura da biomassa e o vapor de água injetado é expresso abaixo.

$$\varepsilon_{Energética} = \frac{m_{gas}PCI_{gas}}{m_{Biomassa}PCI_{Biomassa} + m_{Biomassa}\Delta H_{Biomassa} + m_{Vapor}\Delta H_{Vapor}} \tag{4.32}$$

Onde, $m_{Biomassa}$ e m_{gas} são as massas de vapor de água fornecido no processo e a massa do gás de síntese.

4.2.2 GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA COM INJEÇÃO DE AR

O processo de conversão termoquímica da gaseificação de biomassa com injeção de ar está regido por uma equação genérica (4.33), tendo como resultado os elementos apresentados do lado direito com seus coeficientes correspondentes que formam o gás de síntese.

$$\left[C_X H_Y O_Z + wH_2O\right]_{Biomassa} + \left[uH_2O + A_{ar}(O_2 + 3{,}76N_2)\right]_{Ar} \rightarrow aH_2 + bCO + cCO_2 + dH_2O + eCH_4 + fN_2 \quad (4.33)$$

Nesta equação os coeficientes *x, y, z* e *w* representam o número de mol associados a quantidade de carbono, hidrogênio, oxigênio e água respectivamente presente na biomassa da análise elementar.

A letra *u* corresponde ao coeficiente molar de vapor de água contido no ar e A_{ar} é a quantia molar de ar seco injetado no processo de gaseificação, quantidade essa abaixo da condição ideal já que se trata de oxidação parcial.

Os coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e *e* representam as quantidades molares dos produtos que formam o gás de síntese resultantes da gaseificação que é encontrado pelo modelo numérico.

Para a determinação das equações algébricas que permitam encontrar os coeficientes *a, b, c, d* e *e* foi necessário utilizar um balanço das espécies químicas; do carbono na Equação (4.34), do hidrogênio (4.35), do oxigênio (4.36) e também do nitrogênio (4,37).

$$b + c + e = x \quad (4.34)$$

$$2a + 2d + 4e = y + 2(w + u) \quad (4.35)$$

$$b + 2c + d = z + w + u + 2A_{ar} \quad (4.36)$$

$$f = 3{,}76A_{ar} \tag{4.37}$$

Uma vez fornecido os valores no algoritmo de *x, y, z, w, m* e feito o balanço das espécies químicas, ainda não é possível determinar os valores dos coeficientes *a, b, c, d, e* e *f* com a apenas cinco variáveis e três equações uma vez dispensando o coeficiente *f* já que depende do A_{ar}, para tornar o sistema de equações consistente é necessário agregar mais duas equações vinda das reações de dissociação.

As equações de equilíbrio químico, constante as funções de Gibbs estabelecida para esse modelo são as mesmas feita para o modelo da gaseificação com vapor de água que completam esse modelo.

A grande maioria da formação dos gases no processo está indiretamente relacionado com a oxidação parcial relacionada a quantidade de ar fornecido abaixo da condição estequiométrica que representa a taxa de equivalência (ER).

$$ER = \frac{(A/C)_{Real}}{(A/C)_{Estequiométrico}} \tag{4.38}$$

Onde, $(A/C)_{estequiométrico}$, representam a razão entre a quantidade de ar (A) com relação ao combustível (C) de uma reação estequiométrica. Uma reação ideal para 1kmol de combustível é demonstrado abaixo.

$$(C_X H_Y O_Z) + A(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow b_1 CO_2 + b_2 H_2 O + b_3 N_2 \tag{4.39}$$

Os coeficientes *A,* $b_{1,2\ e\ 3}$ são encontrados pela conservação das espécies químicas, portanto, a relação fica:

$$(A/C)_{Estequiométrico} = \frac{\frac{\left(2x + \frac{y}{2} - z\right)}{2} kmol}{1kmol} \quad (4.40)$$

Uma das variáveis de entrada no algoritmo constitui na atribuição de valores a taxa de equivalência de ar (ER), feito isso facilmente saberemos qual foi o número de moles real de ar para 1kmol de combustível e como se trata da oxidação parcial o valor da taxa de equivalência deve estar bem abaixo de 100%.

$$A_{Ar} = (A/C)_{Estequiométrico} ER \quad (4.41)$$

O teor de vapor de água presente na atmosfera pode ser retido pelo ar de 0 a 4% do volume do ar, chegando a esse limite, o mesmo torna saturado, ou seja 100%, não tendo a capacidade de absorver mais vapor de água, e essa taxa depende da temperatura em que o sistema se encontra.

Segundo a lei de Dalton, a pressão atmosférica (P_{atm}) exercido por os compostos que o formam é calculada pela soma das pressões parciais, resumindo como ar seco e vapor de água.

$$P_{atm} = P_N + P_O + ... + P_{CO_2} + P_{O_3} + P_{H_2O} = P_{Ar-seco} + P_{H_2O} \quad (4.42)$$

A umidade relativa, que é a razão entre a pressão exercida pela quantidade de vapor de água na condição em que o ar se encontra (ea) e a pressão exercida pelo montante máximo de vapor de água absorvido por o ar (es), pode ser encontrada pela equação (4.44) de Tetens (VIANELLO; ALVES, 2004).

$$UR = \frac{ea}{es}(100\%) \tag{4.43}$$

$$es = 0{,}611.\left[10^{\left(\frac{7{,}5.T_{Ar}}{237{,}3+T_{Ar}}\right)}\right] \tag{4.44}$$

A equação (5.44) permite determinar a pressão exercida em kPa através do vapor de água máximo absorvido pelo ar, dependente da temperatura em que ele se encontra (T_{Ar}) em graus célsius. Facilmente pode ser encontrado (ea), substituído na razão de mistura ($W_{mistura}$) em kg de vapor de água por kg de ar seco, e determinado o valor de u, multiplicando pela quantidade de ar seco.

$$W_{mistura} = \frac{0{,}622(ea)}{P_{atm} - ea} \tag{4.45}$$

$$u = W_{mistura} A_{Ar} \tag{4.46}$$

4.2.2.1 ANÁLISE ENERGÉTICA DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA COM INJEÇÃO DE AR

Na análise energética da gaseificação de biomassa para esse modelo é feito da mesma forma para gaseificação com vapor de água, em vez do vapor de água injeta-se ar como agente oxidante considerando as mesmas discussões do processo feitas para a Figura 4.2.

A atribuição de dados de entrada no algoritmo como a composição da biomassa e a quantidade de ar é possível determinar o poder calorifico inferior e a entalpia da biomassa feito da mesma forma discutido na seção 4.2.1.1. A quantidade de energia necessária para aquecer o ar injetado no processo da gaseificação é expresso na Equação (4.47).

$$\Delta H_{Ar} = A_{Ar} Cp_{Ar} \Delta T + u \Delta H_{H_2O} \quad (4.47)$$

Onde A_{Ar} e u são informações do número de moles de ar seco e água contido no ar respectivamente pre-calculados pelo fornecimento da umidade relativa do ar. Foi necessário determinar o poder calorífico inferior do gás através da reação de combustão com ar ideal em uma reação molar isotérmica expresso abaixo.

$$Q_{gás} = \left[\left(n_{CO} + n_{CO_2} + n_{CH_4} \right) h^0 f_{CO_2} + \left(\frac{2n_{H_2} + 4n_{CH_4}}{2} \right) h^0 f_{H_2O} \right]_P - \left[\begin{matrix} n_{H_2} h^0 f_{H_2} + n_{CO} h^0 f_{CO} + \\ n_{CO_2} h^0 f_{CO_2} + n_{CH_4} h^0 f_{CH_4} \end{matrix} \right]_R \quad (4.48)$$

Onde, n_{CO}, n_{CO2}, n_{CH4} e n_{H2} as frações molares do monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano e hidrogênio para uma base molar de 100kmol de gás. Fazendo para o hidrogênio ficaria:

$$n_{H_2} = \frac{a}{(a + b + c + d + e + f)} \quad (4.49)$$

O poder calorífico inferior do gás ($PCI_{gás}$) em kJ/kg na Equação (4.58) é obtido pela razão do calor de reação pela massa molecular do gás ($M_{Gás}$).

$$M_{Gás} = n_{H_2} M_{H_2} + n_{CO} M_{CO} + n_{CO_2} M_{CO_2} + n_{H_2O} M_{H_2O} + n_{CH_4} M_{CH_4} \quad (4.50)$$

$$PCI_{gás} = \frac{Q_{gás}}{M_{gás}} \quad (4.51)$$

Finalmente pode-se chegar a eficiência energética do processo que é a energia obtida do gás pela energia consumida para elevar os reagentes na temperatura de gaseificação expressa abaixo.

$$\varepsilon_{Energética} = \frac{m_{gas} PCI_{gas}}{m_{Biomassa} PCI_{Biomassa} + m_{Biomassa} \Delta H_{Biomassa} + m_{Ar} \Delta H_{Ar}} \tag{4.52}$$

Onde $m_{Biomassa}$ e m_{Ar} correspondem a massa de biomassa e do ar injetados respectivamente.

4.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Antes de realizar os estudos propostos por esse trabalho, houve a necessidade de calibração dos modelos da gaseificação a partir de comparações entre resultados obtidos com o modelo matemático confrontados com resultados experimental encontrado na literatura.

Na validação da gaseificação de biomassa com vapor de água foi utilizado a casca de arroz com massa de vapor de água com relação a massa de biomassa de Vapor/Biomassa (V/B) igual a 1,32 em quatro faixa de temperatura de 690, 730, 750 e 770°C, e que os dados presentes nesta literatura não foi fornecido margem de incerteza do experimento (LOHA; CHATTERJEE; CHATTOPADHYAY, 2010)

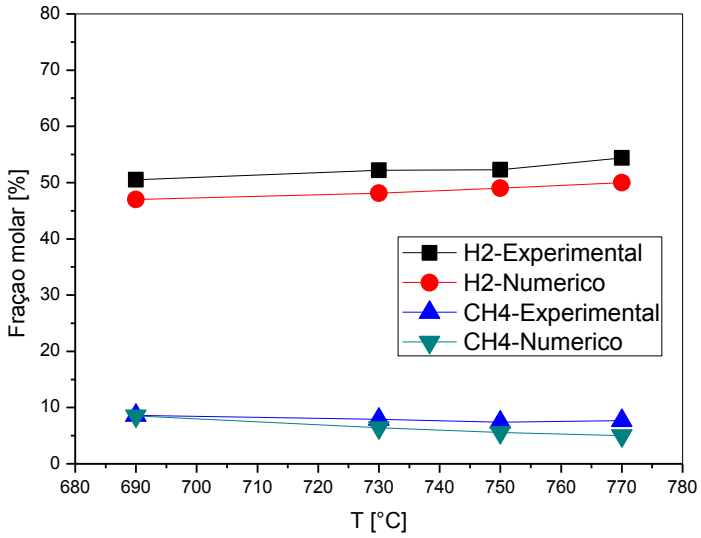
A Tabela 4.2 mostra comparações dos percentuais volumétricos dos gases resultantes da simulação de gaseificação e os obtidos através do experimento encontrado na literatura.

A comparação da formação das frações molares para o hidrogênio e metano obtido da simulação numérica para a mesma condição de temperatura e V/B recém citadas contida do experimento é apresentada na Figura 4.3.

TABELA 4.2: COMPARAÇÃO DO MODELO E EXPERIMENTAL DE GASEIFICAÇÃO DA CASCA DE ARROZ COM INJEÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA.

Relação da massa de vapor pela massa de biomassa (V/B=1,32)								
T [°C]	Modelo				Experimental (LOHA; CHATTERJEE; CHATTOPADHYAY, 2010)			
690	46,03	14,07	31,38	8,518	50,5	14,3	26,6	8,6
730	48,12	16,76	28,71	6,413	52,2	16,4	23,5	7,9
750	48,92	18	27,53	5,554	52,3	17,75	22,25	7,4
770	49,57	19,17	26,44	4,809	54,4	18,5	19,4	7,7
Gases [%mol]	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2	CO	CO_2	CH_4

FIGURA 4.3**:** COMPARAÇÃO DA FORMAÇÃO DO HIDROGÊNIO E METANO OBTIDO DA SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAL DA GASEIFICAÇÃO DE CASCA DE ARROZ COM INJEÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA COM V/B=1,32.



O mesmo procedimento foi realizado para outro modelo de gaseificação de biomassa utilizando injeção de ar como agente oxidante. O experimento da gaseificação da seringueira foi obtido da literatura usando ar como agente oxidante, com taxas de equivalência de ar (ER) igual a 41,4 43,4, 45,2 e 47% em pressão atmosférica a 727°C, em que a fonte da literatura não disponibilizou informações de incertezas dos dados experimentais (JAYAH et al., 2003).

A análise dos resultados dos gases reproduzidos pela simulação numérica e comparados com resultado empírico da seringueira, da mesma referência permanecendo os mesmos parâmetros de temperatura e quantidade de ar fornecido, os resultados dos gases são comparados mostrados na Tabela 4.3.

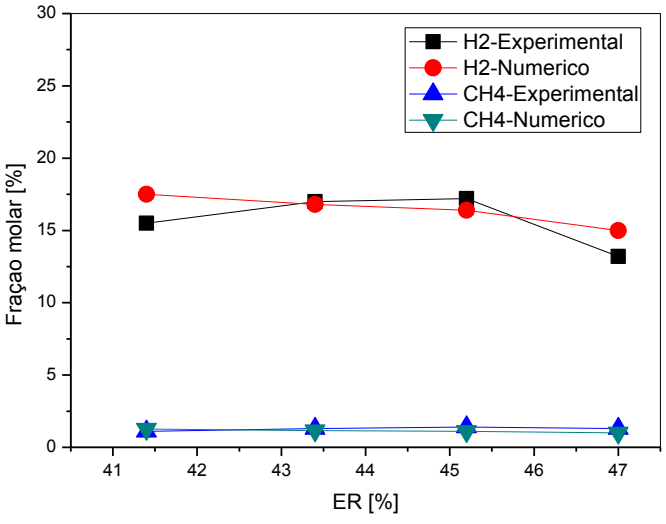
TABELA 4.3: COMPARAÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL DE GASEIFICAÇÃO DA SERINGUEIRA COM INJEÇÃO DE AR.

Realizado à temperatura de 727 [°C]								
ER [%]	Modelo				Experimental (JAYAH et al., 2003)			
41,4	17,5	16,6	13,21	1,26	15,5	19,1	11,4	1,1
43,4	16,8	15,38	13,76	1,15	17	18,4	10,6	1,3
45,2	16,4	14,33	14,33	1,1	17,2	19,6	9,9	1,4
47,0	15	14,3	14	1	13,2	19,7	10,8	1,3
Gases [%mol]	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2	CO	CO_2	CH_4

Já que o hidrogênio e metanos são dois gases de mais interesse, foi feito simulação e comparados com o experimental dos percentuais molares nas mesmas taxas de ar e temperatura do experimento mostrados na Figura 4.4.

A resolução numérica dos processos citados acima mostra boa tendência e aproximação confrontado com o ensaio e que essa configuração matemática representa bem a gaseificação referente a formação dos gases. Tendo aprovado o modelo, mais a frente é feita a presunção do gás de síntese do processo da decomposição térmica da gaseificação.

FIGURA 4.4: COMPARAÇÃO DA FORMAÇÃO DO HIDROGÊNIO E METANO OBTIDO DA SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAL DE GASEIFICAÇÃO DA SERINGUEIRA COM INJEÇÃO DE AR A 727°C.



CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As composições químicas elementares das biomassas apresentadas no capítulo de metodologia na Tabela 4.1 foram alimentados no algoritmo numérico da simulação do processo de gaseificação do conjunto de biomassa com massa de vapor de água em relação a massa da biomassa V/B=25% a temperatura de 800°C. A reprodução numérica do processo resulta na obtenção da formação das frações volumétricas dos gases apresentadas na Tabela 5.1.

TABELA 5.1: COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE DA GASEIFICAÇÃO DO CONJUNTO DE BIOMASSA COM 25% DE VAPOR DE ÁGUA A 800°C.

	Biomassas	**Percentual em volume**				
		H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2O
25 % de vapor de água a 800°C	Baraúna	43,42	36,46	16,3	3,82	15,27
	Burra leiteira	51,62	30,79	12,23	5,353	15,99
	Catingueira	51,15	32,62	10,82	5,406	13,61
	Jurema Preta	50,14	36,48	7,925	5,46	9,182
	Maniçoba	50,81	30,98	13,06	5,149	16,59
	Umbuzeiro	51,43	33,22	9,814	5,543	12,36

Em termos de comparação entre processos foi simulado utilizando as mesmas biomassas em um outro algoritmo, agora utilizando injeção de ar a 25% abaixo da condição estequiométrica na mesma temperatura de 800°C obtendo composição volumétrica do gás na Tabela 5.2.

TABELA 5.2: COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE DA GASEIFICAÇÃO DO CONJUNTO DE BIOMASSA COM 25% DE AR INJETADO A 800°C

	Biomassas	**Percentual em volume**					
		H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2O	N_2
25 % de ar seco a 800°C	Baraúna	20,05	26,12	12,57	0,9612	8,955	31,34
	Burra leiteira	24,88	20,39	9,932	1,48	11,25	32,08
	Catingueira	24,86	21,73	9,234	1,478	9,802	32,9
	Jurema Preta	24,66	24,41	7,783	1,454	7,299	34,4
	Maniçoba	24,36	20,75	10,36	1,419	11,29	31,82
	Umbuzeiro	25,14	22,05	8,714	1,511	9,219	33,36

Composição dos gases obtidos da simulação mostram que a gaseificação utilizando vapor de água tem mais tendência de produção de hidrogênio do que injetando ar.

A partir da composição molar desse gás e da análise elementar da biomassa foi quantificado o seu poder calorífico inferior (PCI) de forma analítica baseado em uma reação estequiométrica e isotérmica aplicado em sistemas reagentes da primeira lei da termodinâmica.

A simulação da gaseificação do conjunto de biomassas para um percentual fixo a 25% de agente oxidante, tanto para vapor de água injetado quanto para o ar foi verificado que a utilização do vapor de água obtém maior poder calorifico e eficiência energética.

Essa informação pode ser inferida diante da Tabelas 5.3 que mostra a simulação da gaseificação do conjunto de biomassas com injeção de massa de vapor de água em relação a biomassa V/B=25% a 800°C e na Tabela 5.4 que mostra um e outro modelo de gaseificação do mesmo conjunto de biomassas com injeção de 25% de ar abaixo da condição estequiométrica a 800°C.

Percebe-se que o percentual de carbono e hidrogênio presente na amostra impacta diretamente em sua energia máxima (PCI) e que independe da porção de oxigênio em sua composição. Ao inserir uma certa quantia de vapor de água ao processo de gaseificação o PCI obtido do gás de síntese é em torno de 51% maior do que usando o mesmo percentual em ar injetado ao invés do vapor de água na reação.

TABELA 5.3: GASEIFICAÇÃO DO PROCESSO DO CONJUNTO DE BIOMASSA COM 25% DE VAPOR DE ÁGUA A 800°C

	Amostras	PCI [kJ/kg]		Eficiência [%]
		Biomassa	Gás	
25 % de vapor de água a 800°C	Baraúna	17304	8627	57,28
	Burra Leiteira	20135	10232	58,37
	Catingueira	20667	10885	60,6
	Jurema Preta	21910	12224	64,35
	Maniçoba	19358	9855	58,54
	Umbuzeiro	21399	11388	61,21

TABELA 5.4: GASEIFICAÇÃO DO PROCESSO DO CONJUNTO DE BIOMASSAS COM INJEÇÃO DE AR EM 25% A 800°C

	Amostras	PCI [kJ/kg]		Eficiência [%]
		Biomassa	Gás	
25 % de ar seco a 800°C	Baraúna	17304	4536	46,99
	Burra Leiteira	20135	4683	46,47
	Catingueira	20667	4846	48,26
	Jurema Preta	21910	5155	51,21
	Maniçoba	19358	4632	46,81
	Umbuzeiro	21399	4940	48,63

Para melhor entendimento de cada processo de gaseificação são estudados cada um a frente separadamente em uma análise de sensibilidade variando alguns parâmetros como temperatura, massa de vapor de água, taxa de ar, pressão de reação que impacta na formação do gás, PCI, grau de conversão do poder calorífico e a eficiência do processo.

5.1 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA GESEIFICAÇÃO DE BIOMASSA COM INJEÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA

Nessa seção são apresentados resultados da simulação do processo da gaseificação da baraúna e do conjunto de biomassas selecionados variando alguns parâmetros como a temperatura, fração de vapor de água e pressão que influenciam

na composição do gás de síntese, poder calorífico e eficiência do processo utilizando vapor de água como agente oxidante.

5.1.1 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA GESEIFICAÇÃO DA BARAUNA COM INJEÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Foi selecionado de forma aleatória a baraúna da Tabela 4.1, informações como o número de moles calculado pelo algoritmo a partir dos percentuais em massa apresentado nessa mesma tabela e alimentando as equações do processo da gaseificação com percentual em massa de vapor de água em relação a biomassa de 60, 100 e 160% nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 respectivamente para 10 temperaturas diferentes variando de 500 a 1400°C com intervalos de 100°C.

FIGURA 5.1: COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA A GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA COM 60% EM MASSA DE VAPOR.

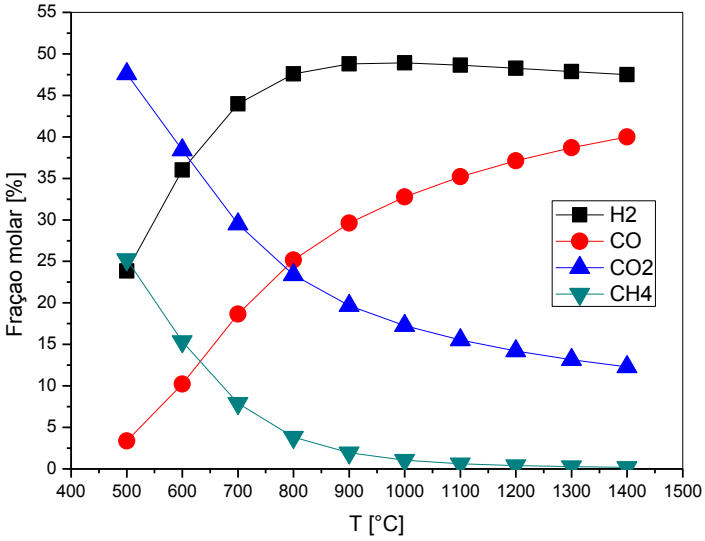


FIGURA 5.2: COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA A GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA COM 100% EM MASSA DE VAPOR.

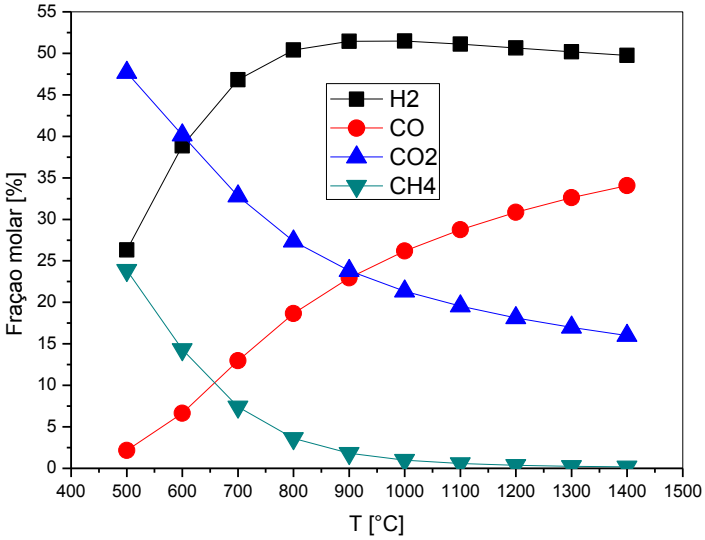
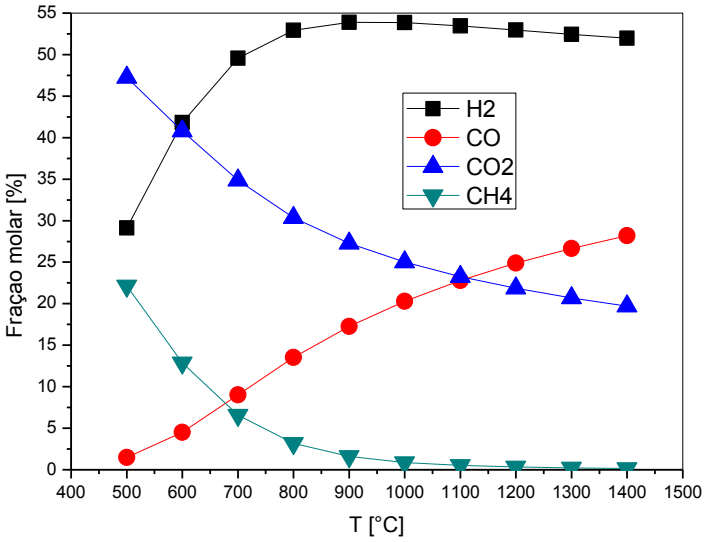


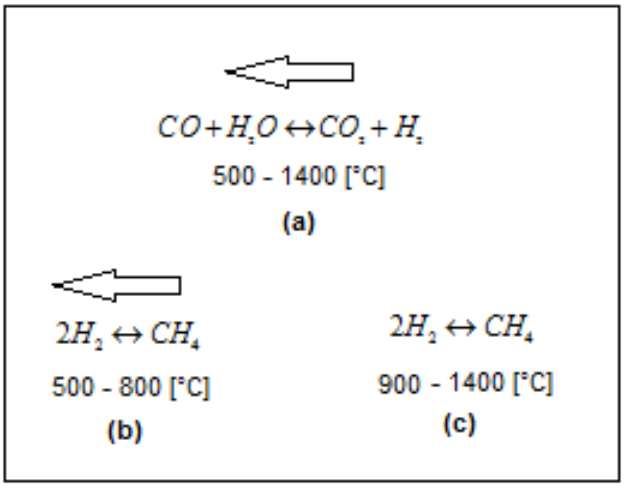
FIGURA 5.3: COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA A GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA COM 160% EM MASSA DE VAPOR.



O equilíbrio químico representado pelas Equações (4.7) e (4.8) podem reagir em sentidos diferentes dependendo da variação na concentração dos gases e alteração de alguns parâmetros como pressão, fração de vapor de água e temperatura.

Podemos observar que o monóxido de carbono crescente e dióxido de carbono decrescente mostrado na Figura 5.4 está relacionado com sentido da equação de dissociação na Figura 5.4(a).

FIGURA 5.4: EQUILÍBRIO QUÍMICO NA GASEIFICAÇÃO DA BARAUNA COM 60% DE VAPOR DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.



O aumento de hidrogênio e decrescimento do metano em temperatura entre 500-800°C beneficia os elementos do lado esquerdo da equação na Figura 5.4(b), à medida que aumenta essa temperatura a orientação dessa equação muda e se estabiliza entre 900-1400°C.

Diante dessas informações para um dado percentual fixo de vapor em função da temperatura abaixo da condição estequiométrica, ou seja, menor que 100% de vapor podemos dizer que a formação de hidrogênio e dióxido de carbono é reduzida enquanto o monóxido de carbono é cada vez maior, já o percentual de metano é modificado, porém seja insignificante.

Em uma análise detalhada da simulação de gaseificação da baraúna voltado somente na obtenção do hidrogênio e metano para um dado fixo de massa de vapor de água de 30 a 150% em função da temperatura foi verificado que quanto maior a taxa de massa de vapor e temperatura maior será a formação do hidrogênio mostrado na Figura 5.5.

A formação desse gás se estabilizando por volta de 900°C, enquanto para o metano decresce com o aumento da massa de vapor injetado e também todos tendendo a zero com o aumento da temperatura mostrado na Figura 5.6.

FIGURA 5.5: FORMAÇÃO DE HIDROGÊNIO NA GASEIFICAÇÃO DA BARAUNA EM DIFERENTES FRAÇÃO DE VAPOR EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.

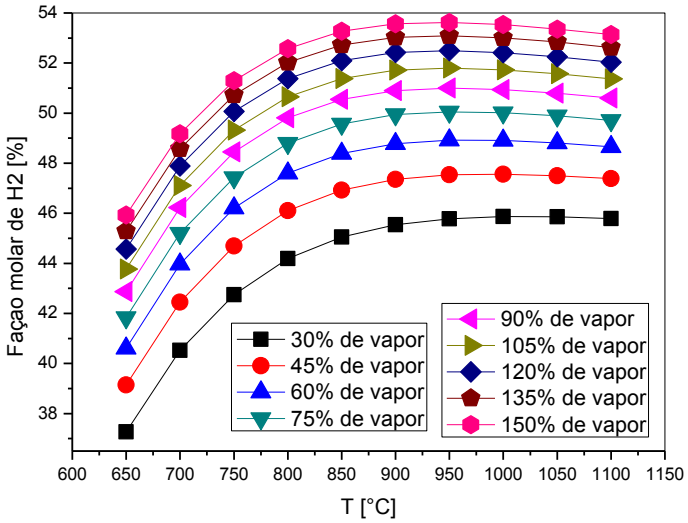
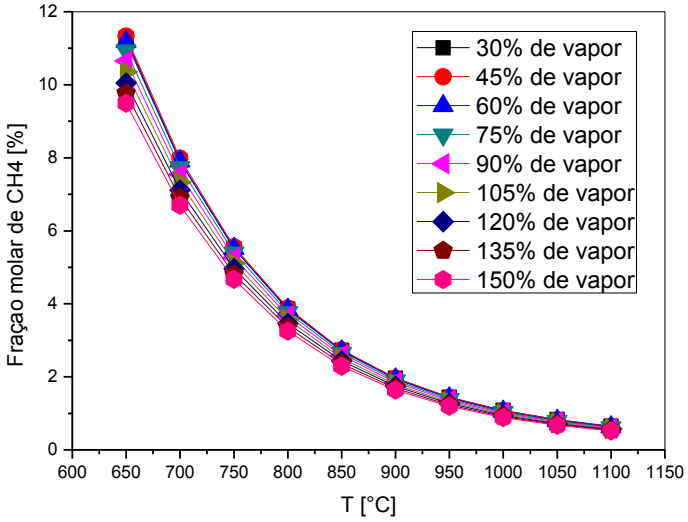


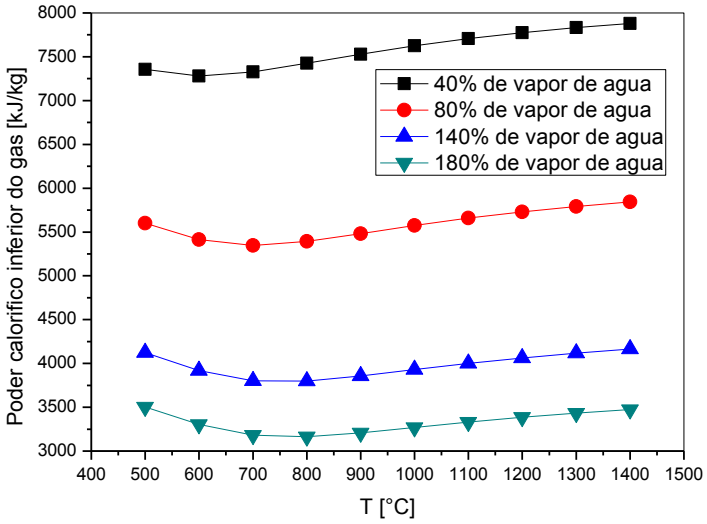
FIGURA 5.6: FORMAÇÃO DE METANO NA GASEIFICAÇÃO DA BARAUNA EM DIFERENTES FRAÇÃO DE VAPOR EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.



Foi simulado a gaseificação da baraúna com diferentes frações em massa de vapor de água em função da temperatura. O conteúdo energético do gás aumenta quando aumenta também a temperatura, mas decresce entre 600 a 800°C e se estabiliza em torno dos 1400°C mostrado na Figura 5.7.

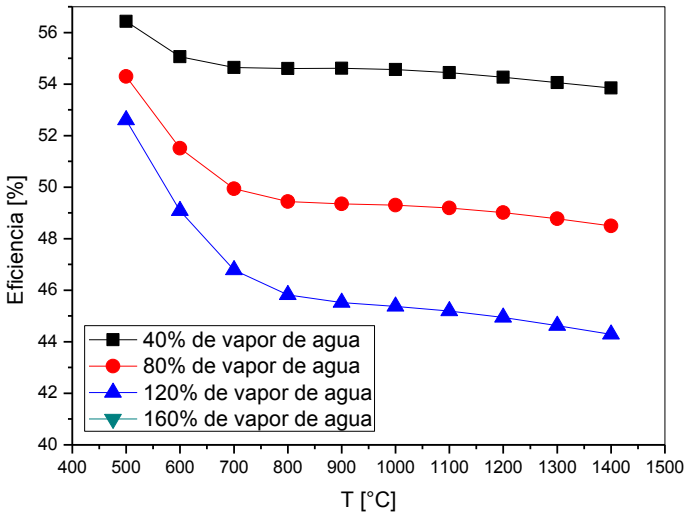
O ganho do poder calorifico com a temperatura está relacionado a formação de hidrogênio que contribui diretamente no poder calorífico, já se for injetado uma quantidade maior de vapor de água, essa curva é deslocada para baixo devido a formação de água e dióxido de carbono.

FIGURA 5.7: PCI DO GÁS DE SÍNTESE NA GASEIFICAÇÃO DE BARAUNA EM DIFERENTES FRAÇÕES DE VAPOR EM FUNÇAO DA TEMPERATURA.



O aumento da temperatura diminui a eficiência do processo mostrada na Figura 5.8 com diferentes frações em massa de vapor de água injetado. A maior queda de decrescimento da eficiência é entre 500 a 800°C e se estabiliza próximo de 1400°C; O aumento do vapor de água desloca a curva para baixo por causa da diminuição do poder calorifico do gás.

FIGURA 5.8: EFICIÊNCIA DO PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA EM DIFERENTES FRAÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA.

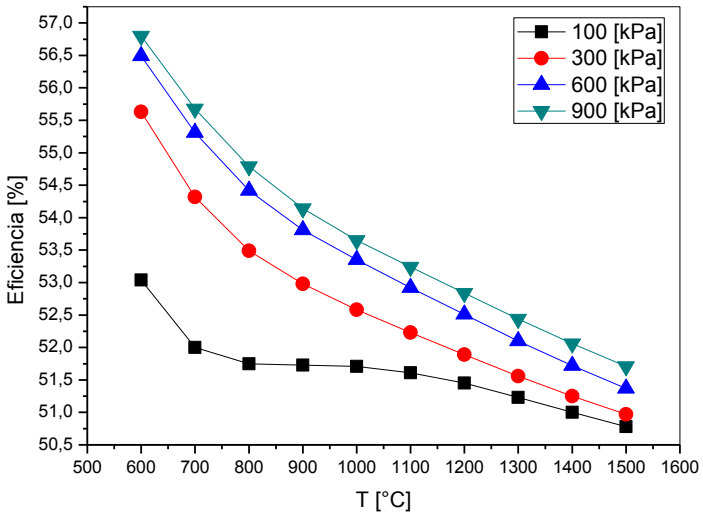


O ganho na pressão da reação desloca a curva de eficiência do processo para cima com injeção de 60% em massa de vapor de água na gaseificação de baraúna, mas com tendência decrescente à medida que aumento a temperatura observado na Figuras 5.9.

O efeito do aumento da pressão favorece a formação dominante do dióxido de carbono enquanto que o hidrogénio que é um dos elementos que melhor contribui no poder calorifico decresce consideravelmente.

Em elevadas pressões e baixa temperatura é a maior obtida chegando a 57% de eficiência energética a 900kPa e 600°C, vale destacar também que em baixa temperatura os valores de eficiência são distantes para diferentes pressões, mas em elevada temperatura a eficiência diminui convergindo próximo de 51%.

FIGURA 5.9: EFICIÊNCIA DO PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO DE BARAUNA EM DIFERENTES PRESSÕES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA COM 60% DE VAPOR.



5.1.2 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA GESEIFICAÇÃO DO CONJUNTO DE BIOMASSAS COM INJEÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

A simulação da gaseificação do conjunto de biomassas mostra que todas as biomassas analisadas obedecem ao mesmo comportamento na formação de hidrogênio, esse gás ao aumento à medida que cresce a temperatura e se estabiliza por volta de 950°C em um processo com injeção de vapor de água em massa de 135% mostrado na Figura 5.10.

Enquanto que para a formação volumétrica de metano decresce com o aumento da temperatura se aproximando todas as biomassas a zero representada na Figura 5.11. Vale destacar que a Baraúna é o insumo de menor capacidade de produção tanto de hidrogênio quanto de metano, mas em elevadas temperaturas a formação de metano se igualam com as demais amostras.

FIGURA 5.10: FORMAÇÃO DE HIDROGÊNIO NA GASEIFICAÇÃO DO CONJUNTO DE BIOMASSA COM V/B=1,35.

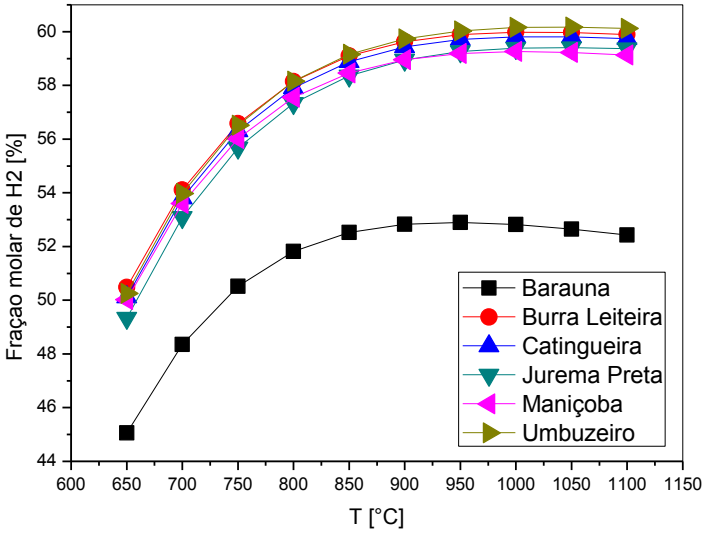
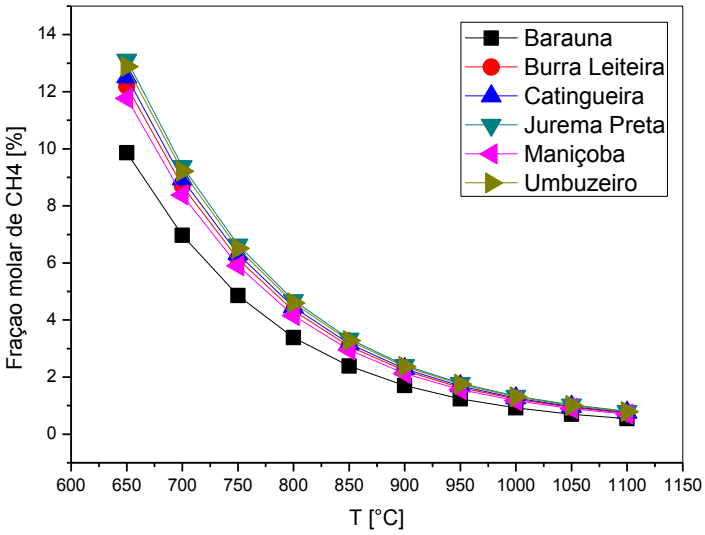


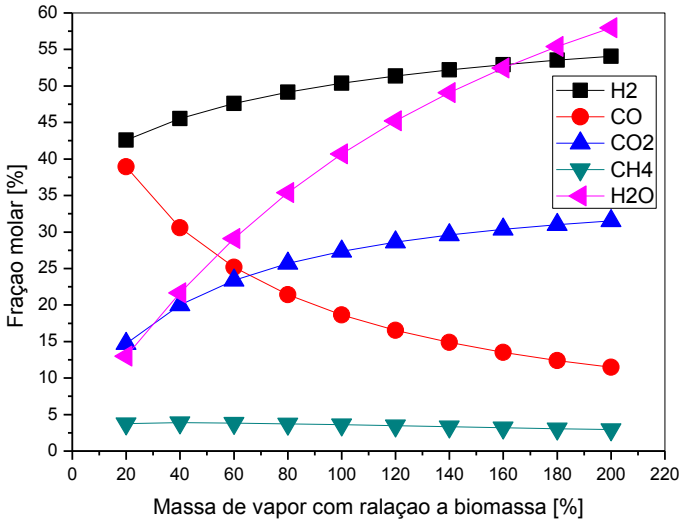
FIGURA 5.11: FORMAÇÃO DE METANO NA GASEIFICAÇÃO DO CONJUNTO DE BIOMASSA COM V/B=1,35.



5.1.3 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA GESEIFICAÇÃO DA BARAUNA EM FUNÇÃO DA MASSA DE VAPOR DE ÁGUA INJETADO

A concentração em massa de vapor de água injetado aumenta a formação molar de hidrogênio, água e dióxido de carbono e o monóxido de carbono decresce já o metano é pouco afetado ficando de zero como pode ser observado na Figura 5.12 do processo de gaseificação da baraúna a 800°C.

FIGURA 5.12: COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE DA GASEIFICAÇÃO DA BARAÚNA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA A 800°C.



Esse comportamento desrespeita as equações de equilíbrio químico, o aumento de vapor de água faz a Equação (4.8) reagir da esquerda para a direita beneficiando a formação do hidrogênio e dióxido de carbono porque consumindo o monóxido de carbono oriundo da oxidação e parte do vapor de água injetado.

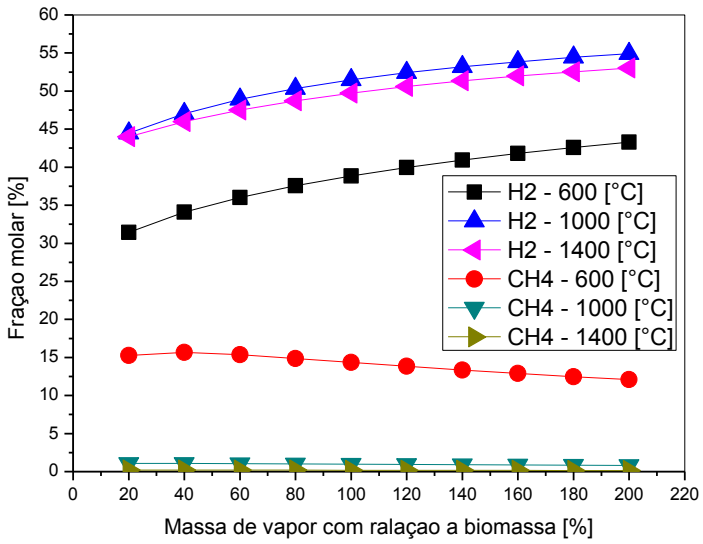
Se considerarmos 25% em massa de vapor de água injetado, apenas 30,76% dessa água injetada contribui participa da dissociação na formação do monóxido de carbono e hidrogênio enquanto o restante favorece o meio.

O incremento de massa de vapor de água na gaseificação elevando a temperatura e fixando para ocorrer a reação, acontece que a formação do hidrogênio

aumenta em função da massa de vapor e quando elevado sua temperatura de reação a curva que descreve esse gás é deslocada para cima, tendo como limite de 100°C, acima desse valor acurva é deslocada para baixo que podemos perceber na Figura 5.13.

A formação do metano é contínua em 15% molar em função da massa de vapor de água em temperatura baixa e em elevadas temperaturas essa curva é deslocada para baixo ficando próximo de zero.

FIGURA 5.13: FORMAÇÃO DE H_2 e CH_4 NA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA EM DIFERENTES TEMPERATURAS FIXA VARIANDO FRAÇÃO DE VAPOR.



O aumento da massa de vapor de água na gaseificação impacta na diminuição significativa da eficiência do processo e o aumento da temperatura fazendo variar apenas o vapor de água, a curva em forma de uma reta que descreve a eficiência é deslocada para baixo como pode ser observado na Figura 5.14.

FIGURA 5.14: EFICIÊNCIA DO PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO DE BARAUNA EM FUNÇÃO DA FRAÇÃO DE VAPOR A 800, 1000 E 1200°C.

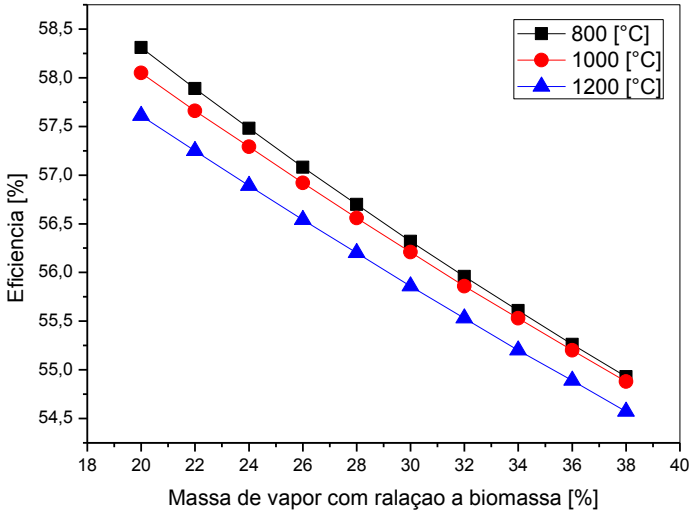
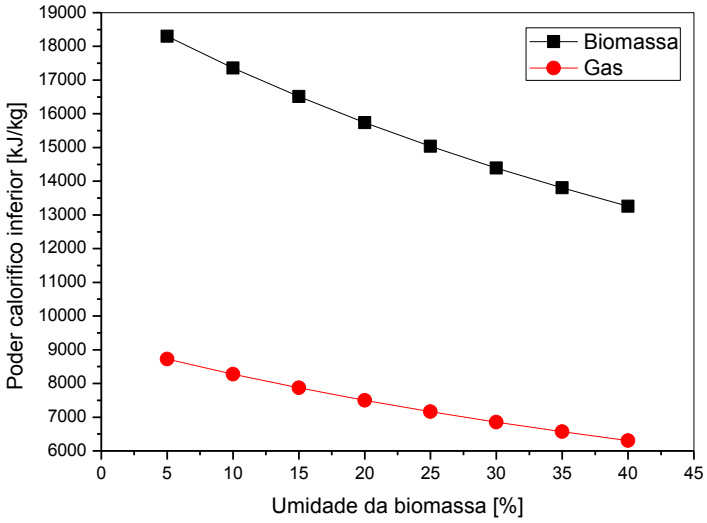


FIGURA 5.15: PODER CALORÍFICO DA BARAÚNA E DO GÁS A 800°C COM 30% DE VAPOR EM FUNÇÃO DA UMIDADE DA BIOMASSA.



As simulações feitas até aqui foram realizadas com a umidade fixa da biomassa da análise elementar, a seguir é feito uma verificação de como se comporta o poder calorifico da biomassa e do gás de síntese na gaseificação da baraúna realizada a 800°C e 30% em massa de vapor de água.

O aumento da umidade presente na biomassa afeta o poder calorífico da própria biomassa e também o do gás resultante da gaseificação nessa temperatura e percentual de vapor de água injetado recém citados mostrados na Figura 5.15.

5.1.4 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA GESEIFICAÇÃO DA BARAUNA COM INJEÇÃO DE MASSA DE VAPOR DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA PRESSÃO

O aumento da pressão leva ao decaimento na obtenção do hidrogênio e monóxido de carbono aumentando o metano e dióxido de carbono apresentados nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 com uma fração de massa fixa de vapor de água em 60, 100 e 160% respectivamente em função da pressão.

FIGURA 5.16: FORMAÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE NA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA A 800°C E 60% DE VAPOR INJETADO.

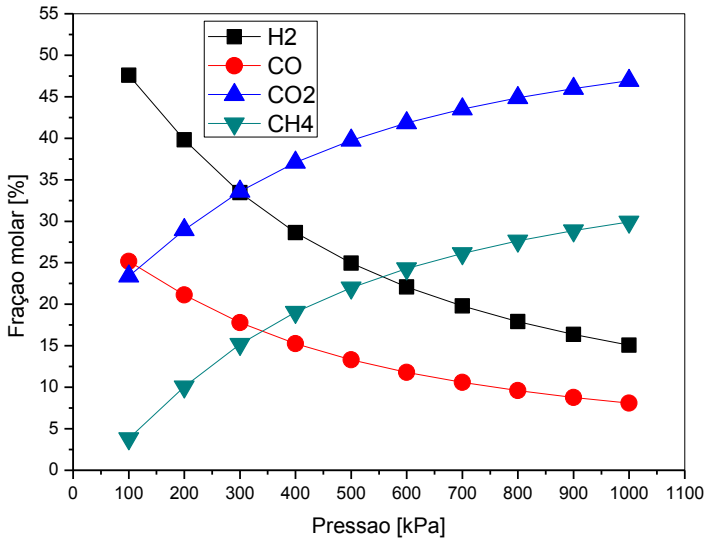


FIGURA 5.17: FORMAÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE NA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA A 800°C E 100% DE VAPOR.

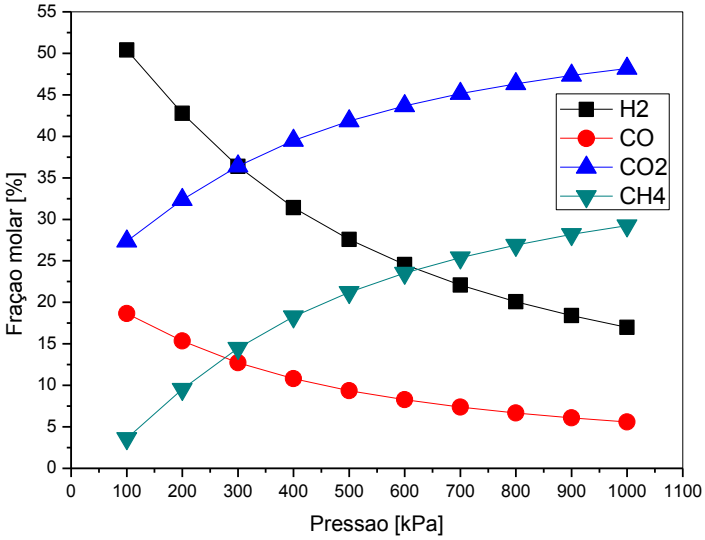
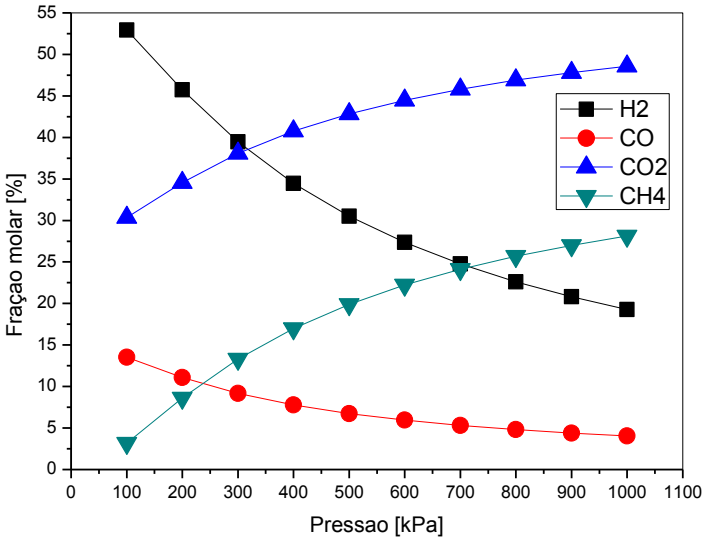
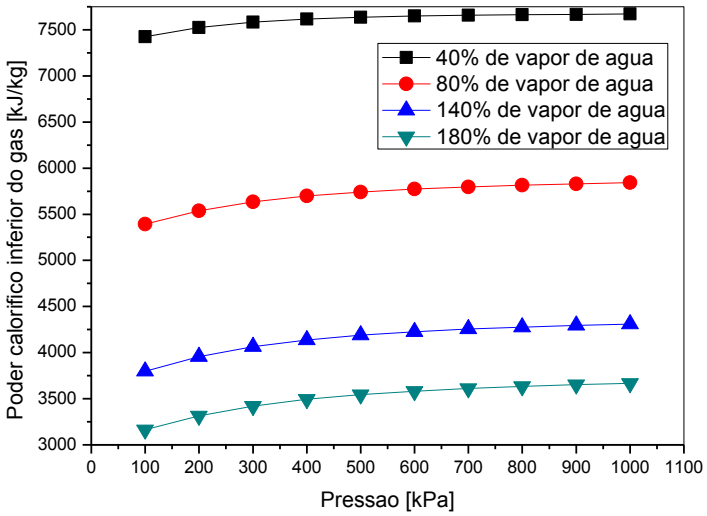


FIGURA 5.18: FORMAÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE NA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA A 800°C E 160% DE VAPOR.



O ganho de pressão no gaseificador aumenta o poder calorífico do gás de síntese de forma não significativamente, mas à medida que aumenta uma quantidade fixa de vapor de água no processo deslocar a curva para baixo diminuindo significativamente o seu poder calorífico mostrado na Figura 5.19.

FIGURA 5.19: PCI DO GÁS DE SÍNTESE NA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA EM DIFERENTES FRAÇÕES DE VAPOR EM FUNÇAO DA PRESSÃO A 800°C.



5.2 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA COM INJEÇÃO DE AR

Nessa seção é apresentado resultados da simulação do processo da gaseificação da baraúna e do conjunto de biomassas selecionados variando alguns parâmetros como a temperatura, taxa de ar e pressão que influenciam na composição do gás de síntese, poder calorífico e eficiência do processo utilizando ar como agente oxidante.

5.2.1 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA GESEIFICAÇÃO DA BARAUNA COM INJEÇÃO DE AR EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Foi simulado o gás de síntese no processo de gaseificação de biomassa com injeção de ar como agente oxidante. Diante do número de moles calculado a partir da Tabela 4.1 presentes na metodologia foi alimentado ao algoritmo realizado para diferentes condições de alimentação do agente oxidante no sistema.

O hidrogênio e o monóxido de carbono crescem de forma que aumenta a temperatura, consequentemente o metano e dióxido de carbono decrescem, simulação da gaseificação realizado com de ar seco de 20 e 30% em função da temperatura mostrados nas Figuras 5.20 e 5.21 respectivamente.

FIGURA 5.20: COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA A GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA COM 20% DE AR.

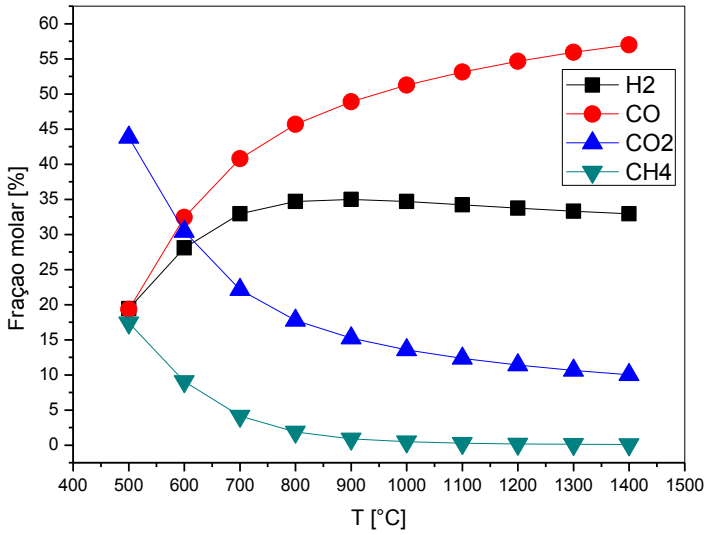
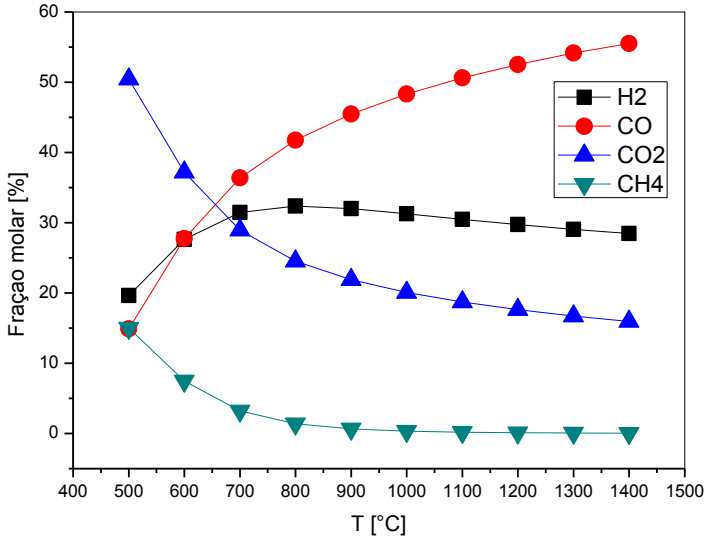


FIGURA 5.21: COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA A GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA COM 30% DE AR.



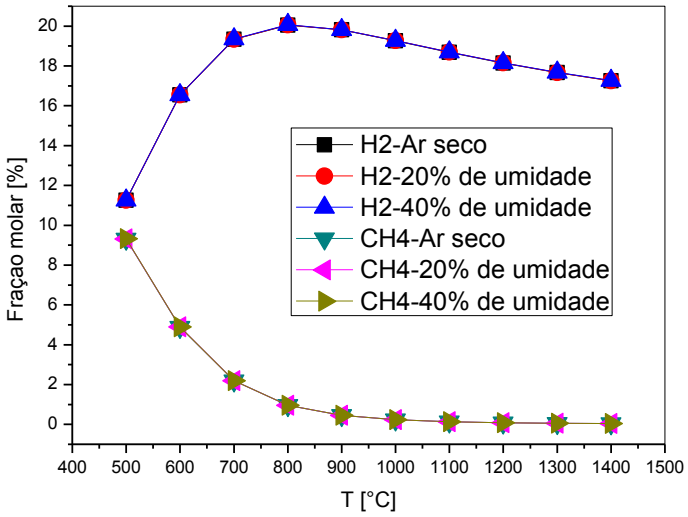
A tendência de formação percentual molar do hidrogênio é acentuado logo em temperaturas entre 500 a 700°C e começa a se estabilizar em 30% em mol por volta de 800°C, em quanto que para o monóxido de carbono aumenta constantemente em função do gradiente de temperatura.

A produção de metano é regressiva tendendo a zero em elevadas temperaturas, já o dióxido de carbono bem maior que o metano também tem sua formação decrescente.

Houve a necessidade de investigar se a umidade presente no ar tem alguma relevância no processo, esse agente da oxidação é fornecido a 25% e com zero por cento de umidade relativa, 20 e 40%.

Estabelecido essas condições citadas anteriormente, podemos perceber que a umidade do ar não tem relevância na formação tanto do hidrogênio quanto do metano mostrado na Figura 5.22.

FIGURA 5.22: FORMAÇÃO DE HIDROGÊNIO E METANO NA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA COM DE AR SECO E ÚMIDO.

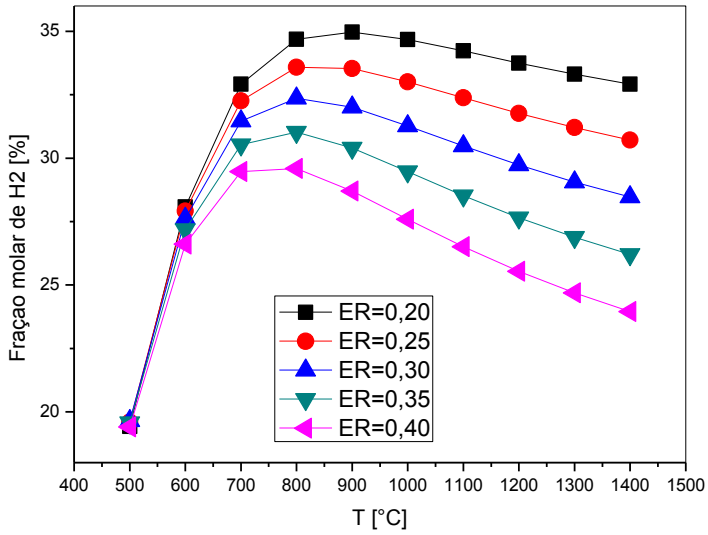


A formação do hidrogênio tem a maior taxa de crescimento entre 500 a 900°C, acima do gradiente térmico de 900°C a formação desse gás tende a diminuir e as melhores condições que favorecem o pico da produção dele é a 900°C, taxa de equivalência de ar em 20% obtém valor de fração molar de hidrogênio em 35% mostrado na Figura 5.23.

O aumento de ar seco ou ar úmido ao processo de oxidação parcial afeta diretamente a formação de hidrogênio fazendo deslocar a curva para baixo, em temperaturas baixa entorno de 500°C independente da taxa de equivalência obtém-se um percentual molar de hidrogênio por volta de 19%.

Essa análise foi realizada na gaseificação da baraúna para diferentes taxa de ar de 20 a 40% com intervalos de 5% em quantidades abaixo da condição ideal de combustão em função da temperatura.

FIGURA 5.23: FORMAÇÃO DE H_2 DA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA EM DIFERENTES TAXAS DE EQUIVALÊNCIA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.



O aumento na temperatura faz diminuir a formação do metano tendendo a zero em elevadas temperaturas e o aumento no fornecimento de ar ao processo desloca a curva para baixo, condições favoráveis para a formação desse gás é em temperaturas baixas e menor taxa de equivalência de ar possível para a gaseificação chegando a 17,5% molar a 500°C com injeção de 20% de ar mostrado na Figura 5.24.

FIGURA 5.24: FORMAÇÃO DE CH_4 DA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA EM DIFERENTES TAXAS DE EQUIVALÊNCIA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.

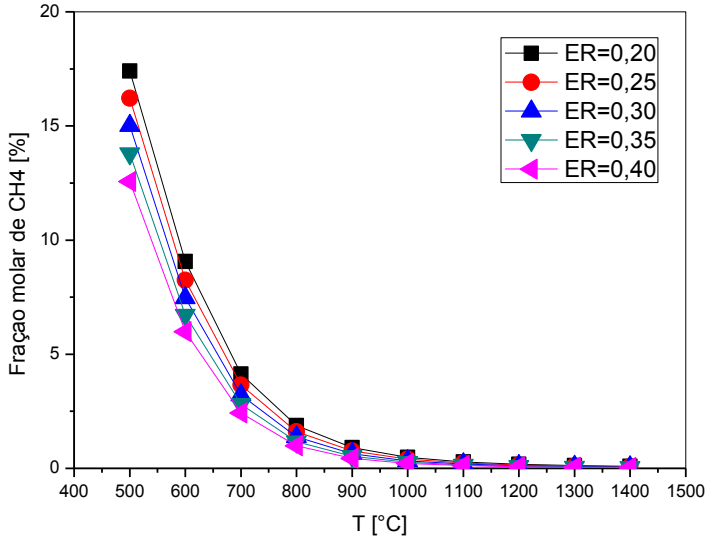
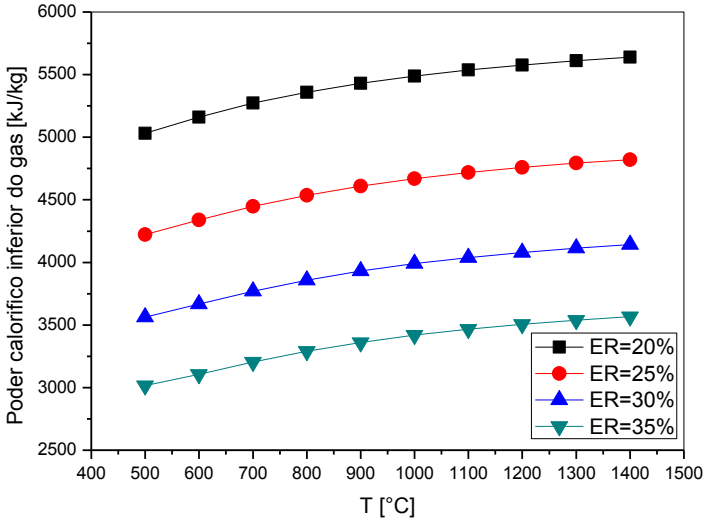


FIGURA 5.25: PODER CALORÍFICO DO GAS EM DIFERENTES TAXAS DE EQUIVALÊNCIA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.



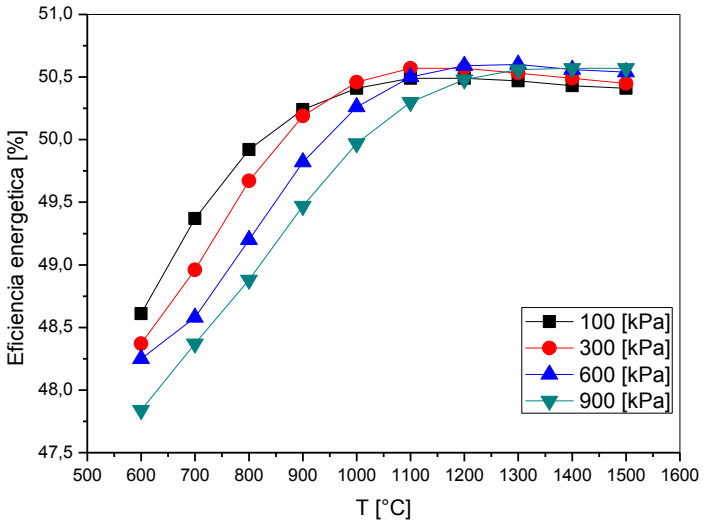
O poder calorífico do gás cresce quando aumenta a temperatura, mas o aumento de ar injetado no sistema impacta na diminuição do conteúdo energético deslocando a curva para baixo na gaseificação da baraúna em diferentes taxas de equivalência de ar em função da temperatura como é mostrado na Figura 5.25.

O aumento do poder calorifico com o acréscimo na temperatura desrespeita a formação de hidrogênio que contribui positivamente em seu conteúdo energético do gás, e o aumento de fornecimento de ar faz diminuir a formação de hidrogênio.

A eficiência energética do processo da gaseificação da baraúna com 20% de ar injetado tem comportamento crescente com o aumento da temperatura que se estabiliza acima de 1200°C mesmo em diferentes pressões convergem para uma eficiência próximos de 50,5% como é mostrado na Figura 5.26.

Como o aumento da temperatura beneficia a formação do hidrogênio e consequentemente o poder calorifico do gás a eficiência vai amentando, uma vez que aumento a pressão do sistema a curva é deslocada para baixo devido a diminuição do hidrogênio.

FIGURA 5.26: EFICIÊNCIA DO PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO DA BARAÚNA COM TAXA DE EQUIVALÊNCIA DE AR SECO EM 20% EM DIFERENTES PRESSÕES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.



5.2.2 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA GESEIFICAÇÃO DO CONJUNTO DE BIOMASSAS COM INJEÇÃO DE AR EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Como o gás de interesse é o hidrogênio e metano foi simulado o processo da gaseificação para o conjunto de biomassa selecionadas e identificado que a baraúna é a amostra que tem a menor capacidade de produção de hidrogênio chegando a 35%

molar a 900°C, em quanto que as outras tem capacidade de 44% molar na mesma temperatura mostrado nas Figuras 5.27.

FIGURA 5.27: COMPORTAMENTO DO H_2 NA GASEIFICAÇÃO DO CONJUNTO DE BIOMASSAS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA COM 25% DE AR.

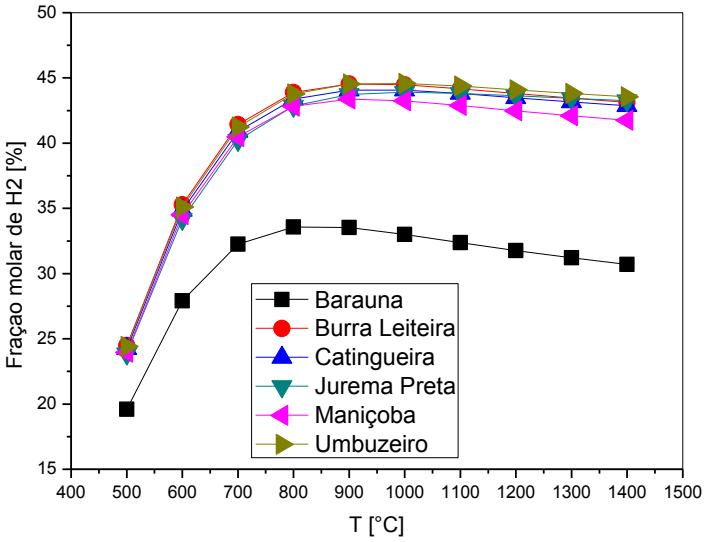
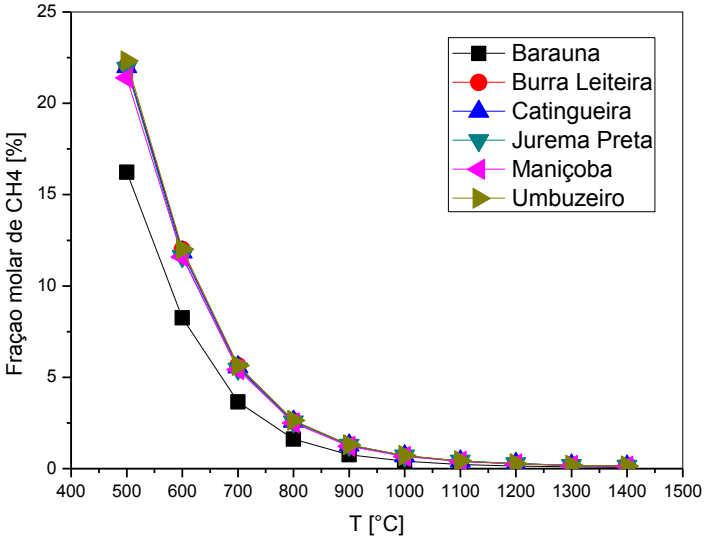


FIGURA 5.28: COMPORTAMENTO DO CH_4 NA GASEIFICAÇÃO DO CONJUNTO DE BIOMASSAS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA COM 25% DE AR.

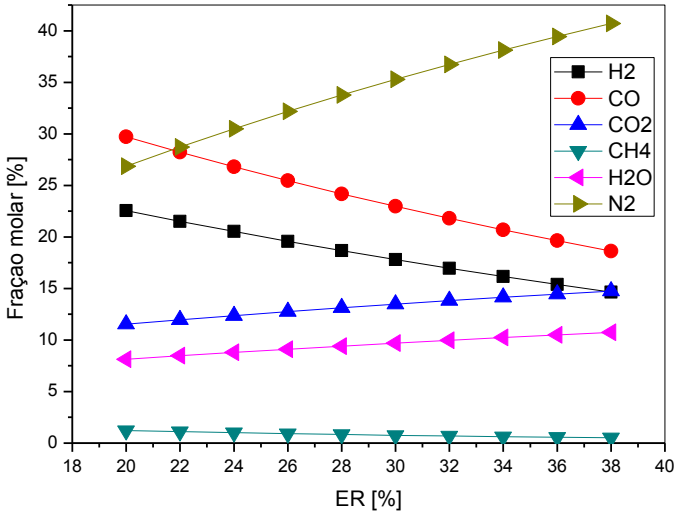


A formação do metano é decrescente de acordo com o aumento da temperatura sendo a máxima quantidade é obtida em baixa temperatura e em elevadas temperatura as biomassas produz a mesma quantidade próximo de zero observado na Figura 5.28.

5.2.3 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA GESEIFICAÇÃO DA BARAUNA EM FUNÇÃO DA TAXA DE AR INJETADO

A formação dos elementos em função da variação de percentual de ar fornecido no processo de gaseificação impacta diretamente no aumento do CO_2, H_2O e N_2 e diminuição do hidrogênio e monóxido de carbono, em quanto o metano permanece constante como mostra a Figura 5.29.

FIGURA 5.29: COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE EM FUNÇÃO DO PERCENTUAL DE AR A 800°C NA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA.



A formação do hidrogênio está limitada aproximadamente a 1000°C, abaixo desse valor produz menos e aproximadamente acima começa a decair ao ponto de tornar-se deficiente, o fornecimento gradativo de ar não contribui na formação do hidrogênio mostrado na Figura 5.30.

A medida que aumenta o fornecimento de ar na gaseificação da baraúna a formação o metano se compota quase constante a 600°C, mas em temperaturas acima desse valor desloca a curva para baixo aproximando de zero.

FIGURA 5.30: FORMAÇÃO DE METANO E HIDROGÊNIO EM TEMPERATURA FIXA EM FUNÇÃO DA TAXA DE EQUIVALÊNCIA.

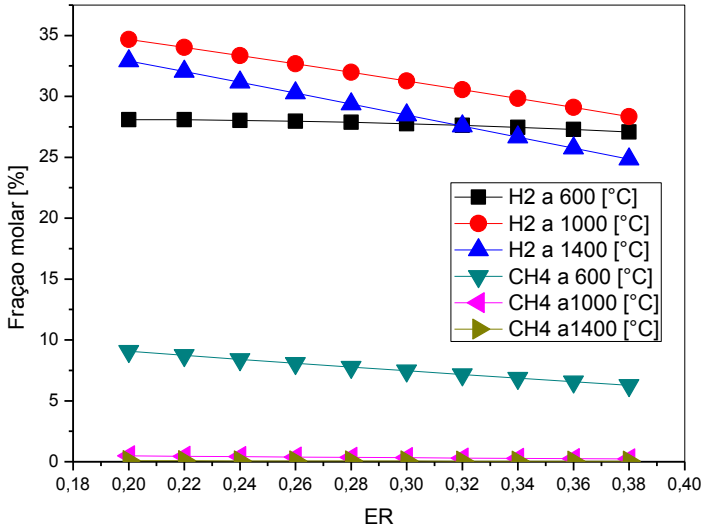
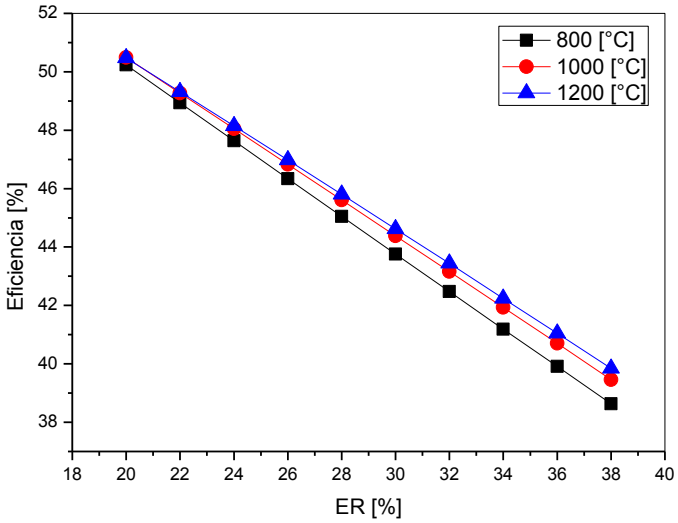


FIGURA 5.31: EFICIÊNCIA DO PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO DA BARAÚNA A 600 E 1000°C EM FUNÇÃO DA TAXA DE EQUIVALENCIA.

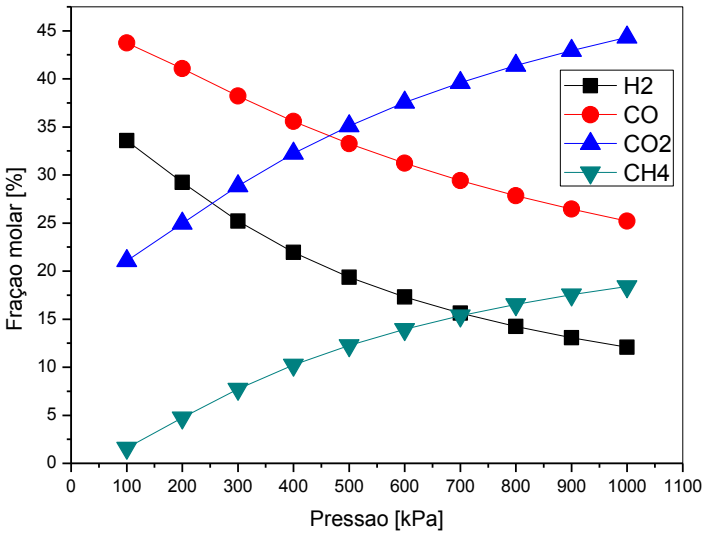


O fornecimento de ar na gaseificação da baraúna faz diminuir a eficiência do processo devido a diminuição também do poder calorifico (PCI), a curva da eficiência é deslocada para cima em maior quantidade de ar a medida que aumenta a temperatura, já em baixa quantidade de ar os valore de eficiência são maiores os mesmos valores de eficiência de 50,4% observados em temperatura de 800, 1000 e 1200°C como mostra na Figura 5.31

5.2.4 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA GESEIFICAÇÃO DA BARAUNA COM INJEÇÃO DE AR EM FUNÇÃO DA PRESSÃO

Um outro parâmetro importante estudado foi o efeito da pressão na reação. A Figuras 5.34 mostra a formação molar dos gases com taxa de equivalência de 25% a 800°C em função da pressão. O ganho na pressão, faz aumentar a fração molar de dióxido de carbono e metano, em quanto o hidrogênio e monóxido de carbono sofre um decaimento.

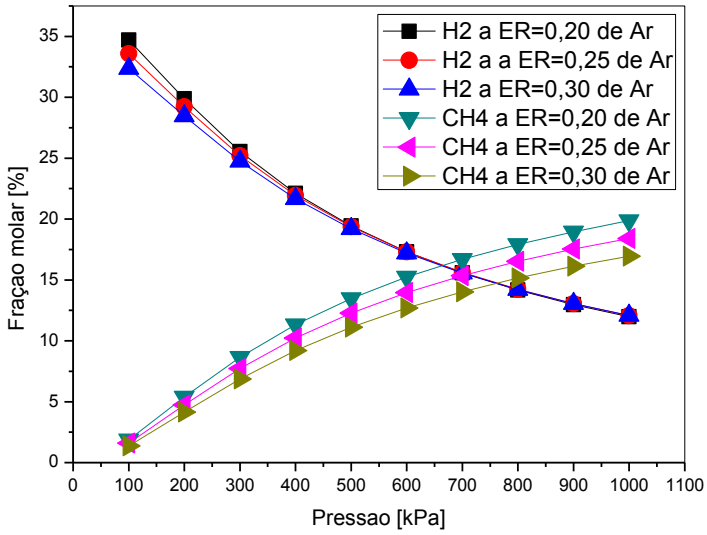
FIGURA 5.32: COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE COM TAXA DE EQUIVALÊNCIA DE 25% A 800°C EM FUNÇÃO DA PRESSÃO.



Aumento na pressão inibe a formação de hidrogênio em quanto que para o metano é crescente simulado a gaseificação para a baraúna em diferente taxa de equivalência de ar seco a 800°C em função da pressão mostrado na Figura 5.33.

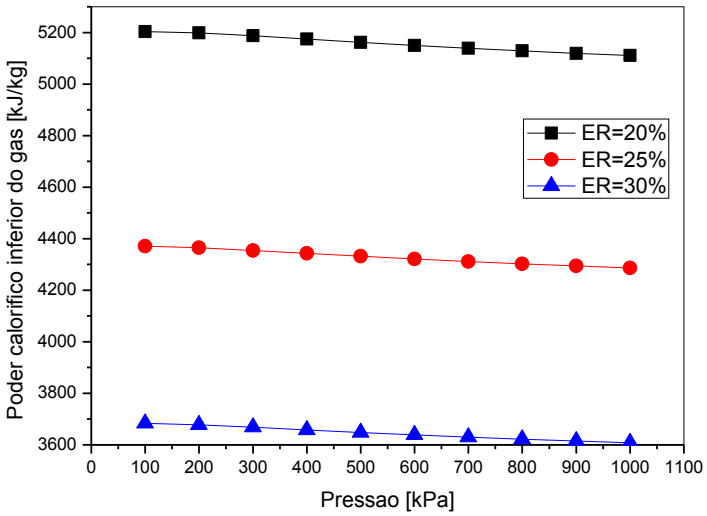
O aumento de ar faz diminuir a formação do hidrogênio em pressão atmosférica convergindo para um mesmo ponto a 1000kPa, já o metano tem valores bem próximos para diferentes taxas de ar em pressão atmosférica e os dados crescente divergem em pressão de 1000kPa.

FIGURA 5.33: FORMAÇÃO DO METANO E HIDROGÊNIO EM DIFERENTES TAXAS DE EQUIVALÊNCIA A 800°C EM FUNÇÃO DA PRESSÃO.



O parâmetro da pressão na gaseificação não tem tanta significância no poder calorifico do gás de síntese, porem o aumento de ar fornecido deslocar a curva para baixo diminuindo seu potencial energético mostrado na Figura 5.34.

FIGURA 5.34: PODER CALORÍFICO DO GÁS EM DIFERENTES TAXAS DE EQUIVALÊNCIA A 800°C EM FUNÇÃO DA PRESSÃO.



5.3 COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

Diante das informações da simulação dos processos, o modelo de gaseificação com injeção de massa de vapor de água produz mais hidrogênio do que metano ambos com tendências crescentes em elevadas temperaturas mostrado na Figura 5.35.

Em baixa temperatura a formação de hidrogênio coincide com o processo de gaseificação com injeção de ar em mesmo percentual de oxidante.

Em baixa temperatura a gaseificação com vapor de água produz mais metano do que utilizando ar, mas em alta temperatura a formação desse mesmo gás dos dois modelos tendem para um mesmo ponto próximo de zero.

FIGURA 5.35: COMPARAÇÃO DA FORMAÇÃO DE HIDROGÊNIO E METANO DOS PROCESSOS DA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA COM 20% DE VAPOR E TAXA DE EQUIVALENCIA DE 20% DE AR.

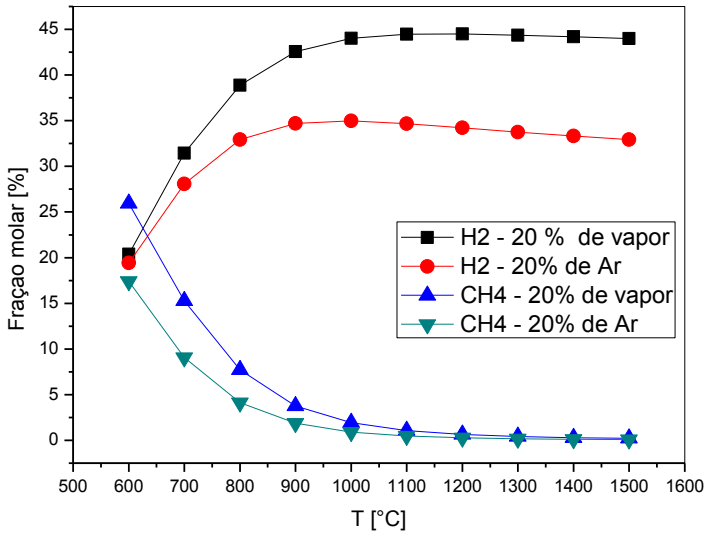
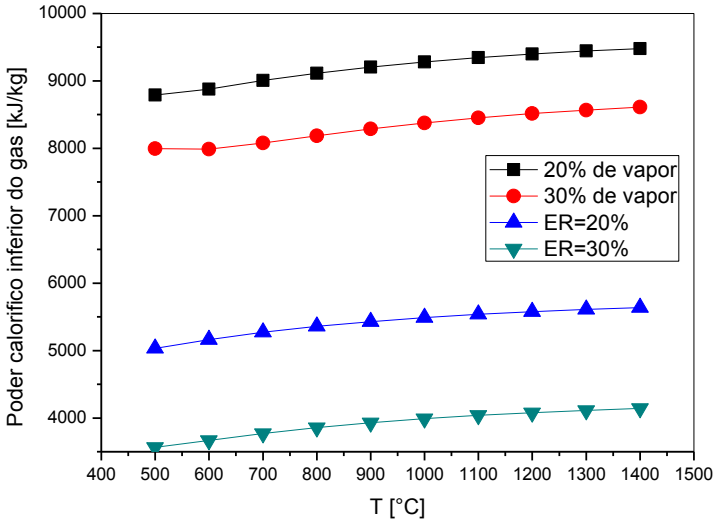


FIGURA 5.36: COMPARAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DO GÁS DE SÍNTESE DO PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO COM 20 E 30% DE VAPOR E TAXA DE EQUIVALÊNCIA DE AR EM 20 E 30% EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.



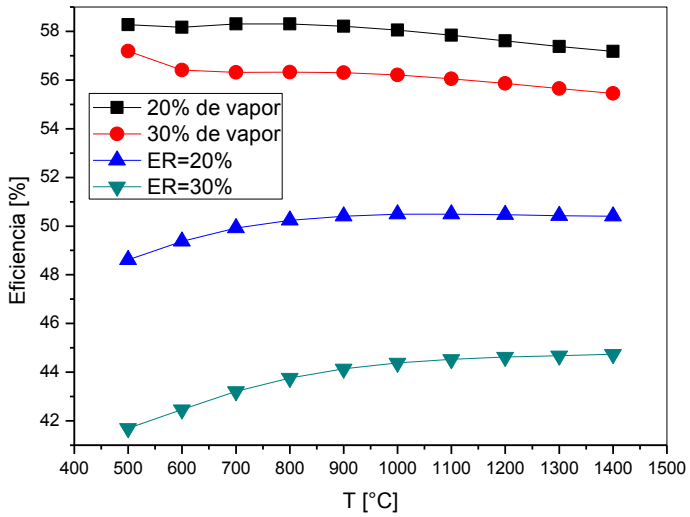
O poder calorifico do gás de síntese é crescente com o aumento da temperatura e maio na gaseificação com vapor de água mostrado usando 20% de vapor de agua comparado com 20% de ar mostrado na Figura 5.36.

A medida que aumenta o agente oxidante para uma quantidade fixa, a gaseificação da baraúna com vapor de água sofre um deslocamento da curva para baixo menor do que utilizando ar no processo.

A eficiência para a gaseificação utilizando vapor de água tem comportamento decrescente com o aumento da temperatura e crescente utilizando ar no processo comparando 20% de vapor com 20% de ar representados na Figura 5.37.

A medida que aumenta o agente oxidante para uma quantidade fixa, a gaseificação da baraúna com vapor de água sofre um deslocamento da curva de eficiência para baixo menor do que utilizando ar no processo.

FIGURA 5.37: COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA COM 20, 30 E 40% DE VAPOR E TAXA DE EQUIVALÊNCIA DE AR EM 20, 30 E 40% EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.

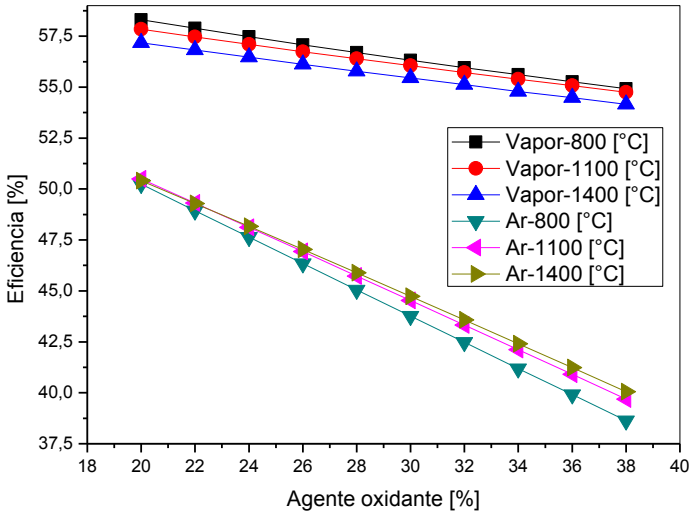


Quando aumenta o agente oxidante, a eficiência decresce em taxa maior para a gaseificação com ar do que com injeção de vapor de água relacionados a temperatura de 800°C e variando agente oxidante entre 20-38%, fornecido ao processo da gaseificação, como mostrado na Figura 5.38.

Em baixa quantidade de oxidante de 20% obtém a maior eficiência para a gaseificação com injeção de vapor de água ficando em torno de 57,5% e 50% com injeção de ar, o aumento da temperatura de gaseificação faz deslocar a curva para

baixo quando for usado vapor de água e para cima na gaseificação com injeção de ar no processo.

FIGURA 5.38: COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA A 800, 1100 E 1400°C EM FUNÇÃO DA TAXA DE OXIDANTE.

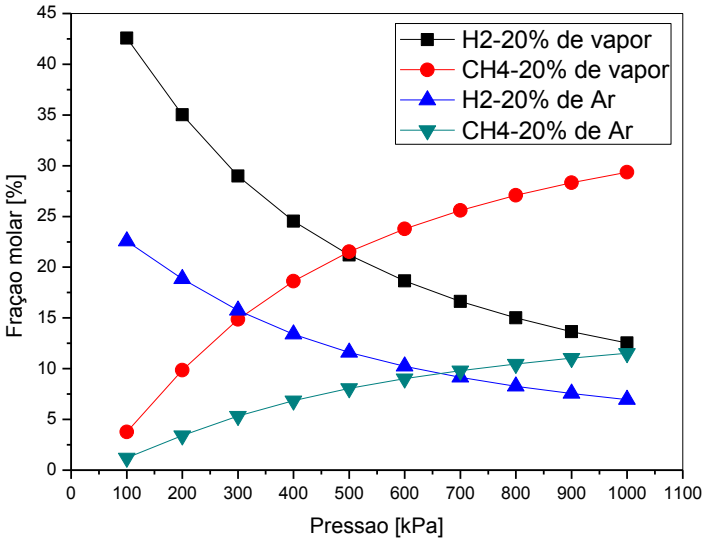


A Figura 5.39 mostra comparações entre os processos da gaseificação com ar entre vapor de água com baraúna a respeito da eficiência realizado a 20 e 30% de vapor de água comparado com injeção de ar a uma taxa de 20 e 30%, todos realizado a 800°C em função da pressão.

Nessa figura é perceptível que o efeito da pressão inibe a formação do hidrogênio nos dois modelos utilizando vapor de água, já usando ar como agente de oxidação o efeito da pressão propicia ganho na formação de metano para os dois processos.

A formação dos dois gases em discussão é sempre maior utilizando-se vapor de água, sendo hidrogênio para baixa pressão (1atm) e metano para elevadas pressões (acima de 100kPa).

FIGURA 5.39: COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA COM 20, 30 E 40% DE VAPOR E TAXA DE EQUIVALÊNCIA DE AR A 20, 30 E 40% A 800°C EM FUNÇÃO DA PRESSÃO.



O conteúdo energético do gás de síntese em ambos os modelos não é afetado com a injeção de 20% de vapor de água e 20% de ar na gaseificação, como mostra a Figura 5.40.

Maiores quantidades de vapor de água como também de ar na reação de gaseificação diminuem o poder calorifico do gás devido ao aumento da concentração da própria água e formação do dióxido de carbono. Para o caso da gaseificação com vapor, tem baixa quantidade de metano e hidrogênio relacionado ao equilíbrio químico que contribuem diretamente no poder calorífico.

A eficiência energética do processo da gaseificação com vapor de água é quase constante, em torno de 58%. Utilizando ar no processo sua eficiência tem um comportamento decrescente, apresentando 8% a menos considerando o mesmo percentual , de 20% de agente oxidante, apresentados na Figura 5.41.

Maiores quantidades de agente oxidante na gaseificação diminuem o poder calorifico do gás devido ao aumento na concentração da própria água e formação do dióxido de carbono para o caso da gaseificação com vapor, e diminuição do hidrogênio relacionado ao equilíbrio químico já que é um dos elementos que maior contribuem no poder calorífico.

FIGURA 5.40: COMPARAÇÃO DO PODER CALORÍFICO OBTIDO DOS PROCESSOS DA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA COM 20 E 30% DE VAPOR E TAXA DE EQUIVALÊNCIA DE AR EM 20 E 30% A 800°C EM FUNÇÃO DA PRESSÃO.

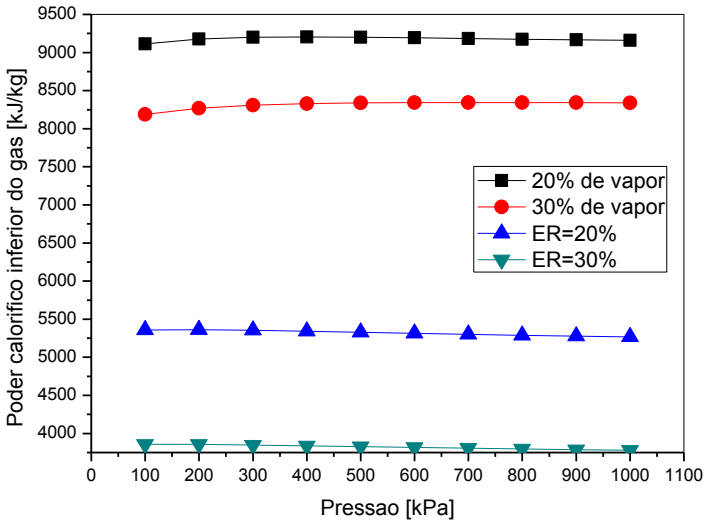
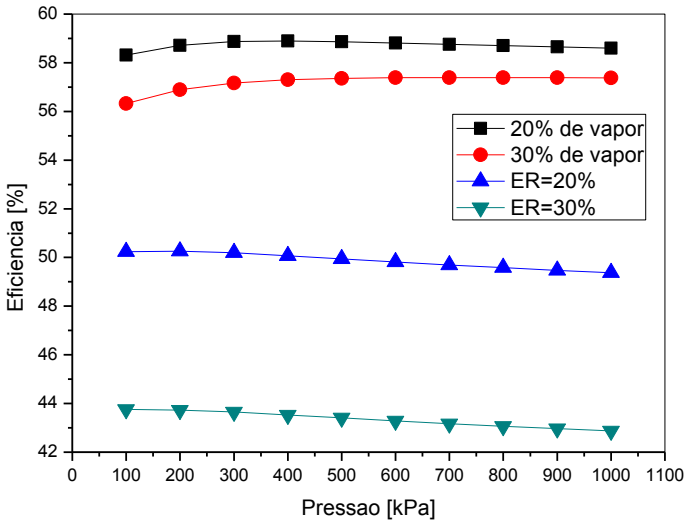


FIGURA 5.41: COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS MODELOS DA GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA A 800°C COM 20 E 30% DE VAPOR E TAXA DE EQUIVALÊNCIA DE 20 E 30% EM FUNÇÃO DA PRESSÃO.



As Figuras 5.42 e 5.43 mostram a relação entre a decomposição térmica em três temperaturas diferentes (800, 1000 e 1400°C), voltados na formação molar de hidrogênio e metano respectivamente em função do agente oxidante, vapor de água e ar realizados separadamente.

FIGURA 5.42: COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ENTRE OS PROCESSOS DE GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA A 800,1000 E 1400°C EM FUNÇÃO DO OXIDANTE.

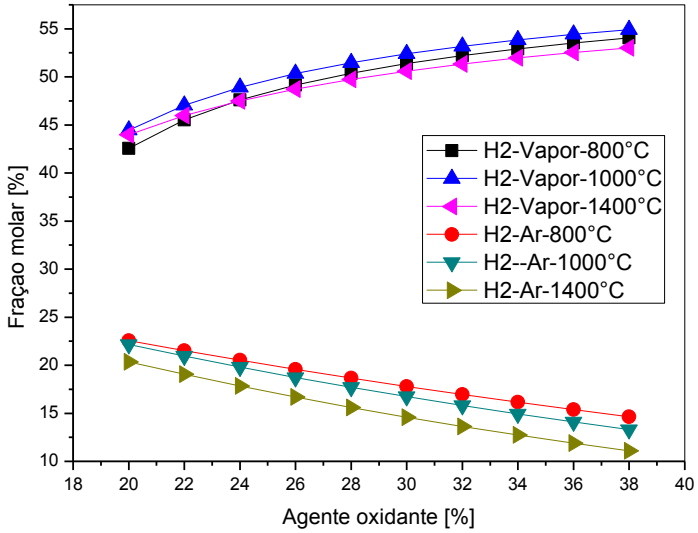
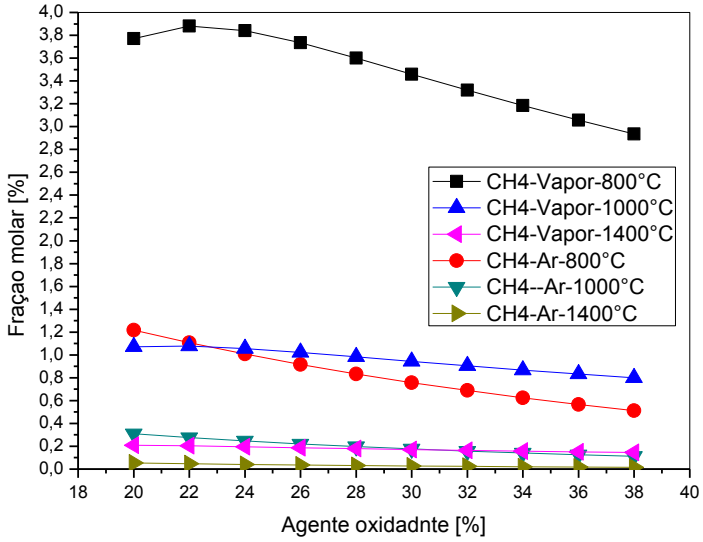


FIGURA 5.43: COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO DE METANO ENTRE OS PROCESSOS DE GASEIFICAÇÃO DE BARAÚNA A 800, 1000 E 1400°C EM FUNÇÃO DO OXIDANTE.



O aumento da fração de vapor de água contribui no aumento de hidrogênio, mas em temperatura acima de 1000°C ocorre o deslocamento irrisório da curva para baixo, por exemplo com 38% de vapor a 1400°C chega a 55% molar desse gás, enquanto o aumento na injeção de ar e temperatura faz decair a formação do mesmo.

Para esses dois processos a formação de metano é baixa, chegando no máximo a 3,8% molar com 20% de injeção de vapor de água a 800°C e decresce com o aumento do agente oxidante.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES

A validação dos modelos de gaseificação da reação biomassa-ar tem valores mais aproximados do experimento do que a reação biomassa-vapor, ambos têm boa concordância e de fato descreve bem o processo.

A simulação do processo aponta oportunidade para a produção de hidrogênio ou metano e é verificado que em temperatura alta favorece a formação de hidrogênio e em baixa tende a produzir mais metano.

O incremento de fração de vapor de água contribui no aumento da formação de hidrogênio, mas reduz a produção do metano e consequentemente também reduz o poder calorifico do gás de síntese. A gaseificação com vapor de água produz um combustível gasoso com poder calorífico bem maior do que a gaseificação com injeção de ar.

Comparando o efeito do tipo de biomassa gaseificada, verificou-se que a jurema preta apresenta as melhores condições de conversão considerando o poder calorifico do biogás resultante, seguida de umbuzeiro, catingueira, burra leiteira, maniçoba e finalmente baraúna.

O aumento da injeção de ar no sistema impacta na diminuição na formação do hidrogênio. Foi verificado que a gaseificação com vapor de água é bem mais eficiente do que usando ar, chegando a 58% usando 20% em massa de vapor a 800°C em pressão atmosférica.

O hidrogênio e o monóxido de carbono aumentam quando a temperatura também cresce, devido ao sentido das equações de dissociação fazendo o metano dissociar em hidrogênio ficando cada vez mais escasso. Foi verificado durante a análise que tanto o ar úmido quanto ele seco não impacta na formação do gás de síntese.

O aumento da injeção de vapor de água e a formação do monóxido de carbono oriundo da oxidação parcial, beneficia a formação do hidrogênio e dióxido de carbono devido ao equilíbrio químico.

Apenas 30,76% dessa massa de vapor de água injetada participa da dissociação na formação do monóxido de carbono e hidrogênio enquanto o restante favorece o meio.

A baraúna é o insumo de menor capacidade de produção tanto de hidrogênio quanto de metano na gaseificação com vapor de água. Na gaseificação m elevadas temperaturas a formação de metano se iguala com as demais amostras e o restante das biomassas apresentam grande capacidade de produção de hidrogênio por volta dos 58%.

O aumento tanto de vapor de água quanto de ar injetado no processo de gaseificação diminui o poder calorifico do gás de síntese e a eficiência energética, sendo que a utilização de vapor de água na gaseificação obtém poder calorifico e eficiência maior do que usando ar como oxidante.

O aumento na pressão de reação contribui no crescimento do poder calorifico do gás na gaseificação com vapor de agua, mas com injeção de ar o aumento da pressão impacta negativamente no conteúdo energético, O comportamento da A eficiência para ambos os processos analisados, é constante, sendo que a utilização de vapor tem patamar de eficiência bem maior do que usando ar para uma mesma quantidade de agente oxidante.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Fazer uma análise exergética entre os processos estudados, gaseificação com vapor de água, e o outro utilizando ar. Modelar a natureza desse processo semelhante, utilizando uma mistura de ar e vapor de água, fazendo a análise da composição do gás de síntese e eficiência energética e exergética.

Estudar a cinética do processo e o mecanismo de catálise na gaseificação em leito fluidizado com aplicações de elementos que favoreçam e direcionam as reações objetivas, aumentado sua produção e limpeza do gás de síntese por catálise.

Estudar qual a melhor forma de viabilizar o processo da gaseificação adquirindo catalisadores de baixo custo, eficiência e fazer uma análise termoeconômica da tecnologia de conversão em combustível líquido ou gasoso.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA (ANEEL). **Matriz de Energia Elétrica.** 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 5 jan. 2016.

ALVIM, Carlos Feu et al. Comparação da emissão de gases de efeito estufa (GEE) na geração nuclear de eletricidade no Brasil com as de outras fontes. **Economia e Energia,** Rio de Janeiro, p.1518-2932, dez. 2010.

AKINWALE O. Aboyade et al. Thermogravimetric study of the pyrolysis characteristics and kinetics of coal blends with corn and sugarcane residues. **Elsevier,** South Africa, p.310-320, ago. 2012

BEN - BALANÇO Energético Nacional . Empresa de Pesquisa Energética. 2015. Disponível em: < https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em: 01 jan. 2016

CESARETTI, Marcos de Araújo; MOREIRA, João Manoel Losada. **Análise comparativa entre fontes de geração elétrica segundo critérios socioambientais e econômicos.** 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia, Centro de Engenharias, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Abc, Santo André, 2010.

CORTEZ, L. A. B.; Lora, E. S.; Ayarza, J. A. C. Biomassa para Energia. Série Sistemas Energéticos. 2008. Cap. 1, Editora da Unicamp, pp. 15-27.

ÇENGEL Y.A, Boles M.A., Termodinâmica. 5ª ed. São Paulo. McGraw-Hill, 2006, 848 p.

CHANG, Alex C. C. et al. Biomass gasification for hydrogen production. **Elsevier.** Taiwan, p.114252-14260. maio 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário estatístico de energia elétrica.** 2013. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 3 jan. 2016.

FU, Qirang et al. Experimental and predicted approaches for biomass gasification with enriched air–steam in a fluidised bed. **Waste Management & Research,** China, v. 32, p.988-996, set. 2014.

FIGUEIREDO, Renata Andrade et al. Caracterização das biomassas da região nordeste para fins energéticos: resultados preliminares. **associação brasileira de engenharia e ciências mecânicas**, Congresso, Uberlândia, ago. 2014.

GUO, X.j. et al. Experimental study on air-stream gasification of biomass micron fuel (BMF) in a cyclone gasifier. **Bioresource Technology,** China, p.1003-1006, jul. 2008.

HIGMAN, Christopher; BURGT, Maarten van der.: Gasification. 2th. USA: Elsevier, 2008. 435p.

JARUNGTHAMMACHOTE, S.; DUTTA, A.. Equilibrium modeling of gasification: Gibbs free energy minimization approach and its application to spouted bed and spout-fluid bed gasifiers. **Energy Conversion And Management,** Thailand, p.1345-1356, jan. 2008.

JAYAH, T.h. et al. Computer simulation of a downdraft wood gasier for tea drying. **Biomass And Bioenergy,** Australia, p.459-469, fev. 2003.

KALINCI, Yildiz; HEPBASLI, Arif; DINCER, Ibrahim. Exergoeconomic analysis of hydrogen production from biomass gasification. **Fuel.** Canada, p. 187-198. jul. 2012.

LOHA, Chanchal; CHATTERJEE, Pradip K.; CHATTOPADHYAY, Himadri. Performance of fluidized bed steam gasification of biomass: Modeling and experiment. **Energy Conversion And Management,** India, v. 52, p.1583-1588, dez. 2010.

MA, Fuying et al. Thermogravimetric study and kinetic analysis of fungal pretreated corn stover using the distributed activation energy model. **Bioresource Technology,** China, p.417-422, nov. 2012.

MARTÍNEZ, Juan Daniel et al. Experimental study on biomass gasification in a double airstage downdraft reactor. **Biomass And Bioenergy,** Itajuba, v. 35, p.3465-3480, abr. 2011.

NASCIMENTO, F. S. **Dimensionamento de protótipo de gaseificador de resíduo combustíveis em leito horizontal**. 2014. 103f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2014.

NOGUEIRA, L.A.H.; Lora, E.E.S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199pp.

NUSSBAUMER, Th.; NEUENSCHWANDER, P., Hasler, Ph., Jenni, A., Bühler, R.: Technical and Economic Assessment of the Technologies for the Conversion of Wood to Heat, Electricity and Synthetic Fuels. Biomass for Energy and Industry. 10th European Conference and Technology Exhibition, June 8 – 11 1998, Würzburg, Germany, 1142 – 1145.

OUNAS, A. et al. Pyrolysis of olive residue and sugar cane bagasse: Non-isothermal thermogravimetric kinetic analysis. **Bioresource Technology,** Morocco, v. 102, p.11234-11238, set. 2011.

SAIT, Hani H. et al. Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology,** Malaysia, p.382-389, abr. 2012.

VISSOTTO, João Paulo et al. Gaseificação de serragem de pinus em leito fluidizado. **Revista Ciência e Tecnologia,** Campinas, v. 12, n. 32, p.2236-6733, jun. 2015.

PEREIRA, Emanuele Graciosa et al. Sustainable energy: A review of gasification technologies. **Renewable And Sustainable Energy Reviews,** Brasil, v.16, n.7, p.4753-4762, set. 2012.

PRABIR, Basu. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory. Oxford: Elsevier, 2010. 365 p.

QUITETE, Cristina P. B.; SOUZAB, Mariana M. V. M.. Remoção do alcatrão de correntes de gaseificação de biomassa: processos e catalisadores. **Quim. Nova,** Rio de Janeiro, v. 37, p.689-698, fev. 2014.

RENDEIRO, Gonçalo et al. Combustão e gaseificação de biomassa solida. 1ed. Brasília: Ministério de minas e energia, 2008. 192 p.

SILVA, Valter Bruno; ROUBOA, Abel. Using a two-stage equilibrium model to simulate oxygen air enriched gasification of pine biomass residues. **Fuel Processing Technology,** Portugal, v. 109, p.111-117, jul. 2012.

SUN, Yang et al. Gasification of biomass to hydrogen-rich gas in fluidized beds using porous medium as bed material. **International Journal Of Hydrogen Energy.** China, p. 14208-14213. nov. 2013.

YUN, Yongseung et all. Gasification for practical applications. Edited by Yongseung Yun. Croatia: intechopen, 2012. 338 p. ISBN 978-953-51-0818-4.

VELDEN, Manon Van de et al. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. **Renewable Energy,** Belgium, v. 35, p.232-242, jan. 2010.

VIANELLO, R. L., ALVES, A. R. Meteorologia Básica e Aplicações. 1. ed. Viçosa: UFV, 2004. p. 58 e 72.

XU, Yiliang; CHEN, Baoliang. Investigation of thermodynamic parameters in the pyrolysis conversion of biomass and manure to biochars using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology,** China, v. 146, p.485-493, out. 2013.

ANEXOS

ANEXO 1. ARTIGO PUBLICADO

Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia 2015
Lisboa, 29 de Junho a 2 de Julho, 2015
© APMTAC, Portugal, 2015

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO APLICADA A FONTES DE BIOMASSA DA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL.

Jorge R. Henríquez[1a], Jarmison A. Silva[1b], Renata A. Figueiredo[1c], Flávio A. B. Figueiredo[1a], Jacek S. Michalewicz[2], Rômulo S. C. Menezes[1d]