

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA PRODUÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE ATRAVÉS DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

Victor Ferreira Guimarães
Jornandes Dias da Silva



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Victor Ferreira Guimarães
Jornandes Dias da Silva

Estudo da Influência da Temperatura na Produção do Gás de Síntese Através da Gaseificação de
Biomassa

1ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

1ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Guimarães, Victor Ferreira
G519E Estudo da Influência da Temperatura na Produção do Gás de Síntese Através da
Gaseificação de Biomassa

/ Victor Ferreira Guimarães. Jornandes Dias da Silva. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2025

78 f.: il

DOI: 10.37423/2025.edcl1226

ISBN: 978-65-5367-714-2

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. gaseificação 2. ,biomassa 3. ,-syngas 4. ,-temperaura I. Guimarães, Victor Ferreira II. Silva,
Jornandes Dias da III. Título

CDU: 628

<https://doi.org/10.37423/2025.edcl1226>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos



10.37423/2025.edcl1226



PREFÁCIO

A matriz energética mundial é majoritariamente composta pela energia gerada por combustíveis de origem fóssil. O seu uso desses combustíveis tem trazido significativos impactos econômicos, ambientais e sociais e, devido a esses impactos, tem sido vista a renovação no interesse em incentivar a procura de novas fontes combustíveis, especialmente os de origem renovável, visando principalmente a diminuição dos danos ao meio ambiente e ao planeta. Biomassa é uma das fontes renováveis que estão em pauta para o crescimento da matriz energética renovável. O Brasil, historicamente, sempre se mostrou pioneiro em programas de substituição de fontes fósseis. Um exemplo é o Proálcool, uma iniciativa bem sucedida na década de 1970 visando produzir etanol como combustível automotivo. Outras iniciativas também visaram a geração de outros produtos renováveis, como biodiesel e de energia elétrica gerada por usinas alimentadas por biomassa. Dentre as várias rotas de conversão energética desse recurso, uma das menos exploradas comercialmente é a gaseificação da biomassa, uma tecnologia conhecida, mas que caiu em desuso com a popularização das fontes fósseis. O processo de gaseificação é relevante devido à produção de gás de síntese, útil para a produção de energia elétrica e de agentes químicos de interesse para a indústria. A gaseificação também é bastante flexível e pode ser adaptada para diversos combustíveis de origem orgânica, desde resíduos agrícolas e industriais, até lixo residencial e urbano, mas essa característica também traz desafios, uma vez que torna-se difícil garantir a uniformidade da composição do gás gerado, podendo dificultar bastante seu uso final. Para tentar garantir maior previsibilidade da composição do gás, é necessário entender bem os parâmetros-chave que regem o processo, como a configuração do reator utilizado, as características da biomassa e as características operacionais, sendo a temperatura do processo, a mais relevante. A partir do conhecimento das equações descritivas, das reações químicas que regem o processo e do uso de métodos numéricos, é possível analisar a previsibilidade da composição do gás gerado. A região nordeste do Brasil, com intensa atividade agrícola e industrial, possui uma grande disponibilidade de biomassa residual que, diversas vezes, não é aproveitada. Assim, é possível avaliar a influência da temperatura na produção de gás de síntese enquanto avaliando a viabilidade da produção de gás de síntese a partir das biomassas residuais da região nordeste.

Victor Ferreira Guimarães

vfg@poli.br

Jornandes Dias da Silva

jornandesdias@poli.br

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de biomassa.....	14
Figura 2 - Fontes de biomassa.....	15
Figura 3 - Bagaço de cana.....	20
Figura 4 - Bambusa vulgaris.....	20
Figura 5 - Tipos de gaseificadores de leito fixo: a) contracorrente; b) co-corrente.....	26
Figura 6 - Tipos de gaseificadores de leito fluidizado: a) borbulhante; b) circulante.....	28
Figura 7 - Aplicações do gás de síntese.....	33
Figura 8 - Tabela utilizada para automatização do método Newton-Rhapson.....	47
Figura 9 - Variação da composição do gás de síntese gerado por biomassa, variando a temperatura.....	51
Figura 10 - Produção do gás de síntese gerado variando a temperatura.....	52
Figura 11 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura, utilizando oxigênio puro como agente gaseificante.....	54
Figura 12 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e o agente gaseificante (ar e O ₂).....	55
Figura 13 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e o agente gaseificante (Ar, O ₂ , mistura O ₂ + vapor).....	57
Figura 14 - Relação H ₂ /CO do gás de síntese gerado, variando a temperatura e o agente gaseificante (Ar, O ₂ , mistura O ₂ + vapor).....	57
Figura 15 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e o agente gaseificante (Ar, O ₂ , mistura O ₂ + vapor, vapor puro).....	59
Figura 16 - Relação H ₂ /CO do gás de síntese gerado, variando a temperatura e o agente gaseificante (Ar e mistura O ₂ + vapor, vapor puro).....	59
Figura 17 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão vapor/biomassa.....	60
Figura 18 - Relação H ₂ /CO do gás de síntese gerado, variando a temperatura e razão vapor/biomassa	

.....	60
Figura 19 - Relação entre a razão de equivalência e a conversão percentual do carbono no processo de gaseificação.....	63
Figura 20 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando o ar como agente gaseificante.....	63
Figura 21 - Comparação da relação H ₂ /CO do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando o ar como agente gaseificante.....	64
Figura 22 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando o oxigênio como agente gaseificante.....	64
Figura 23 - Comparação da relação H ₂ /CO do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando o oxigênio como agente gaseificante.....	65
Figura 24 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando a mistura oxigênio + vapor d'água (S/B = 0,85) como agente gaseificante.....	65
Figura 25 - Comparação da relação H ₂ /CO do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando a mistura oxigênio + vapor d'água (S/B = 0,85) como agente gaseificante.....	66
Figura 26 - Variação da composição do gás em função da razão de equivalência, para temperatura de 800 °C, usando ar como agente gaseificante.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas do poder calorífico do gás-produto da gaseificação em função do agente gaseificante utilizado.....	23
Tabela 2 - Propriedades da biomassa com efeitos significativos no processo.....	24
Tabela 3 - Esquematização sequencial da operação típica de um gaseificador.....	25
Tabela 4 - Comparação das características operacionais dos principais tipos de gaseificadores.	29
Tabela 5 - Comparação das características operacionais dos principais tipos de gaseificadores.	30
Tabela 6 - Vantagens e desvantagens dos principais tipos de gaseificadores.....	30
Tabela 7 - Correspondência da composição do gás de síntese com seu uso final..	34
Tabela 8 - Requisitos, vantagens e desvantagens para aplicações comuns do gás de síntese.....	34
Tabela 9 - Critérios qualitativos para escolha da configuração do gaseificador.....	35
Tabela 10 - Critérios qualitativos para escolha da configuração do gaseificador quanto às condições de pré e pós processamento.....	37
Tabela 11 - Critérios qualitativos para escolha da configuração do gaseificador quanto às condições operacionais.....	37
Tabela 12 - Resumo das considerações simplificadores para as modelagens do Processo.....	39
Tabela 13 - Propriedades químicas de bambusa vulgaris de acordo com suas características ao recebimento (ar) e depois de secagem e retirada das cinzas (daf).....	40
Tabela 14 - Propriedades químicas do bagaço de cana de acordo com suas características ao recebimento (ar) e depois de secagem e retirada das cinzas (daf).....	40

Tabela 15 - Comparação entre os poderes caloríficos dos combustíveis comparados a partir das equações empíricas e de medições encontradas na literatura.....	41
Tabela 16 - Validação dos resultados experimentais para as constantes de equilíbrio a partir das comparações entre as equações empíricas e os dados tabelados.....	43
Tabela 17 - Valores iniciais e critério de tolerância para o cálculo da composição do gás de síntese gerado.....	44
Tabela 18 - Valores iniciais e critério de tolerância para o cálculo da composição do gás de síntese gerado.....	46
Tabela 19 - Critérios para seleção dos autores utilizados como padrão para validação dos resultados.....	48
Tabela 20 - Teste de validação dos resultados a partir da comparação do modelo calculado nesta dissertação com os dados experimentais e calculados por Loha et al. (2011).....	48
Tabela 21 - Teste de validação dos resultados a partir da comparação do modelo calculado nesta dissertação com os dados experimentais e calculados por Silva (2016).....	48
Tabela 22 - Composição do gás de síntese gerado por biomassa, variando a Temperatura.....	50
Tabela 23 - Características do gás de síntese gerado por biomassa, variando a Temperatura.....	51
Tabela 24 - Composição do gás de síntese gerado por biomassa, variando a temperatura e o agente gaseificante.....	53
Tabela 25 - Características do gás de síntese gerado variando o agente gaseificante.....	53
Tabela 26 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura, utilizando oxigênio puro como agente gaseificante.....	54
Tabela 27 - Comparação do poder calorífico do gás de síntese gerado variando a temperatura, utilizando ar e oxigênio puro como agentes gaseificantes.....	54
Tabela 28 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura, utilizando como	

agente gaseificante uma mistura de oxigênio e vapor d'água em uma nova proporção.....	56
Tabela 29 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura, utilizando Como agente gaseificante uma mistura de oxigênio e vapor d'água numa nova Proporção.....	
	56
Tabela 30 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura, utilizando como agente gaseificante uma mistura de ar e vapor d'água numa nova proporção....	
	56
Tabela 31 - Composição do gás de síntese utilizando vapor d'água como agente gaseificante, variando a temperatura e a razão vapor/biomassa.....	
	58
Tabela 32 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura e a razão vapor/biomassa.....	
	61
Tabela 33 - Crescimento percentual das espécies químicas do gás de síntese.....	
	61
Tabela 34 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando o ar como agente gaseificante.....	
	67
Tabela 35 - Correspondência entre os critérios para uso do gás de síntese e as condições operacionais capazes de gerar um gás que atenda aos critérios de forma otimizada.....	
	68
Tabela 36 - Estimativa de menor custo e suas possíveis aplicações.....	
	69

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 BIOMASSA	13
3.1.1 CLASSIFICAÇÕES E PROPRIEDADES.....	13
3.1.2 CONVERSÃO DA BIOMASSA EM ENERGIA	17
3.1.3 CONTEXTUALIZANDO PARA A DISPONIBILIDADE DE BIOMASSA NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL	19
3.1.4 CONVERSÃO ENERGÉTICA	21
3.2 GASEIFICAÇÃO	22
3.2.1 GASEIFICADORES E SUAS TECNOLOGIAS	25
3.2.1.1 GASEIFICAÇÃO EM LEITO FIXO	25
3.2.1.2 GASEIFICAÇÃO EM LEITO FLUIDIZADO	27
3.2.2 PÓS-PROCESSAMENTO.....	29
3.2.3 CONDIÇÕES OPERACIONAIS E CRITÉRIOS DE SELEÇÃO	29
3.3 GÁS DE SÍNTESE	31
3.3.1 EFEITO DO PROCESSO NA COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE	31
3.3.2 APLICAÇÕES DO GÁS DE SÍNTESES.....	32
4. METODOLOGIA	35
4.1 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO	35
4.2 AVALIAÇÃO TEÓRICA	38
4.2.1 PODER CALORÍFICO DOS COMBUSTÍVEIS	40
4.2.2 COMPOSIÇÃO E PODER CALORÍFICO DO GÁS DE SÍNTESE GERADO	41
4.3 FERRAMENTAS.....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	47

5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	49
5.2.1 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE SÍNTESE GERADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA AS DUAS BIOMASSAS SELECIONADAS	50
5.2.2 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE SÍNTESE GERADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DO AGENTE GASEIFICANTE.....	52
5.2.2.1 COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO E DAS CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE SÍNTESE GERADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA, VARIANDO O AGENTE GASEIFICANTE ENTRE O AR E O OXIGÊNIO PURO.....	53
5.2.2.2 COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO E DAS CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE SÍNTESE GERADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA, VARIANDO O AGENTE GASEIFICANTE ENTRE O AR E UMA MISTURA DE OXIGÊNIO PURO E VAPOR D'ÁGUA	55
5.2.2.3 COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO E DAS CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE SÍNTESE GERADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA, VARIANDO O AGENTE GASEIFICANTE ENTRE O AR E O VAPOR D'ÁGUA.....	57
5.2.3 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE SÍNTESE GERADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA, DO AGENTE GASEIFICANTE E DA RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA.....	62
5.3 USOS DO GÁS DE SÍNTESE	67
6. CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1. INTRODUÇÃO

Desde o século XX a matriz energética mundial tem sido predominantemente dominada por fontes de energia não-renováveis. Neste contexto, o carvão tem sido uma fonte geradora principal da revolução industrial e, com o posterior desenvolvimento da indústria energética, bem como a do petróleo. A partir da década de 1960, o petróleo tornou-se a principal fonte de energia em escala mundial, sendo responsável por 33% da matriz energética mundial no ano de 2018 (BP, 2019) e por 34,4% da matriz energética brasileira (BEN, 2019). Levando em conta outras fontes de energia não-renováveis, como carvão e o gás natural, essa estatística cresceu para aproximadamente 85% da produção energética mundial (BP, 2019) e para 54,7% da produção brasileira (BEN, 2019), evidenciando a dependência mundial de tais fontes para a manutenção da matriz energética.

Como foi dito no parágrafo acima, essas fontes não podem ser vistas como uma solução permanente às demandas energéticas globais, apesar de sua predominância atual. Primeiramente, por motivos econômicos uma vez que as reservas são limitadas e que os recursos não são igualmente distribuídos entre os países, o custo dessa fonte energética pode aumentar drasticamente com os anos e a crescente demanda. Segundo, é sabido que essas fontes não-renováveis causam grave impacto ambiental, com eventos climáticos tomando proporções mais extremas, afetando, direta ou indiretamente, outros setores da economia e impactando a qualidade de vida da população em geral.

A partir dos danos possíveis do uso das fontes não-renováveis, há uma tendência de investimentos na obtenção de fontes de energia alternativas, na tentativa, de evitar o ciclo vicioso da atual matriz energética. A matriz energética brasileira apresenta ampla participação de fontes de energia renovável, chegando a 45,3% em 2018 (BEN, 2019). Analisando o histórico deste percentual, nota-se que a participação de renováveis vem crescendo desde 2014, ano em que a participação foi de 39%. Enquanto que esse crescimento pode ser justificado devido a um incremento da produção advinda de fontes hídrica e eólica, por exemplo, deve-se levar em conta a retração da economia acarretou na diminuição da demanda interna de setores chave, como a industrial, o metalúrgico e o de transportes.

Levando em conta um novo cenário de crescimento econômico, a crescente demanda por energia elétrica, faz-se necessário o investimento em fontes de energia menos danosas. Historicamente, o Brasil se mostra pioneiro em programas de substituição de fontes fósseis. O Proálcool, lançando em 1975, por exemplo, foi uma estratégia extremamente bem sucedida. Estima-se que o programa tenha sido responsável por evitar a emissão de 110 milhões de toneladas de carbono e pela importação de aproximadamente 550 milhões de barris de petróleo, sem falar de uma economia de divisas na ordem

de 11,5 bilhões de dólares (Biodiesel BR, 2012). O Proálcool pode servir de inspiração para a implantação de outros programas de substituição de fontes fósseis como a biomassa. Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2008) citou a biomassa como uma das fontes para produção de energia com o maior potencial de crescimento, o que se traduziu em, aproximadamente, 31% da matriz energética brasileira, considerando todos os produtos advindos da biomassa, como etanol, biodiesel ou mesmo energia elétrica gerada por termelétricas alimentadas por biomassa.

Há várias rotas tecnológicas para a conversão de biomassa em energia, cujos processos podem ser agrupados em duas categorias principais: biológicos ou termoquímicos. A eficiência de cada processo depende diretamente do tipo de biomassa utilizado como combustível e de seu objetivo final. Dentre os vários processos, existem os mais explorados, como a fermentação para produção de etanol ou a combustão, usada em termelétricas que tem como fonte principal biomassa residual, e os ainda em desenvolvimento para uso competitivo, como o processo de gaseificação. Este último processo, apesar de sua tecnologia ser conhecida há bastante tempo, caiu em desuso com a popularização do uso do petróleo e de seus derivados, mas teve seu interesse renovado a partir da década de 1980, com o começo das preocupações a respeito do uso de combustíveis fósseis. O processo de gaseificação consiste, resumidamente, na transformação de um combustível, seja sólido ou líquido, num gás energético, conhecido como gás de síntese (H_2 e CO), que é um composto intermediário extremamente versátil para obtenção de diversos produtos finais ou para a geração de energia elétrica.

O processo é bastante flexível e pode ser adaptado à realidade brasileira, em específico, a região nordeste, levando em conta o tipo de biomassa residual gerada na região e limitações orçamentárias e por vez que seu potencial energético é bastante similar ao de outros processos termoquímicos, como o de combustão, mas com a vantagem de produzir um composto com maior potencial de aproveitamento, é possível justificar o estudo para tentar superar suas desvantagens, como a dificuldade de obter um gás de qualidade, confiabilidade e segurança.

A necessidade do uso de processos como o de gaseificação também pode ser justificada através da otimização de recursos residuais para atender à crescente demanda energética. No contexto deste cenário, a pesquisa pretende responder a pergunta de como aproveitar a biomassa disponível da melhor forma possível para geração de energia, através da produção de gás combustível.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Verificar a influência da temperatura no processo de gaseificação de biomassa residual encontrada comumente no Nordeste para a geração de gás combustível utilizando ferramentas de métodos numéricos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar tipos de biomassa residual comumente encontrados na região Nordeste que sejam próprias para o processo;
- Avaliar quais as combinações mais eficientes entre os tipos de biomassa disponíveis no nordeste e as configurações existentes dos gaseificadores;
- Analisar os melhores usos para o gás combustível gerado;
- Avaliar a influência da temperatura na composição do gás combustível gerado;
- Aplicar um modelo matemático para descrever o processo de gaseificação;
- Utilizar métodos numéricos para obter os resultados.

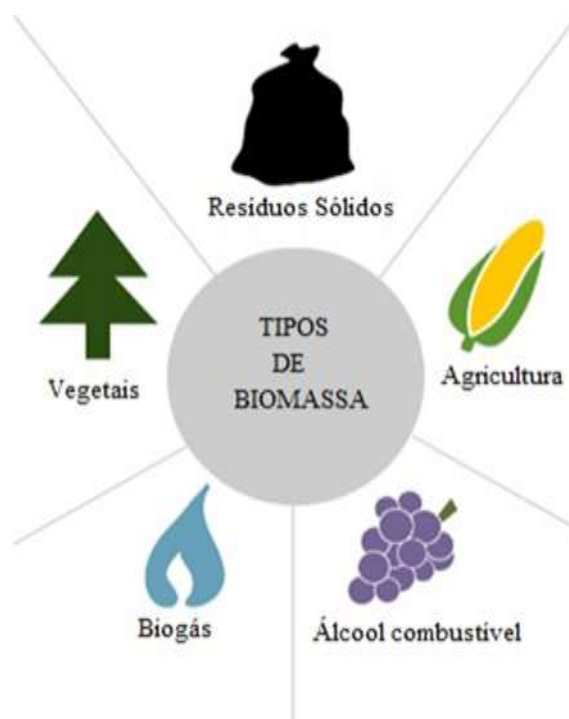
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BIOMASSA

Segundo Ur-Rehman et al. (2015), a biomassa pode ser definida como um material orgânico, de origem animal ou vegetal, usado para a produção de energia, tais como calor e eletricidade, ou em vários processos industriais como matéria-prima para uma vasta gama de produtos. É uma fonte energética importantíssima para a humanidade, tendo sido extensivamente usado ao longo dos anos e, mesmo nos dias atuais, corresponde a uma ordem de grandeza de 10% da matriz energética mundial (IEA, 2018).

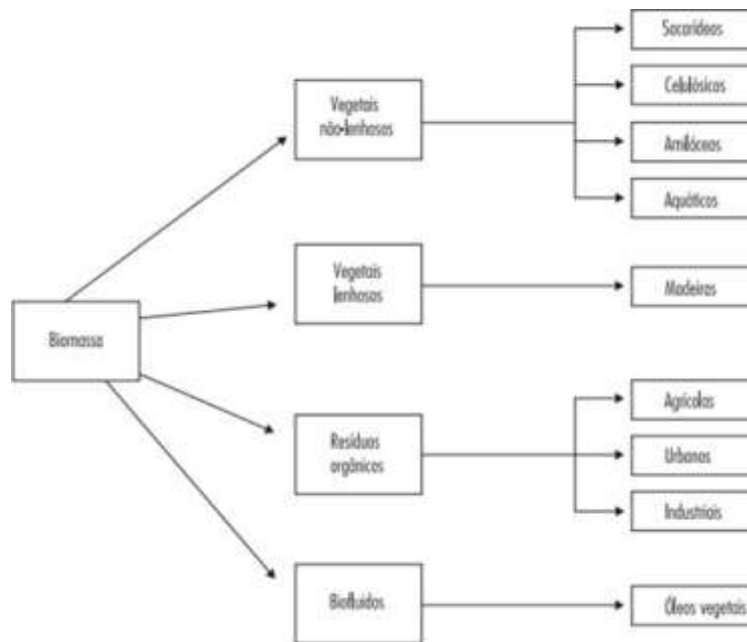
3.1.1 CLASSIFICAÇÕES E PROPRIEDADES

A literatura separa a biomassa em quatro tipos principais: vegetais e agrícolas, resíduos sólidos, biogás e álcoois combustíveis.

Figura 1 - Tipos de biomassa.

Fonte: EIA (2018), adaptado.

Segundo Cortez et al. (2008), biomassas podem ser divididas em quatro grupos principais, que são os vegetais lenhosos, vegetais não-lenhosos e resíduos e os biofluidos. Sua obtenção pode ser feita através de diversas fontes, desde plantações específicas para aproveitamento energético até resíduos, cuja origem pode ser agrícola, florestal, industrial ou mesmo urbana. A biomassa residual é a que tem mais potencial para gerar energia, mas é necessário competir com usos alternativos destes resíduos, como ração animal, fertilizantes e outros fins, assim como determinar quais resíduos melhor aproveitados para a geração energética.

Figura 2 - Fontes de biomassa

Fonte: Ministério de Minas e Energia (1982)

Plantações para aproveitamento energético já foram propostas em diversas ocasiões como alternativas econômicas para a geração de energia. Para melhor potencial energético, a plantação deve focar em biomassas de fontes como madeiras, gramíneas ou herbáceas, de colheitas mais perenes, assim como plantações de cana de açúcar e oleaginosas, com colheitas mais intermitentes, mas com maior aproveitamento energético. Uma plantação energética ideal requer que as plantas em questão sejam de baixo custo de manutenção e plantação, assim como baixa demanda de nutrientes, para evitar competição com o agronegócio, e que a colheita seja de alto rendimento.

Dentre as diversas fontes de resíduos, destaca-se a origem agrícola, obtidos através das atividades de colheita dos produtos agrícolas. Estão nesta posição tanto pelo fato que muitos resíduos dessa origem já são usados para a produção energética quanto pela quantidade produzida. Só o Brasil, por exemplo, produz mais que 739 mil toneladas métricas apenas de cana de açúcar (World Atlas, 2017) e que, segundo Martinez-Hernandes et al. (2017), o processamento da cana de açúcar gera 270 toneladas de bagaço para cada 1000 toneladas da cana processada, o que equivale, aproximadamente, a 200 mil toneladas métricas de bagaço de cana de açúcar produzidas apenas no Brasil, o que alimenta, a despeito das perdas, um já bem sucedido processo de obtenção de etanol automotivo, o maior produto energético obtido da biomassa (CORTEZ et al., 2008).

Outros resíduos importantes são os de origem florestal, que vem encontrando cada vez mais mercado devido à alta disponibilidade e baixo custo para sua utilização eficiente. Também temos os resíduos de origem animal, caracterizados tipicamente por excrementos das criações mais importantes, que também são gerados em grande quantidade, mas que seu uso para geração de energia ainda não é tão desenvolvido.

E, finalmente, os resíduos urbanos e industriais. Os primeiros são produzidos em residências e comércios, enquanto os últimos são resultado da atividade industrial, podendo ser dos mais variados tipos, desde cavacos de madeira a afluentes de matadouros. Estes resíduos, mais heterogêneos, exigem processos com maior desenvolvimento tecnológico agregado para seu uso eficiente, o que onera o processo e dificulta sua reprodução e análise a nível mundial.

De uma forma genérica, biomassa pode ser convertida em três produtos finais: diretamente em energia (seja elétrica ou térmica), combustível ou matéria-prima química. Para entender os processos de conversão e estudar sua viabilidade e eficiência, é necessário compreender melhor as propriedades da biomassa. McKendry (2002) sugere que as principais propriedades de interesse para a produção de energia são:

- **Umidade:** pode ser metrificada a partir de seu percentual intrínseco ou de seu percentual extrínseco, que adiciona efeitos externos ao total de umidade presente na biomassa. O percentual de umidade impacta diretamente na forma de converter biomassa em energia. Para processos térmicos serem aproveitados de forma otimizada, esse percentual tem que ser abaixo de 50%, enquanto que para processos biológicos, o percentual pode ser maior.
- **Poder calorífico:** mede a quantidade de energia por massa liberada por um material a partir de uma reação de combustão, tendo como meio o ar. Pode ser expressado em duas formas, o poder calorífico superior (PCS) ou bruto, ou o poder calorífico inferior (PCI) ou líquido. A primeira forma descreve o total de energia liberada, incluindo o calor latente contido no vapor d'água, representando a energia máxima possível de aproveitamento através de uma fonte de origem de biomassa. O percentual aproveitado dependerá da tecnologia utilizada e da forma de transporte desta energia, que pode ser feita por meio de vapor d'água, gás, óleos, etc. De formas mais práticas, a energia contida no vapor d'água não pode ser efetivamente aproveitada, tornando a segunda forma, o PCI, mais apropriada para mensurar a energia disponível.

- **Proporção de carbonos fixos e de voláteis:** A energia armazenada em combustíveis, como por exemplo o carvão, se apresenta em duas formas, a matéria volátil e os carbonos fixos. A primeira consiste da porção de matéria do combustível que escapa na forma de gás através do aquecimento. Testes são feitos para aquecimento a 950 °C por 7 minutos. A segunda forma consiste da massa que forma depois da liberação dos voláteis, excluindo cinzas e umidade. Geralmente, são medidos em laboratório e permitem uma estimativa da facilidade de ignição, gaseificação e oxidação da biomassa.
- **Conteúdo de cinzas e resíduos:** Sempre que submetido a um processo termoquímico ou bioquímico, a biomassa produz um resíduo sólido. No caso específico do resíduo gerado a partir da reação de combustão com o ar, o resíduo é chamado de cinza. Os resíduos são um parâmetro mensurável para um combustível, podendo afetar tanto o manuseio quanto os custos de processamento, quanto a conversão de energia.
- **Conteúdo de metais alcalinos:** Metais alcalinos, como sódio e potássio, podem estar presentes na composição química de um combustível e podem afetar processos termoquímicos de conversão de energia. Esses metais podem reagir com o conteúdo de sílica presente nas cinzas produzindo um líquido viscoso, que pode vir a causar bloqueios em dutos de fornalhas ou caldeiras.
- **Proporção entre Celulose e Lignina:** Devido à diferença da biodegradabilidade dos dois compostos, pode afetar diretamente o rendimento de um processo bioquímico de conversão. A escolha da biomassa com as proporções corretas podem tornar o processo mais eficiente que o potencial energético bruto, como poder calorífico.

As propriedades podem ser mais ou menos relevantes dependendo do processo a ser usado e do produto final.

3.1.2 CONVERSÃO DA BIOMASSA EM ENERGIA

Existem diversos processos para conversão da biomassa em formas úteis de energia. Fatores que influenciam a escolha de um processo variam desde o tipo e a quantidade da biomassa escolhida e a forma desejada de energia. Fatores como requisições para o uso final da energia e questões ambientais ou econômicas podem ser também relevantes para escolha de um processo. Todos os processos seguem duas tecnologias de conversão: a termoquímica e a biológica.

A rota termoquímica oferece três diferentes processos principais para conversão da biomassa em energia: combustão, gaseificação e pirólise, descritos brevemente:

Combustão: A queima de biomassa usando o ar como meio para produzir gases quentes a temperaturas entre 800 e 1000 °C. É possível queimar qualquer tipo de biomassa, mas o processo é viável para aquelas com teor de umidade abaixo de 50%. A escala do uso também varia bastante, podendo ser usado desde para processos domésticos até alimentação industrial, com potências entre 100 e 3000 MW (McKendry, 2002). O processo tem uma eficiência estimada entre 20 e 40%. Os melhores valores são obtidos em processos de escalas maiores. É uma reação usada para vários fins, como a conversão da biomassa em calor, energia mecânica e eletricidade. É um dos principais métodos de alimentação de fornos, caldeiras, turbinas a vapor, geradores, etc.

- **Gaseificação:** Consiste da conversão de biomassa em uma mistura de gás- combustível através da oxidação parcial a altas temperaturas, normalmente em torno de 800 °C. É possível ser feito com qualquer tipo de biomassa, também preferindo as de menor teor de umidade. Escala do uso varia do doméstico ao industrial. Os gases produzidos têm baixo poder calorífico e podem ser usados tanto para gerar energia através da queima direta, quanto como matéria-prima para outros produtos.
- **Pirólise:** É a conversão de biomassa para suas frações líquidas, sólidas ou gasosas através do aquecimento em temperaturas em torno de 500 °C, na ausência de ar. Fator determinante para uso eficiente é a baixa umidade da biomassa em questão. Produz desde carvão vegetal a bio-óleo. O processo apresenta problemas, como a corrosividade e a estabilidade térmica de produtos como os bio-óleos, sendo necessários processos posteriores para garantir o uso em certas aplicações.

Já a rota biológica oferece dois processos: fermentação e digestão. Descrevendo brevemente:

- **Fermentação:** usado em larga escala para conversão de açúcar ou amido em álcool. O processo ocorre através da ação de enzimas e leveduras que convertem quimicamente cana de açúcar ou milho em etanol. Posterior processo de destilação é necessário para uso do produto final. Resíduos podem ser geralmente reaproveitados noutros processos.
- **Digestão:** Também chamada de digestão anaeróbia, é a conversão de matéria orgânica diretamente para biogás, uma mistura de metano e dióxido de carbono e outras espécies gasosas em menor quantidade. O meio anaeróbio estimula a produção do gás, que tem um

poder calorífico entre 20 e 40% da matéria-prima. É uma tecnologia já usada e reconhecida no mercado, geralmente usada para tratar resíduos orgânicos de alta umidade. Biogás pode ser usado para gerar calor ou energia elétrica.

3.1.3 CONTEXTUALIZANDO PARA A DISPONIBILIDADE DE BIOMASSA NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

Os resíduos de biomassa gerados na região nordeste podem ser divididos em resíduos da atividade madeireira, agrícolas e de processos industriais. Resíduos da atividade madeira são produzidos pela produção de produtos que usam esses vegetais para suas atividades-fim, como cavacos de madeira deixados por serralharias. Resíduos agrícolas incluem folhas, galhos e outros dejetos produzidos em colheitas. Os produtos residuais primários produzidos por atividade são, respectivamente, o licor negro produzido pela indústria de celulose e o bagaço da cana de açúcar, produzido pelo setor sucroalcooleiro. Dentre as três fontes, os resíduos agrícolas e industriais são os mais numerosos e disponíveis na região (ANSELMO FILHO, 2004).

Essa disponibilidade se dá devido aos setores sucroalcooleiro e de celulose, bem estabelecidos na região. Tanto a produção de açúcar quanto a de álcool produzem bagaço como principal resíduo.

O Brasil é líder mundial na produção de cana de açúcar e, apesar de que a maioria da produção se concentra no Sudeste, devido à topografia mais favorável à mecanização das lavouras, a indústria nordestina se mostra bastante relevante, com aproxima 6,5% da produção nacional, totalizando 41,14 milhões de toneladas na safra 2017/2018 (CONAB, 2018). De acordo com Moreira e Goldemberg (1999), a produção de uma tonelada de açúcar requer, aproximadamente, 8,5 toneladas de cana de açúcar, enquanto que 1 metro cúbico de etanol requer 12,5 toneladas. O peso aproximado do bagaço produzido, com 50% de percentual de umidade, é de 30% do peso da cana de açúcar utilizada (CODECEIRA NETO, 1999), o que resultaria numa estimativa de 12,34 milhões de toneladas de bagaço produzidas no Nordeste considerando a safra de 2017/2018. O uso do bagaço de cana encontra competição com a prática de geração de energia diretamente pelo fornecedor, através de caldeiras num ciclo integrado, sem secagem prévia.

Figura 3 - Bagaço de cana



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Iznaga-Bagasse.jpg>

Os resíduos da atividade canavieira, como folhas e outros pedaços não utilizados para a produção, tem um peso estimado de 4% do peso total da cana de açúcar (JORAPUR; RAJVANSI, 1997), com uma recuperação estimada de 30% desses resíduos devido à baixa mecanização da colheita nordestina (ANSELMO FILHO, 2004), totalizando 493 mil toneladas de resíduos com potencial de reaproveitamento para uso energético.

Figura 4 - Bambusa vulgaris



Fonte: https://static.wixstatic.com/media/1da931_2cfb69a1df8f464386d2163a450912e7~mv2.jpg

A escolha do bagaço de cana como produto principal para aproveitamento energético parece bastante lógica devido à sua abundância já inerente à importância do setor sucroalcooleiro, mas é necessário

lembrar que seu período de colheita é de, aproximadamente, 167 dias por ano (MOREIRA; GOLDEMBERG, 1999). A partir deste fato, para manter sustentável a produção de energia através da biomassa, é necessário um segundo produto para suprir potenciais ausências do volume projetado para o bagaço de cana. As várias indústrias de tratamento de celulose utilizam diversas matérias-primas, como bambus, eucaliptos, sisais e outras fibras. De todos esses, a biomassa cujas propriedades mais se aproximam das do bagaço é o bambu utilizado para a indústria de celulose (ANSELMO FILHO, 2004).

Bambu é um termo genérico utilizado para descrever um particular grupo taxonômico, que se subdivide em duas tribos, a bambuseae (lenhosos) e a olyrae (herbáceos). Existem mais de 80 espécies de bambu no Brasil, sendo a mais comum a bambusa vulgaris. A região nordeste oferece as condições mais favoráveis para o cultivo da espécie devido ao clima e umidade. Plantações de bambu são utilizadas por grupos comerciais ligados à indústria de celulose na região, produzindo resíduos agrícolas e resíduos industriais, que podem ser aproveitados pelo seu potencial energético. Curiosamente, a produção de bambu também compartilha com a cana de açúcar requisitos similares quanto às necessidades de condições climáticas e do solo (ANSELMO FILHO, 2004).

3.1.4 CONVERSÃO ENERGÉTICA

Para escolher um processo eficiente de conversão energética das biomassas escolhidas, tomou-se por base um critério simples, o teor de umidade. O bagaço de cana, com aproximadamente 50% (CODECEIRA NETO, 1999), e o bambusa vulgaris, com aproximadamente 35% (JARDIM, 1997), indicam que processos termoquímicos seriam mais indicados.

É notável citar que independente do processo utilizado, a energia total disponível da matéria-prima é a mesma. A eficiência do processo determina quanto dessa energia é possível aproveitar enquanto que a natureza do processo determina a forma de obtenção dessa energia. Avaliando os processos, o processo de pirólise deve ser desconsiderado devido à requisição de menor teor de umidade que os outros dois processos e ao encarecimento do processo, dada a necessidade de fases posteriores para tratamento do produto final, como bio-óleos. Comparando os dois processos restantes, tomou-se em consideração a eficiência energética e a utilidade do produto final. No processo de combustão, o único produto obtido são os gases quentes resultantes da queima, que podem ser usados de forma bastante eficiente, seja para aquecimento direto, seja para produção de vapor, mas para a conversão em eletricidade, por exemplo, cai para até uma ordem de 15% para um ciclo simples, como os encontrados

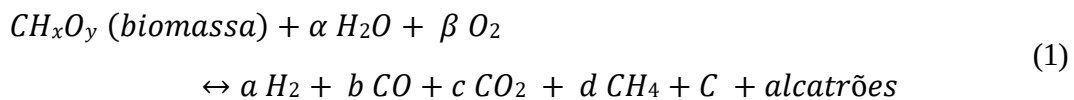
no Nordeste. Já o processo de gaseificação gera gás de síntese, que pode ser mais facilmente armazenado e usado como combustível direto para um motor ou turbina a gás e como substrato para a produção de vários outros produtos úteis.

Dessa forma, pode-se concluir que se o uso final da biomassa for aquecimento ou geração de vapor, o processo de combustão seria mais recomendado. Em contrapartida, o processo de gaseificação se mostra mais flexível devido às vastas aplicações que o gás gerado pode trazer, como a produção mais sustentável de vários compostos, como hidrocarbonetos e metanol que, por sua vez, pode gerar gasolina, diesel e olefinas.

3.2 GASEIFICAÇÃO

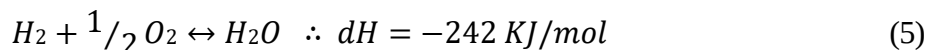
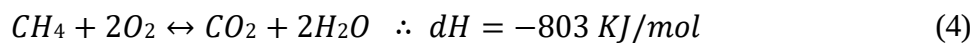
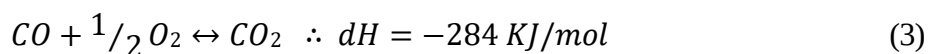
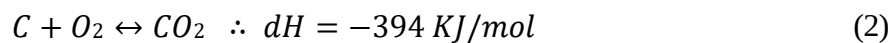
O processo de gaseificação pode ser definido como a conversão da biomassa para um combustível gasoso através de seu aquecimento num meio gaseificante, como ar, oxigênio ou vapor (MCKENDRY, 2001). Diferentemente da combustão, em que o processo de oxidação é feito de forma completa no processo, a gaseificação converte a energia química intrínseca do carbono em um gás combustível em mais de um estágio, descrito pela química da reação (BASU, 2010), resumida a seguir:

Reação Geral de Gaseificação:

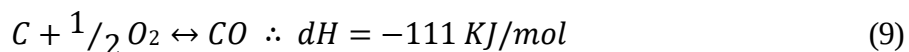
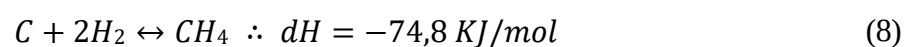
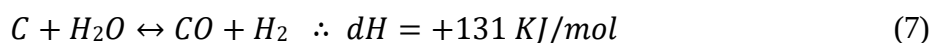
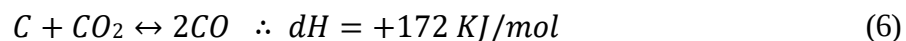


A reação geral ocorre mediante reações intermediárias:

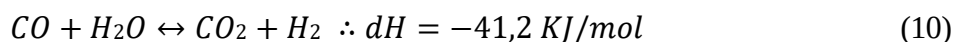
Reações de oxidação:



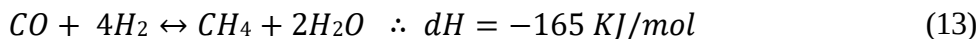
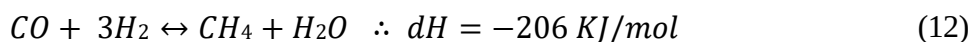
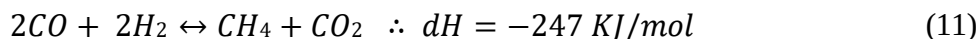
Reações do carbono:



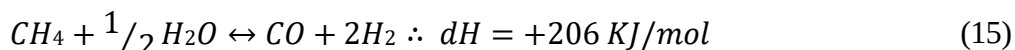
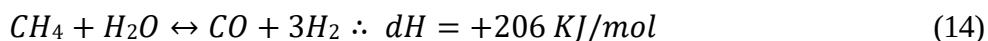
Reação de mudança do vapor d'água:



Reações com metano:



Reações de reforma do vapor d'água:



As reações acima descrevem sucintamente o que acontece no gaseificador. Apesar da contrastante diferença de energia liberada entre a oxidação completa e a parcial, os produtos da gaseificação, como monóxido de carbono, hidrogênio e vapor d'água podem continuar a reagir durante o processo de gaseificação.

Também é importante notar que as reações são todas reversíveis, podendo seguir o caminho direto ou inverso dependendo das condições de temperatura, pressão e concentração das espécies químicas. O processo ocorre em altas temperaturas, normalmente entre 500 e 1400 °C, e a pressão pode variar entre a atmosférica até 33 bar.

As equações demonstram como os gases-produto do processo, uma mistura de monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, hidrogênio, vapor d'água, além de outros hidrocarbonetos, como alcatrões, que geralmente são compostos aromáticos, como o benzeno, e impurezas. Seu uso pode ser analisado através de sua qualidade energética e de sua composição química. A qualidade energética dos gases-produto podem ser alteradas variando o agente da gaseificação, os métodos de operação e as condições operacionais do processo. De forma simplificada, pode-se resumir as faixas de qualidade do gás-produto através de seu poder calorífico:

Tabela 1 - Faixas do poder calorífico do gás-produto da gaseificação em função do agente gaseificante utilizado

Poder calorífico (MJ/m ³)	Agente Gaseificante
4 a 7	Ar ou mistura vapor d'água/ar
10 a 18	Vapor d'água
12 a 28	Oxigênio

Fonte: Basu (2010), adaptado.

Gases de baixo poder calorífico são usados para combustão direta ou como combustível para motores, enquanto que gases das faixas média ou alta podem ser usados como matéria-prima para subsequente conversão noutros compostos, como metano. É necessário um maior investimento no processo para atingir as faixas de maior qualidade exige. O ar, uma vez que é composto por uma grande parte de nitrogênio, dilui o gás produto, baixando bastante seu poder calorífico.

Usando oxigênio puro, o custo do processo aumenta bastante, mas pode-se gerar gases de poder calorífico entre 10 e 15 MJ/m³. Usando vapor d'água, o gás produto pode chegar a um poder calorífico entre 13 e 20 MJ/m³. Ainda que vapor d'água não seja um combustível mais caro feito o oxigênio, gera um custo maior uma vez que a reação entre água e gás é endotérmica, requerendo uma fonte externa de calor para o processo.

Outro fator que influencia o processo é o estado da biomassa que vai ser gaseificada. Para garantir um processo eficiente, é importante tanto haver um certo tratamento da matéria-prima antes do processo quanto o entendimento de suas propriedades físico-químicas. O grau de pré-tratamento da biomassa depende do estado de recebimento e de qual tecnologia de gaseificação vai ser utilizada. A Tabela 2 descreve as principais características e as formas adequadas de pré-tratamento.

O processo de gaseificação também gera produtos indesejados, como alcatrões e cinzas. Os primeiros são uma mistura complexa de hidrocarbonetos que precisa ser removida ou posteriormente tratada, podendo causar complicações, como a desativação de catalisadores. Cinzas são resíduos minerais e não-combustíveis que devem ser separados dos outros produtos.

De uma forma geral, o processo é bastante eficiente, com a conversão da biomassa para a energia estimada para uma faixa entre 75 e 80% (MCKENDRY, 2001).

Tabela 2 - Propriedades da biomassa com efeitos significativos no processo

Propriedade	Influência no processo	Pré-tratamento
Teor de umidade	Idealmente entre 10 e 15%. Acima disso, dificulta ignição e reduz a temperatura máxima alcançada na oxidação.	Secagem
Proporção de cinzas e voláteis	Matéria mineral pode dificultar ou impossibilitar o processo, uma vez que compostos mineralizados ou hidrocarbonetos mais pesados podem entupir as vias do reator.	Fracionamento e lixívia podem ajudar a reduzir o teor desses produtos
Tamanho	Idealmente entre 10 e 20% ou, tipicamente, entre 20 e 80 mm, do tamanho da fornalha usada para aquecimento. Tamanhos menores podem entupir vias, enquanto que maiores podem prever escoamento do material.	Fracionamento.

Fonte: McKendry (2001), adaptado.

3.2.1 GASEIFICADORES E SUAS TECNOLOGIAS

O reator em que ocorre a gaseificação é chamado gaseificador. De uma forma genérica, gaseificadores tipicamente operam seguindo quatro passos, descritos na Tabela 3

Tabela 3 - Esquematização sequencial da operação típica de um gaseificador

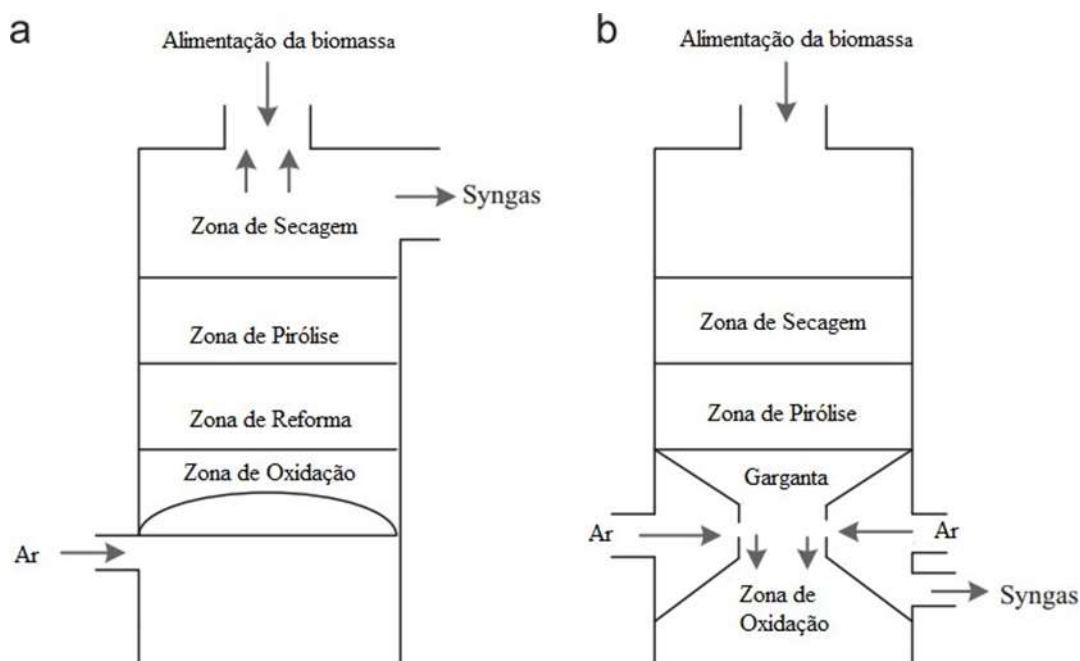
1. Secagem	Remoção do teor de umidade da biomassa. Aumenta qualidade do gás-produto e desempenho do reator.
2. Pirólise	Decomposição térmica vaporiza compostos voláteis na forma de hidrocarbonetos leves e alcatrões, mas deixam resíduos, como cinzas e chars.
3. Combustão (Oxidação)	Char residual e combustíveis sólidos carbonizados são queimados, produzindo produtos gasosos.
4. Redução	Matéria-prima é completamente gaseificada usando oxigênio ou vapor através de uma série de reações.

Fonte: Samiran, et al (2016), adaptado.

Segundo Samiran (2016), os passos da gaseificação podem se entrelaçar e não há um limite bem definido entre os estágios, sendo difícil definir quando um começa e o outro termina. As tecnologias de gaseificadores podem ser resumidas em dois tipos principais, os gaseificadores de leito fixo e de leito fluidizado, com variações de cada tipo (RAMPLING, 1993). Há outros tipos, de menor desenvolvimento ou com atuação mais específica para a gaseificação de carvão, que não serão considerados aqui uma vez que foge do escopo da pesquisa, que é trabalhar com biomassa. Detalhando os tipos de subtipos.

3.2.1.1 GASEIFICAÇÃO EM LEITO FIXO

É o processo mais tradicional usado para a gaseificação. De tecnologia simples e custo baixo, utiliza um leito com a biomassa que fica mantido a uma profundidade constante no reator. Sua temperatura de operação é em torno de 1000 °C. Gaseificadores dessa tecnologia podem ser diferenciados pela direção do fluxo do ar, podendo ser ou do tipo contracorrente ou co-corrente.

Figura 5 - Tipos de gaseificadores de leito fixo: a) contracorrente; b) co-corrente.

Fonte: Samiran et al. (2016), adaptado.

Gaseificadores do tipo contracorrente

Os gaseificadores do tipo contracorrente são os que introduzem a biomassa no topo do reator enquanto que a alimentação do agente gaseificante é feita no fundo, fazendo com que o fluxo da biomassa seja contrário ao agente. A biomassa parte do topo de gaseificador e segue o fluxo através da zona de secagem, em que a temperatura fica em torno de 100°C, depois para a zona de pirólise (300°C), onde são produzidas as espécies gasosas, o char e alcatrões. Na zona de reforma (900°C), o char vai para o fundo do reator, entrando em combustão na zona de oxidação (1400°C). A combustão do char é completa com a produção de gás carbônico e água. Os gases quentes ascendentes carregam produtos pirolizados usados para gaseificar o combustível na região superior do leito para, posteriormente, serem reduzidos a H_2 e CO, e resfriados a temperaturas entre 400 e 750°C. Esses gases em redução continuam seguindo a corrente ascendente pirolizando a biomassa descendente até sair do reator a uma temperatura baixa.

Quanto às condições de operação, o modelo leito fixo e contracorrente normalmente requer que a biomassa esteja num tamanho entre 2 e 50mm e o tempo de residência fica entre 15 e 30 minutos. O longo tempo de residência implica em baixas taxa de transferência.

A vantagem do modelo é produzir o gás com baixo teor de cinzas, influenciado pelas altas temperaturas da reação. A maior desvantagem é a formação de alcatrões, que chegam a ser entre 10

e 20% do gás produzido, o que requer processos posteriores. Devido a essas características do gás-produto, seu uso é recomendado para aplicações térmicas, mas não para motores.

Gaseificadores do tipo co-corrente

Já os gaseificadores do tipo co-corrente são os reatores que operam com o agente gaseificante sendo introduzido na zona de oxidação ou acima dela, na configuração do gaseificador. Alimentação de matéria-prima e dos oxidantes é feita de forma simultânea e o gás-produto é removido no fundo do reator. Como a biomassa e o gás se movem na mesma direção dentro do reator, sólidos e vapores gerados na zona de pirólise reagem com o ar introduzido, que mantém o leito fixo à pressão atmosférica. Na zona de oxidação da garganta, o agente gaseificador é distribuído homogeneamente enquanto que a temperatura é mantida a aproximadamente 1000°C. No exaustor, o gás sai a temperaturas em torno de 700°C.

Requisições quanto ao tamanho da biomassa dependem da dimensão da garganta, mas tipicamente ficam entre 1 e 30 cm. Tempo de residência também é alto, comparável ao modelo contracorrente.

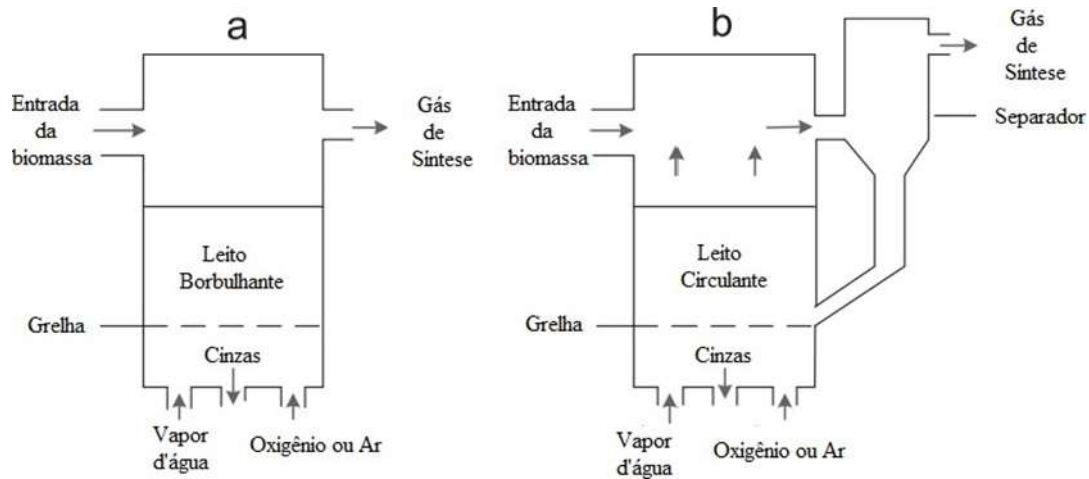
Tem a vantagem de ser um reator muito bom para geração de energia elétrica em baixa escala e na produção de um gás-produto com baixas quantidades de alcatrões e cinzas. Apesar de ser um bom gerador de energia em baixa escala, não é um processo fácil de ser escalado para larga escala.

3.2.1.2 GASEIFICAÇÃO EM LEITO FLUIDIZADO

Nesse tipo de reator, o ar passa pelo leito a uma velocidade tal que as partículas no leito ficam mantidas em suspensão. O leito é externamente aquecido para dar energia ao processo fazendo com que a biomassa seja alimentada para interagir e se misturar com os sólidos a alta temperatura. O processo é cíclico e rápido uma vez que as novas partículas que entram em contato passam pelo estágio de secagem enquanto que as partículas que estão compondo o leito já estão no estágio de pirólise, produzindo gases e chars. Tipicamente, o reator opera a temperaturas mais baixas que os reatores de leito fixo. As vantagens do leito fluidizado é a uniformidade da temperatura que é obtida na zona de gaseificação, a capacidade de trabalhar com diversos combustíveis e de ser adaptável para produção de energia em larga escala. De uma forma geral, o gás-produto gerado pelo processo contém diversas impurezas, como particulados e compostos nitrogenados ou sulfurados. Dependendo do uso pretendido do gás, é necessário processos posteriores para limpeza. Custos são geralmente maiores do que o uso de gaseificadores de leito fixo.

Pode-se resumir os subtipos dos reatores de leito fluidizado em dois grupos principais, que se diferenciam quanto ao tipo do leito, que pode ser borbulhante ou circulante.

Figura 6 - Tipos de gaseificadores de leito fluidizado: a) borbulhante; b) circulante.



Fonte: Samiran et al (2016), adaptado.

Gaseificadores de Leito Fluidizado Borbulhante

Os reatores de leito borbulhante são caracterizados por discretas bolhas de gás, de velocidade relativamente baixa, menor que 5 m/s (SAMIRAN et al., 2016). O ar é introduzido por baixo e passa pela grelha, onde reside o combustível particulado, que é movido para um leito de areia quente. O conjunto, então, é fluidizado pelo gás-produto circulante. A presença de cinzas no leito mantém a temperatura entre 700 e 1000 °C, controlando a taxa ar/biomassa, evitando aglomerações das partículas. Outros materiais podem ser usados para o leito, além da areia, como alumina, que podem ser usados para impedir a degradação das cinzas, que pode acarretar uma desfluidização.

A biomassa, num processo de leito borbulhante, é pirolizada no leito de alta temperatura para formar char e compostos gasosos, que vão sendo quebrados pelo contato com o material do leito. O processo de quebra reduz o teor de alcatrões do gás-produto. O uso de outros agentes gaseificantes além do ar pode aumentar a qualidade do gás de síntese de gerado, como mostrado por Kratas et al. (2013), ao conseguir aumentar o poder calorífico do gás produto em 44% com a gaseificação da biomassa da casca da avelã em leito fluidizado borbulhante.

Gaseificadores do Leito Fluidizado Circulante

Nos reatores de leito fluidizado circulante, o processo de fluidização é criado a partir da circulação do material do leito com os voláteis, como hidrogênio e char, derivados do combustível bruto. O processo

ocorre entre a área de reação e o separador. O material do leito e o char retornam à área de reação para a combustão, enquanto que as cinzas são removidas pelo separador. Fluxo de massa pode chegar a 700 kg/m², com velocidades entre 5,5 e 8,5 m/s (SAMIRAN et al., 2016), que fazem com que o gás-produto, areia e as partículas de biomassa circulem e interajam.

Nesse reator, a biomassa é rapidamente pirolizada para a produção de hidrocarbonetos gasosos e os alcatrões gerados são capturados pelo leito. O leito se caracteriza também pela intensa mistura dos sólidos circulantes e pelo alto tempo de residência dentro da circulação. A ausência de bolhas prevê o gás de escapar do leito. A produção consegue ser muito alta e os gases conseguem sair comprimidos e com baixo teor de alcatrões.

3.2.2 PÓS-PROCESSAMENTO

A composição do gás-produto recém gerado pelo processo de gaseificação, muitas vezes, não é a ideal ou a mais eficiente para seu uso final. Para uso efetivo do gás-produto, podem ser necessários processos posteriores para livrá-lo de impurezas. As principais impurezas a ser removidas são contaminantes, como alcatrões, particulados e compostos básicos, nitrogenados ou sulfurados, que interferem na eficiência do processo. Dependendo da aplicação final, diferentes passos são necessários para adquirir uma composição do gás-produto que atenda as demandas do processo.

3.2.3 CONDIÇÕES OPERACIONAIS E CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

A seleção do tipo de gaseificador vai depender de fatores, como as propriedades da biomassa a ser usada como combustível, das características requeridas do gás-produto e das condições operacionais, que podem ser descritas, de forma resumida, nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Comparação das características operacionais dos principais tipos de gaseificadores.

Características Operacionais (1)					
Tipo de Gaseificador	Temperatura de Combustão (°C)	Temperatura na saída (°C)	Tamanho da partícula (mm)	Potência (MW)	Tempo de residência (s)
Leito fixo, contracorrente	1300 a 1800	425 a 650	2 a 50	Menor que 20	900 a 1800
Leito fixo, co-corrente	800 a 1000	700 a 800	10 a 300	Menor que 10	900 a 1800

Leito fluidizado borbulhante	800 a 1000	800 a 1000	Menor que 5	10 a 100	10 a 100
Leito fluidizado circulante	900 a 1200	1000 a 1200	Menor que 10	10 a 100	10 a 50

Fonte: Samiran et al. (2016), adaptado.

Pensando além da produção teórica, outros fatores como custo de instalação e manutenção, capacidade de pré-tratamento da biomassa e capacidade do reator de produzir quantidade de gás que atenda os critérios de uso final.

Tabela 5 - Comparação das características operacionais dos principais tipos de gaseificadores.

Características Operacionais (2)					
Tipo de Gaseificador	Melhor tipo de biomassa	Máximo teor de umidade (%)	PCI do Gás (MJ/Nm ³)	Alcatrões (g/Nm ³)	Conversão do carbono (%)
Leito fixo, contracorrente	Aceita tipos de alto teor de umidade	60	5 a 6	50 a 200	Próximo a 100
Leito fixo, co-corrente	Baixo tipo de umidade	20	4 a 5	0,015 - 0,3	93 a 96
Leito fluidizado borbulhante	Qualquer tipo	Menor que 55	3 a 8	3 a 40	70 a 100
Leito fluidizado circulante	Qualquer tipo	Menor que 55	2 a 10	4 a 20	80 a 90

Fonte: Samiran et al. (2016), adaptado.

Por fim, pode-se resumir as principais vantagens e desvantagens em usar cada uma das principais tecnologia de gaseificadores a partir da Tabela 6.

Tabela 6 - Vantagens e desvantagens dos principais tipos de gaseificadores.

	Vantagens	Desvantagens
Leito Fixo	Tecnologia Simples e barata	Exige bastante pré-processamento da biomassa
	Baixa temperatura de saída do gás	Pode requerer bastante pós-processamento
	Aceita pressões mais altas	Ideal para baixa escala
	Alta eficiência térmica	Formação de cinzas pode danificar e entupir o reator
	Conversão do carbono muito alta	Configuração influencia a formação de alcatrões

	Grande quantidade de tipos de biomassa	Tempo de residência alto
	Aceita biomassa de umidade alta	Produção de gás não é tão alta
Leito fluidizado	Capaz de trabalhar com altas taxas de entrada do combustível	Formação de particulado é alta
	Boa quantidade de tipos de biomassa	Temperatura de saída muito alta
	Melhor controle e distribuição da temperatura	Formação de cinzas pode danificar e entupir o reator
	Alta conversão do carbono	Pode requerer bastante pós-processamento
	Produtividade alta	Teor de umidade não pode ser tão alto
	Mais favorável para larga escala	

Fontes: Wang et al (2008) e McKendry (2001), adaptado.

3.3 GÁS DE SÍNTESE

O gás de síntese é um dos produtos da gaseificação de biomassa. Diferencia-se de outros tipos de gás-produto devido à composição, apresentando principalmente hidrogênio e monóxido de carbono, mas exibindo também pequenas quantidades de dióxido de carbono ou metano (Rauch et al., 2014).

Normalmente, o gás de síntese é formado a temperaturas mais altas do que outras composições do gás-produto (Samiran et al., 2016). Pode ser utilizado diretamente como combustível, para aquecimento e geração de energia e também é um importante intermediário para a produção de combustíveis de transporte e compostos químicos de uso relevante, como amônia e metanol. A densidade energética do gás de síntese produzido a partir da biomassa fica em torno de 30% da densidade energética do gás natural. Apesar disso, o gás de síntese é um produto de interesse devido a sua versatilidade e seu caráter renovável.

Segundo Rauch et al. (2014), em torno de 50% da produção de gás de síntese é utilizada para a produção de amônia, 25% para produção de hidrogênio e o resto para outros processos, como a formação de metanol, ou a síntese de compostos feitos por processos feito o Fischer- Tropsch.

3.3.1 EFEITO DO PROCESSO NA COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE

A produção do gás de síntese segue a química da gaseificação. Para obter a composição desejada, buscando o mínimo de impurezas e garantindo a eficiência da conversão de energia depende exclusivamente das condições do processo. As condições mais influentes são:

- Biomassa: O tipo e as propriedades da biomassa afetam bastante a composição do gás de síntese. A proporção entre componentes como celulose, hemicelulose e lignina podem gerar diferentes proporções de CO , CO_2 , H_2 e CH_4 .

- **Agente Gaseificante:** Influencia fortemente a composição do gás de síntese e, consequentemente, seu poder calorífico. O ar pode ser usado como um meio gaseificante de custo baixo, mas devido ao alto teor de nitrogênio, gera um gás de síntese de baixo poder calorífico. Para melhorar a qualidade do gás gerado, usa-se oxigênio e vapor d'água. O primeiro é usado para aumentar o poder calorífico do gás gerado através da remoção do teor de nitrogênio, mas tem o contraponto de aumentar bastante o custo do processo enquanto que o segundo favorece a formação de hidrogênio enquanto também aumenta o poder calorífico, mas requer aquecimento externo para manter a eficiência do processo, sendo comumente utilizado em conjunção com o oxigênio (LA VILLETТА et al., 2017).
- **Razão de equivalência:** A primeira compara a proporção entre o ar atual e o necessário para a reação estequiométrica. Afeta fortemente o processo de gaseificação uma vez que influencia a temperatura do sistema, a disponibilidade de oxigênio e a produção de gás de síntese, seu poder calorífico e quantidade de alcatrões (LA VILLETТА et al., 2017). É um fator bastante ligado à velocidade superficial, que mede a produção de gás de síntese na seção transversal mais estreita do reator. Inicialmente, pensava-se que o aumento da razão de equivalência proporcionava maior produção devido ao aumento do comburente e consequente aumento na combustão, mas seu excesso pode comprometer fatores como a qualidade do gás produzido, que pode sair com poder calorífico menor devido a queima excessiva e o tempo de residência total, necessário para formação de certos compostos (KUMAR et al., 2009).
- **Temperatura:** possivelmente, o mais influente dos fatores. O aumento de temperatura desloca o equilíbrio entre as reações químicas presentes no processo. Segundo levantamento feito por Kumar et al. (2009), diferentes faixas de temperatura podem afetar a produção de diversas espécies químicas, dependendo também da correlação com o tipo de biomassa e a razão de equivalência.

É prudente também lembrar que essas três condições acima influenciam umas às outras e que também são influenciadas por outros fatores, como a configuração do gaseificador e qual o agente gaseificante que está sendo usado.

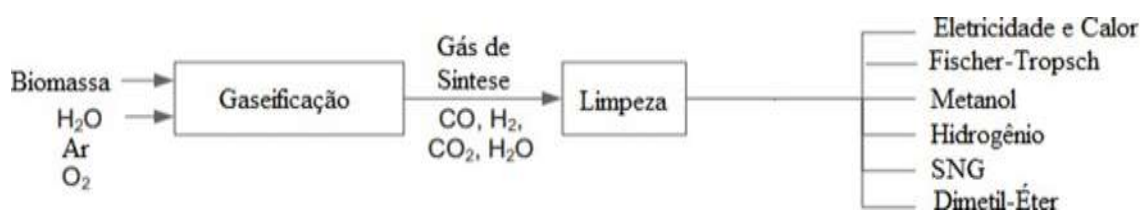
3.3.2 APLICAÇÕES DO GÁS DE SÍNTESES

Segundo Samiran et al. (2016), a principal aplicação do gás de síntese é a geração de energia e segundo Kumar et al. (2009), a principal forma de conversão do gás de síntese em energia é através de um ciclo combinado de gaseificação integrada (IGCC, na sigla em inglês). As grandes vantagens do uso do IGCC são as maiores eficiências e produção limpa, de origem renovável e com limitadas emissões de poluentes (KUMAR et al., 2009).

Segundo Rauch et al. (2014), as principais pesquisas relacionadas ao gás de síntese gerado através da biomassa focaram na obtenção de combustíveis de transporte. As principais rotas de síntese estão descritas a seguir:

- Processo de Fischer-Tropsch: baseado na conversão de uma mistura de CO_2 e H_2 em hidrocarbonetos líquidos. Usado majoritariamente para a produção de combustíveis sintéticos e compostos químicos, principalmente a partir de gás natural e carvão, em larga escala.
- Metanol: produzido através da hidrogenação de óxidos de carbono com a presença de um catalisador. O metanol em si é bastante útil para a produção de outros compostos mais interessantes, como diesel, gasolina e olefinas.
- Hidrogênio: há diversas formas de produção sendo estudadas que, resumidamente, utilizam reações de reforma de vapor e da reação de mudança do vapor de água. Apesar de custosa, a tecnologia é competitiva e é esperado o aumento de sua produção em larga escala.
- Gás natural sintético (SNG): o processo aproveita a reação de metanação entre os principais compostos do gás de síntese, usando níquel como catalisador. Há composições de gás de síntese mais próprias para esse processo, uma vez que já tem um percentual relevante de metano.
- Dimetil-Éter: produzido pela desidratação do metanol. Combinando o processo de síntese do metanol com sua desidratação, aumenta a eficiência geral e torna a formação do dimetil-éter mais eficiente do que a síntese do metanol. É um composto com potencial combustível, podendo ser adaptado para uso em motores e ciclos otto ou diesel ou mesmo convertido para GLP.

Figura 7 - Aplicações do gás de síntese.



Fonte: Samiran et al. (2016), adaptado.

Todas as aplicações do gás de síntese podem ser resumidas em dois grupos principais: geração de energia e geração de compostos químicos. Na Tabela 7, pode-se ter um panorama das características químicas necessárias para o uso eficiente do gás de síntese para uma dada aplicação, enquanto que

na Tabela 8, pode-se verificar os requisitos para uma dada aplicação, assim como as vantagens e desvantagens de usar o gás de síntese para tais aplicações.

Tabela 7 - Correspondência da composição do gás de síntese com seu uso final

Características do Gás de Síntese	Geração de energia e calor	Hidrogênio	Combustíveis Sintéticos (Fischer-Tropsch e outros)	Metanol
H ₂ /CO	Irrelevante	Alto	0,6 a 2,0	Idealmente, próximo a 2
CO ₂ e H ₂ O	Não-crítico/baixo	Irrelevante/alto	Baixo	Baixo
Hidrocarbonetos	Alto	Baixo	Baixo	Baixo
Impurezas indesejadas	Particulados e metais	Particulados e enxofre	Particulados e enxofre	Particulados e enxofre
Poder calorífico	Alto	Irrelevante	Irrelevante	Irrelevante
Temperatura (C)	Entre 500 e 600	Entre 100 e 200	Entre 200 e 400	Entre 100 e 200

Fonte: Magalhães (2011), adaptado.

Tabela 8 - Requisitos, vantagens e desvantagens para aplicações comuns do gás de síntese

Características do Gás de Síntese	Requisitos	Vantagens	Desvantagens
Geração de energia e calor	Alta pureza (baixo teor de alcatrões) Alto Poder Calorífico	Bastante eficiente Aceita composições muito variadas do gás	Pode precisar bastante de pós-processamento Processo de difícil escalabilidade
Hidrogênio	Altíssima pureza Proporção H ₂ : CO	Forma relativamente barata de obter hidrogênio	Controle fino dos parâmetros operacionais Requer bastante pós-processamento para obtenção do gás
Combustíveis Sintéticos (Fischer-Tropsch e outros)	Proporção H ₂ : CO Pureza	Processos versáteis que podem gerar vários intermediários e produtos finais comercialmente úteis	Alguns combustíveis ainda não têm custo de composição competitivo Necessidade de pós-processamento pode ser maior ou menor dependendo da aplicação
Metanol	Proporção H ₂ : CO Proporção de CO ₂	Produto tem diversas aplicações comerciais diretas indiretas	Controle fino dos parâmetros operacionais para garantir composição Requer bastante pós-processamento

Fonte: McKendry (2001), Ruiz et al. (2013), Wang et al. (2008), adaptado.

4. METODOLOGIA

Este capítulo descreve brevemente os procedimentos feitos para alcançar os objetivos deste trabalho, dividido em quatro seções, que almejam:

- A exibição dos critérios para seleção das biomassas utilizadas, das configurações dos reatores e dos usos indicados para o gás de síntese.
- A avaliação teórica que visa prever os resultados.
- A apresentação dos métodos de simulação e as ferramentas necessárias ao processo.

4.1 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO

Muitos autores, como Rauch et al. (2014) e Kumar et al. (2009), limitam-se a expor vantagens e desvantagens do processo de gaseificação e dos diferentes tipos de gaseificadores. Ruiz et al. (2013) chega a citar que a seleção correta de uma configuração de gaseificador para as características físico-químicas de uma dada planta é um processo bastante complicado devido às várias configurações e padrões envolvidos. Já McKendry (2001), começa sua abordagem citando também vantagens e desvantagens para escolha de um tipo de reator, mas vai mais além, citando pontos mais pragmáticos para a escolha de um gaseificador. Dessa forma, a partir do trabalho de McKendry (2001), pode-se definir critérios qualitativos, úteis para nortear a seleção do reator. Os critérios podem ser resumidos de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 - Critérios qualitativos para escolha da configuração do gaseificador

Biomassa	Gaseificador	Gás de Síntese
Pré-processamento	Condições Operacionais	Uso final
Propriedades físico-químicas	Complexidade e custo (implementação)	Composição
Disponibilidade	Custos (operação e manutenção)	Pós-processamento

Fonte: Adaptado de McKendry (2001).

Fatores como a natureza extremamente heterogênea da composição de diferentes tipos de biomassa, que influencia bastante o processo e o produto final, assim como os diferentes requisitos do gás de síntese, dada sua aplicação desejada, são evidências da dificuldade de uma análise qualitativa mais generalista. Outros critérios poderiam ser listados, eventualmente, evidenciando a correlação que as

características de cada um dos principais elementos do processo tem na escolha dos outros. Para tornar os critérios de seleção mais objetivos, é necessário haver a definição de, ao menos, um fator:

- Definindo a biomassa a ser usada, pode-se estudar que tipo de gaseificador é mais indicado para sua conversão em gás de síntese.
- Definindo um reator, pode-se investigar quais as propriedades requeridas de uma biomassa que gerariam gás de síntese de forma mais eficiente, com a condição mais adequada ao uso final.
- Definido o uso final do gás de síntese, pode-se avaliar quais pares biomassa-gaseificador que gerariam um gás com a composição mais adequada para a aplicação desejada.

Como um dos objetivos deste trabalho é a análise do processo de gaseificação em espécies de biomassa residual disponíveis na região Nordeste, a primeira definição a ser tomada é a escolha de duas biomassas para análise: o bagaço de cana e o bambusa vulgaris.

Segundo Ruiz et al. (2013), 75% de todos os gaseificadores fabricados na Europa são de leito fixo e tipo co-corrente, enquanto que 20% são de leito fluidizado. Pode-se ter um panorama destes dois tipos mais populares de acordo com as Tabelas 5, 6 e 7. A configuração de leito fixo e tipo co-corrente é uma tecnologia simples, extensivamente produzida no mercado e que o gás produzido apresenta baixíssimos índices de impurezas como cinzas e alcatrões, reduzindo a necessidade pós-processamento, o que pode facilitar a operação e obter o gás- produto a custo baixo. Uma vez que a região Nordeste possui diversos desafios de ordem socioeconômica, o custo é um critério bastante relevante para a seleção.

Segundo as Tabelas 8 e 9, o gás de síntese gerado pelo reator co-corrente pode ser uma boa escolha para geração de energia, com o único problema em ser uma configuração que só comporta produção em pequena escala. Apesar do custo mais alto, o reator de leito fluidizado pode ser uma ideia viável caso seja necessária a produção em larga escala. É uma configuração de produtividade mais alta e que possibilita um controle mais fino das condições operacionais, influenciando bastante a composição do gás gerado, o que possibilita a produção de compostos químicos com maior valor agregado.

A composição final do gás de síntese é majoritariamente influenciada pelos parâmetros operacionais do processo, como o agente gaseificante, a razão de equivalência e a temperatura. O gaseificador influencia majoritariamente os parâmetros operacionais, assim como a necessidade de pós-processamento. Diferentes reatores podem gerar gases com maior ou menor teor de elementos

indesejados. Como pós-processamento também implica custos, também são fatores criticamente avaliados nesta análise.

Por fim, as Tabelas 10 e 11 apresentam um guia que tenta otimizar a seleção do gaseificador.

Com base nas Tabelas 10 e 11, pode-se notar que o gaseificador do tipo leito fixo, modelo co-corrente, seria o mais indicado. Apesar de apresentar necessidade de pré-tratamento extensivo da biomassa, os custos para tais operações são menos relevantes do que os custos para pós-processamento do gás gerado. Uma vez que operações de pós-processamento são mais complexas, tendem a ter custos mais elevados. Uma vez que a finalidade do trabalho é estudar a influência da temperatura e os usos do gás de síntese, as condições operacionais do modelo co-corrente parecem ideais à análise proposta.

Tabela 10 - Critérios qualitativos para escolha da configuração do gaseificador quanto às condições de pré e pós processamento

PARÂMETROS		CONTRA CORRENTE	CO CORRENTE	FLUIDIZADO
PRÉ-PROCESSAMENTO	LIXIVIA	2	3	3
	FRACIONAMENTO	2	1	3
	SECAGEM	1	3	2
PÓS-PROCESSAMENTO	% PARTICULADO	2	1	3
	%CINZAS	2	1	2
	%ALCATRÕES	3	1	3

LEGENDA DOS CRITÉRIOS QUALITATIVOS	1	IRRELEVANTE
	2	RELEVANTE
	3	CRÍTICO

Fontes: McKendry (2001), Samiran et al (2016), Wang et al. (2007), Basu (2010).

Tabela 11 - Critérios qualitativos para escolha da configuração do gaseificador quanto às condições operacionais

PARÂMETROS		CONTRA CORRENTE	CO CORRENTE	FLUIDIZADO
OPERACIONAIS	CUSTO	1	1	3
	TEMPO DE RESIDENCIA	3	3	1
	TEMPERATURA MÁXIMA (COMBUSTÃO)	3	2	2
	PRODUTIVIDADE	1	1	3
	ESCALABILIDADE	1	1	3

	CONVERSÃO DO CARBONO	3	3	2
--	----------------------	---	---	---

LEGENDA DOS CRITÉRIOS QUALITATIVOS	1	BAIXO
	2	MÉDIO
	3	ALTO

Fontes: McKendry (2001), Samiran et al (2016), Wang et al. (2007), Basu (2010).

4.2 AVALIAÇÃO TEÓRICA

Esta seção tem por objetivo avaliar o processo de gaseificação através de uma análise matemática para tentar prever seus resultados, avaliando parâmetros como as características do gás de síntese e a eficiência do processo.

A modelagem matemática do processo é essencial para a compreensão dos mecanismos físicos e químicos e auxilia o projeto de novos sistemas ou no desenvolvimento de estratégias de controle para unidades existentes e para otimizar a qualidade do gás de síntese gerado. Através da modelagem, é possível identificar os parâmetros operacionais que tem maior influência no desempenho do gaseificador.

Segundo Basu (2010), a modelagem de um gaseificador pode ser feita através de quatro grandes grupos de abordagens:

- Equilíbrio termodinâmico
- Cinética
- Dinâmica de fluidos computacional (CFD)
- Redes neurais artificiais

Modelos de equilíbrio termodinâmico assumem que os reagentes são deixados por um tempo infinito até atingir o equilíbrio, o que possibilita a previsão da composição e da máxima produção dos produtos da reação pelo sistema. Como, na prática, o tempo para reação não é infinito, pode-se dizer que modelos termodinâmicos mostram a produção ideal, sendo independentes do modelo do gaseificador. É uma abordagem bastante útil para estudar a influência do combustível utilizado e dos parâmetros de processo.

Modelos cinéticos estudam a progressão das reações e levam também em consideração fatores como a geometria do reator e a hidrodinâmica do processo, sendo capazes de prever as composições do produto em diversos pontos do reator. Pode-se dizer que enquanto modelos de equilíbrio

termodinâmicos dão um panorama mais ideal, uma aplicação mais prática pode ser prevista por um modelo cinético.

Modelos de CFD são usados para resolver um conjunto de equações simultâneas para conservação de massa, momento, energia para uma região discreta do gaseificador, possibilitando uma distribuição da temperatura, concentração e outros parâmetros de importância no reator. Geralmente, são modelos bastante robustos, que conseguem descrever o processo de forma satisfatório, mas tem a contrapartida de necessitar bastante preparação prévia, com a necessidade de uma modelagem do sistema em CAD, e de ser um método de simulação lento, que exige bastante custo computacional para uma simulação eficiente.

Análises utilizando redes neurais são uma técnica relativamente nova de modelagem para gaseificadores. As redes neurais são programadas de modo a aprender o processo por si só a partir de dados experimentais. É uma abordagem relativamente nova de modelar o problema.

Como este trabalho dedica-se a estudar a influência da temperatura na produção do gás de síntese, é importante entender melhor a termodinâmica das reações químicas inerentes ao processo e a variação e distribuição da temperatura no reator, o que justificaria o uso das modelagens usando o equilíbrio termodinâmico.

As principais considerações utilizadas para os dois modelos podem ser resumidos pela Tabela 12.

Tabela 12 - Resumo das considerações simplificadoras para as modelagens do processo

Considerações Simplificadoras	
Combustível	Considerado CHO, uma vez que proporções de outros elementos são diminutas (1)
	Poder calorífico e exergia estimados por correlações empíricas (2)
Agente gaseificante	Ar subestequiométrico (3)
	Presença de Vapor d'água inerente (4)
Condições operacionais	Pressão atmosférica (5)
	Razão de equivalência de acordo com literatura (6)
Reator	Mistura perfeita, com temperatura e pressão sendo uniformes (7)
	Sem limitações cinéticas - tempo longo o bastante e atinge equilíbrio químico (8)
	Conversão do carbono é assumida como perfeita: não haverá formação de char e de alcatrões e haverá menos hidrocarbonetos formados (9)
Termodinâmica	Estado estável (10)
	Não haverá produção de oxigênio e nitrogênio é considerado inerte (11)
	Processo considerado isotérmico e adiabático (12)

Fonte: Prins et al. (2007), Basu (2010), La Villetta et al. (2017)

4.2.1 PODER CALORÍFICO DOS COMBUSTÍVEIS

Primeiramente, é importante conhecer melhor as propriedades dos combustíveis que serão usados no processo. As Tabelas 13 e 14 mostram dados das análises imediata e elementar para os dois combustíveis selecionados.

Tabela 13 - Propriedades químicas de *bambusa vulgaris* de acordo com suas características ao recebimento (ar) e depois de secagem e retirada das cinzas (daf)

<i>Bambusa Vulgaris</i>		% do peso	
Análise Imediata (ar)		Análise Elementar (ar)	
Umidade	0,1	C	47,95
Cinzas	2,7	H	6,09
Voláteis	75,92	O	42,49
Carbonos fixos	21,28	N	0,6
		S	0,05
Análise Imediata (daf)		Análise Elementar (daf)	
Umidade		C	49,33
Cinzas		H	6,27
Voláteis	78,11	O	43,71
Carbonos fixos	21,89	N	0,62
		S	0,05

Fonte: Phyllis 2, database for biomass and waste.

Tabela 14 - Propriedades químicas do bagaço de cana de acordo com suas características ao recebimento (ar) e depois de secagem e retirada das cinzas (daf)

Bagaço de Cana		% do peso	
Análise Imediata (ar)		Análise Elementar (ar)	
Umidade	46	C	24,54
Cinzas	6,69	H	2,84
Voláteis	41,77	O	19,79
Carbonos fixos	5,54	N	0,12
		S	0,03
Análise Imediata (daf)		Análise Elementar (daf)	
Umidade		C	51,87
Cinzas		H	6
Voláteis	88,29	O	41,83
Carbonos fixos	11,71	N	0,26
		S	0,06

Fonte: Phyllis 2, database for biomass and waste.

Em posse das propriedades dos combustíveis, é possível calcular o poder calorífico do combustível. Esta propriedade é calculada a partir da equação 16, uma correlação empírica feita por Channiwala e Parikh (2002).

$$PCS_{combustível} = 0,3491.x_C + 1,1783.x_H - 0,1034.x_O - 0,0151.x_N \\ + 0,1005.x_S - 0,0211.x_{Cinzas}$$

A partir do poder calorífico superior, é possível calcular o poder calorífico inferior, a partir da equação 17.

$$PCI = PCS - 0,212.x_H - 0,0245.x_{Umidade} - 0,008.x_O \quad (17)$$

Em que:

- PCS é o poder calorífico superior, ou seja, a quantidade total de energia liberada na oxidação do combustível.
- PCI é o poder calorífico inferior, que é calculado a partir da dedução da energia gasta para vaporização da água contida no combustível.
- Os parâmetros x_n são as frações de massa dos compostos, obtidos na análise imediata, como o teor de cinzas e umidade, e dos elementos, obtidos na análise elementar.

A partir das equações, é possível obter os valores para os poderes caloríficos dos dois combustíveis. A Tabela 15 mostra os resultados dos poderes caloríficos calculados com resultados existentes na literatura.

Tabela 15 - Comparação entre os poderes caloríficos dos combustíveis comparados a partir das equações empíricas e de medições encontradas na literatura

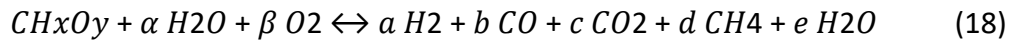
(MJ/Kg)	<i>Bambusa Vulgaris</i>		Bagaço de Cana	
	Calculado	Literatura	Calculado	Literatura
PCS (ar)	19,46	19,03	9,727	9,13
PCI (ar)	17,827	-----	7,839	7,39
PCS (daf)	19,847	19,58	20,585	19,3
PCI (daf)	18,168	-----	19,247	17,99

Fonte: Phyllis 2, database for biomass and waste.

4.2.2 COMPOSIÇÃO E PODER CALORÍFICO DO GÁS DE SÍNTESE GERADO

O modelo matemático para reação de gaseificação, em presença de ar e umidade, levando em consideração as considerações, pode ser descrito através das equações da gaseificação citadas na seção 3.2. A equação geral da gaseificação será repetida aqui para maior clareza da seção, mas adaptada seguindo as considerações 1, 3, 4, 9 e 11:

Equação geral da gaseificação



Na equação, o parâmetro α é definido usando a umidade intrínseca à biomassa, caso não esteja seca, a umidade presente no ar ou percentual de vapor d'água, enquanto que β representa a quantidade de ar seco inserido na mistura, todos definidos a 25 °C. Para definir os coeficientes desconhecidos no lado direito da reação, é necessário definir cinco equações. A partir do balanço de massa da equação global, é possível gerar as três primeiras equações:

Balanço de massa do carbono

$$b + c + d - 1 = 0 \quad (19)$$

Balanço de massa do hidrogênio

$$2a + 4d + 2e - x - 2\alpha = 0 \quad (20)$$

Balanço de massa do oxigênio

$$b + 2c + e - y - \alpha - 2\beta = 0 \quad (21)$$

O modelo de equilíbrio termodinâmico assume que todas as reações estão em equilíbrio, definido pela minimização da energia livre de Gibbs, que pode ser definida através de métodos matemáticos complexos ou, de uma forma mais simples, através das constantes de equilíbrio das reações parciais.

As reações parciais utilizadas são as reações do carbono, descritas anteriormente na seção 3.2:



Diversos autores, como Jarungthammachote e Dutta (2007), notaram que subtraindo a equação 6 da equação 7, pode-se obter a reação de mudança do vapor d'água (equação 10), também já descrita na seção 3.2:



E para as equações 8 e 10, as constantes de equilíbrio podem ser calculadas por:

$$K_8 = \frac{d * (a + b + c + d + e)}{a^2} \quad (22)$$

$$K_{10} = \frac{a * c}{b * e} \quad (23)$$

A constante de equilíbrio K , por sua vez, pode ser definida em função da temperatura e da energia livre de Gibbs da reação:

$$\ln K = \frac{-\Delta G^0}{RT} \quad (24)$$

Na equação 24, R é a constante universal dos gases, que tem valor de 8,314 J/mol.K.

Pring e Fairlie (1912) publicaram um estudo empírico relacionando a constante de equilíbrio para a reação de metanação (equação 8) com a temperatura através da equação 25.

$$\log(K_8) = 4,617 - 0,0006424 * T + \frac{4050}{T} - 3027 * \log T \quad (25)$$

Devido à idade da pesquisa, foram pesquisados outros modos mais precisos e atuais de encontrar os dados da constante de equilíbrio, temendo que houvesse alguma limitação na forma com que adequação dos dados experimentais. A partir dos dados obtidos no artigo de Wagman et al. (1945) e nas Tabelas de metano do NIST-JANAF (1998), pode-se fazer uma comparação dos resultados e testar sua validade. O teste, exposto na Tabela 17, mostra que houve, de fato, uma inconformidade entre os valores previstos pela equação 25 e os obtidos pelos dois outros métodos.

Callaghan (2006), em sua tese de doutorado, trabalhou extensivamente no entendimento da mecânica da reação de mudança do vapor d'água (equação 10). Ela ajustou os dados experimentais em equações para prever tanto a energia livre quanto a constante de equilíbrio em função da temperatura, descritas nas equações x e y:

$$\Delta G^0_{10(T)} = -32,197 + 0,03104 * T - \frac{1774,7}{T} \quad (26)$$

$$\log(K_{10}) = -2,4198 + 0,0003855 * T + \frac{2180,6}{T} \quad (27)$$

De modo análogo, a validade dos resultados obtidos das equações 25 e 26 também foi testada e comparada com os dados das Tabelas do NIST-JANAF. Resultados podem ser conferidos na Tabela 16.

Tabela 16 - Validação dos resultados experimentais para as constantes de equilíbrio a partir das comparações entre as equações empíricas e os dados tabelados

Validação dos valores da constante de equilíbrio da reação de metanação (Eq. 8)			
T	NIST-JANAF	Pring e Frailie	Variação
900	0,3162	0,4099	29,62%
1200	0,0156	0,00836	46,39%
1500	0,0025	0,000584348	76,25%

Validação dos valores da constante de equilíbrio da reação de mudança do vapor d'água (Eq. 10)			
T	NIST-JANAF	Callaghan (2006)	Variação
400	1479,0000	1461,2257	1,20%
700	9,0170	9,38677	4,10%
900	2,2040	2,31126	4,87%
1200	0,6966	0,70241	0,83%
1500	0,3704	0,3492	5,72%

Fonte: Pring e Fairlie (1912), Wagman et al. (1945), Callaghan (2006), NIST-JANAF (1998)

A partir da Tabela 16, pode-se ver que há, de fato, uma defasagem entre os valores calculados com base no trabalho de Pring e Fairlie, mas que os valores calculados por Callaghan são bastante válidos. Dessa forma, a decisão foi de preservar os valores de NIST-JANAF para a reação de metanação, devido à precisão dos dados. Quanto os valores para a reação de mudança do vapor d'água, uma vez que os valores calculados através da equação 27 são confiáveis, seu uso foi mantido devido à facilidade de cálculo.

Com base nessas equações, é possível encontrar as constantes de equilíbrio através da equação 24 e, por fim, resolver o sistema de equações 19, 20, 21, 22 e 23, através de métodos numéricos, como o método Newton-Raphson, e encontrar a composição do gás gerado.

A partir da composição química do gás de síntese gerado, é possível estimar o poder calorífico do gás através da equação 28 (Singh et al, 2015). Os poderes caloríficos para os gases energéticos podem ser vistos na Tabela 17. Os resultados calculados para a composição química e o poder calorífico do gás gerado estão presentes no capítulo 5.

$$PCI_{gás\ de\ síntese} = x_{CH_4}PCI_{CH_4} + x_{CO}PCI_{CO} + x_{H_2}PCI_{H_2} \quad (28)$$

Tabela 17 - Valores iniciais e critério de tolerância para o cálculo da composição do gás de síntese gerado

Poder calorífico dos gases energéticos (MJ/Nm³)	
CH ₄	35,88
CO	12,63
H ₂	10,78

Fonte: La Villetta et al. (2015)

Modelos de equilíbrio termodinâmico podem apresentar condições diferentes das reais, devido às considerações simplificadoras. Tipicamente, produção de hidrogênio e monóxido de carbono podem ser superestimadas enquanto que a produção de gás carbônico, metano, char não queimado e alcatrões gerados, podem ser subestimados. La Villetta et al (2017) cita abordagens utilizadas numa

tentativa de maior aproximação do modelo com condições reais enquanto que também se refere, junto a Prins et al. (2007) a uma abordagem de quase- equilíbrio, também visando uma maior aproximação a condições reais.

4.3 FERRAMENTAS

Basicamente, a ferramenta utilizada para cálculo foi o método de Newton-Rhapson. O método é um método para resolução de equações e sistemas de equações não-lineares, sendo o mais citado na literatura revista.

Dado um sistema de n equações não-lineares e n variáveis (eq. 29), com seu domínio definido pelas relações na equação 30.

$$\begin{matrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{matrix} \quad (29)$$

$$\forall f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) : R^n \rightarrow R, \quad i = 1 \dots n; \quad (30)$$

Pode-se reescrever o sistema de forma compacta, sendo detalhado através das equações 31 a 34. O índice T denota o operador de transposição de matrizes.

$$f(x) = 0 \quad (31)$$

$$f(x) = [f_1(x) \ f_2(x) \ \dots \ f_n(x)]^T \quad (32)$$

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \quad (33)$$

$$0 = [0 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (34)$$

A partir de valores iniciais para as n variáveis, denotados pelo índice 0, como em $x^{(0)}$, tal que $f(x^{(0)}) \neq 0$. A solução consiste no cálculo de um valor incremental $\Delta x^{(0)}$, tal que $f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = 0$.

A partir da expansão em séries de Taylor, o termo que $f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)})$ pode ser aproximado segundo a equação 35. J é a matriz Jacobiana de ordem n.

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) \approx f(x^{(0)}) + J^{(0)}\Delta x^{(0)} \quad (35)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1(x)}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta f_1(x)}{\delta x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta f_n(x)}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta f_n(x)}{\delta x_n} \end{bmatrix} \quad (36)$$

Dessa forma, podemos calcular o termo $\Delta x(0)$ segundo a equação 37.

$$\Delta x^{(0)} \approx -[J^{(0)}]^{-1}f(x^{(0)}) \quad (37)$$

E assim, pode-se atualizar o vetor solução segundo a equação 38.

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x^{(0)} \quad (38)$$

Assim, de uma forma geral, pode-se definir o método para encontrar o vetor de solução segundo a equação 39.

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + -[J^{(k)}]^{-1} f(x^{(k)}) \quad (39)$$

Para toda nova iteração, é necessário checar a diferença entre os valores absolutos de duas iterações consecutivas e comparar essa diferença com um critério de tolerância. Se o critério de tolerância não for satisfeito, é feita uma nova iteração. Caso o critério seja satisfeito, o algoritmo convergiu a uma solução.

Os valores iniciais e o critério de tolerância utilizado para o cálculo das composições do gás de síntese podem ser vistos na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores iniciais e critério de tolerância para o cálculo da composição do gás de síntese gerado

Estimativas Iniciais	
a (h2)	0,5
b (co)	0,5
c (co2)	0,5
d (ch4)	0,5
e (h2o)	0,5
Critério de tolerância	
Tolerância	1,00E-06

Originalmente, a ideia era usar um código no software MATLAB para automatização do cálculo, mas o código criado não discriminava as múltiplas soluções que um sistema pode ter, sempre aproximando sua conta para o que convergisse primeiro. Resultado que, frequentemente, gerava respostas negativas para os valores dos coeficientes dos gases gerados, o que seria incongruente. Desta forma, o método iterativo foi aproximado usando o software Microsoft Office Excel numa tentativa de entender melhor o código construído a fim de corrigi-lo. A simplicidade do modelo utilizado possibilitou a execução das simulações a partir da Tabela.

Figura 8 - Tabela utilizada para automatização do método Newton-Rhapson

Parâmetros		Valor Atual		Valor calculado	
	T=		x(n)	x(n+1)	Tolerância
	BAMBU		a	0,58332	-98,06536%
Hidrogênio	x	1,52524	b	0,9076	-0,33095%
Oxigênio	y	0,66456	c	0,0836	9,94780%
Umidade/vapor (SB)	alfa	0,005	d	0,0088	-246,13194%
Oxigênio (ER)	beta	0,3	e	0,2897	-61,64242%
Constantes de equilíbrio	kmet	0,01608			
	kshift	0,36744			
Determinante		Função		Critério	
24,18927303		Valor atual da função		1,00E-06	
inversa		f(x) f(x(n))		Produto de matrizes	
0,791865708	0,46085	-0,72156	-1,43351	0,15036	0,572030354
1,174108439	0,01816	-0,23425	-0,67821	-0,15957	0,002993744
-0,182614902	-0,02341	0,2453	0,15028	0,15727	-0,00923772
0,008506463	0,00525	-0,01105	0,52793	0,0023	0,006243976
-0,808878635	0,02866	0,74366	0,37765	-0,15497	0,110481695
Jacobiano					
0	1	1	1	0	
2	0	0	4	2	
0	1	2	0	1	
-0,021264869	0,00658	0,00658	1,83832	0,00658	
0,318034128	-0,40485	4,39394	0	-1,26829	

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A validação foi feita através da comparação dos resultados calculados com resultados experimentais e com resultados encontrados na literatura. A escolha dos autores usados para a comparação com os resultados gerados foi baseada na similaridade da metodologia utilizada para o cálculo. Foram levados em consideração critérios como tipo do modelo utilizado, considerações simplificadoras e a disponibilidade de dados para replica da simulação. Os critérios podem ser encontrados na Tabela 19 e as comparações podem ser encontradas nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 19 - Critérios para seleção dos autores utilizados como padrão para validação dos resultados.

Critérios para validação	Loha <i>et al.</i> (2011)	Silva (2016)
Modelo Matemático	Termodinâmico	Termodinâmico
Gaseificador	Fixo, co-corrente	Não especificado
Número de equações	5	5
Disponibilidade de dados	Ótima	Boa

Tabela 20 - Teste de validação dos resultados a partir da comparação do modelo calculado nesta dissertação com os dados experimentais e calculados por Loha *et al.* (2011)

Validação de Resultados 1					
Loha <i>et al.</i> (2011) - Cana de açúcar em gaseificador co-corrente usando vapor (S/B = 1,32), a 750 C					
Análise Elementar (LOHA <i>et al.</i> , 2011)		Gás de síntese	Experimental	Resultados (LOHA <i>et al.</i> , 2011)	Método Numérico
C	46,10%	H ₂	52,30%	51,43%	53,78%
H	5,26%	CO	17,75%	16,64%	21,61%
O	43,90%	CO ₂	22,25%	27,65%	19,32%
N	0,52%	CH ₄	7,40%	4,28%	5,29%
S	0,15%				

Tabela 21 - Teste de validação dos resultados a partir da comparação do modelo calculado nesta dissertação com os dados experimentais e calculados por Silva (2016)

Validação de Resultados 2				
Silva (2016) - Baraúna, usando ar a 800 C e razão de equivalência de 0,25				
Análise Imediata (SILVA, 2016)		Gás de síntese	Resultados (SILVA, 2016)	Método Numérico
C	37,80%	H ₂	20,05%	14,67%
H	3,71%	CO	26,12%	27,80%
O	45,47%	CO ₂	12,57%	12,94%
% Umidade	11,07%	CH ₄	0,96%	3,31%
% Cinzas	1,95%	H ₂ O	8,95%	6,39%
		N ₂	31,34%	34,90%

A partir das tabelas, pode-se notar que as comparações com Loha et al. (2011) e Silva (2016) são coerentes com o previsto pela literatura, apesar de ter discrepâncias nos valores gerados, sendo as mais notáveis nos valores do gás carbônico comparando com Loha et al. (2011) e para o hidrogênio comparando com Silva (2016). Uma tentativa de justificar essa diferença pode residir no fato de que Loha et al. (2011) fornece mais informações e maiores detalhes quanto às condições simuladas em seu trabalho, enquanto para Silva (2016), condições como se a presença de umidade foi levada em consideração no processo, não foram explicitadas. A presença de umidade é crucial para a reação em um gaseificador modelo co-corrente,

como explicado na seção 3.2.3, e como Silva (2016) não especificou o tipo de gaseificador utilizado, pode fazer uma análise mais livre, o que pode ter influenciado no resultado final. Outra forma de tentar justificar a diferença são características inerentes aos modelos de equilíbrio, assim como a simplicidade do modelo utilizado nesta equação. Os modelos de equilíbrio termodinâmicos são usados para prever o máximo que pode ser produzido a partir de um determinado produto passando por um determinado processo (BASU, 2010).

Dessa forma, o modelo leva em conta considerações, como não ser muito afetado pelas limitações inerentes à geometria do gaseificador, assim como também assume que o tempo para reação é infinito ou longo o bastante para chegar ao equilíbrio, o que pode não representar fielmente uma situação real. Além disso, o modelo foi bastante simples, utilizando um sistema com cinco equações e variáveis, tentando manter a simulação mais rápida e mais simples. Em compensação, sacrificar robustez do modelo pode levar a resultados com maior margem de erro e, assim, comprometer os resultados.

5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Segundo Basu (2010), as condições operacionais do processo de gaseificação são os fatores com maior influência na composição do gás de síntese gerado que, por sua vez, afetam os usos finais do gás. Especificamente, a temperatura, o agente gaseificante utilizado e a razão de equivalência são os fatores mais influentes. Para avaliar a influência desses fatores na composição do gás de síntese gerado, a simulação foi feita através da variação desses fatores em diferentes faixas de temperatura.

5.2.1 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE SÍNTESE GERADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA AS DUAS BIOMASSAS SELECIONADAS

A Tabela 22 mostra a composição prevista para o gás de síntese através da gaseificação das duas biomassas selecionadas. O agente gaseificante utilizado foi o ar e a razão de equivalência foi de 0,25. Pode-se perceber que, uma vez que as análises elementares das biomassas (secas e livres de cinzas) são semelhantes, os resultados para a estimativa da composição do gás de síntese gerado a partir delas também foi semelhante.

Segundo Kumar (2009), temperaturas acima de 750 °C favorecem a reações endotérmicas de reforma do vapor (equações 14 e 15), impulsionando a produção de hidrogênio e o decréscimo de metano. Acima de 900 °C, a reação de reforma do vapor ainda é impulsionada, mas outra reação, a de Boudouard (equação 6) também é bastante estimulada nessa faixa de temperatura, aumentando a produção de monóxido de carbono.

Na Tabela 23, pode-se ver os valores do poder calorífico e da relação H/C para as composições do gás de síntese gerados na Tabela 22. O vapor d'água e o nitrogênio presentes na composição do gás de síntese agem como diluentes, reduzindo efetivamente, o poder calorífico do gás gerado.

Na Figura 9, as composições dos componentes do gás de síntese foram plotadas em um gráfico, de modo a melhorar a visualização da influência da temperatura. Pode-se observar que o aumento da temperatura favorece os reagentes nas reações 8 e 10, ambas exotérmicas. Essa influência pode ser observada pelo aumento da concentração de H₂ e CO, ambos reagentes nas equações 8 e 10, respectivamente, e pela diminuição na concentração de CH₄ e CO, produtos nas reações 8 e 10. A Figura 9 também evidencia a similaridade no comportamento das duas biomassas escolhidas para esta análise.

Tabela 22 - Composição do gás de síntese gerado por biomassa, variando a temperatura

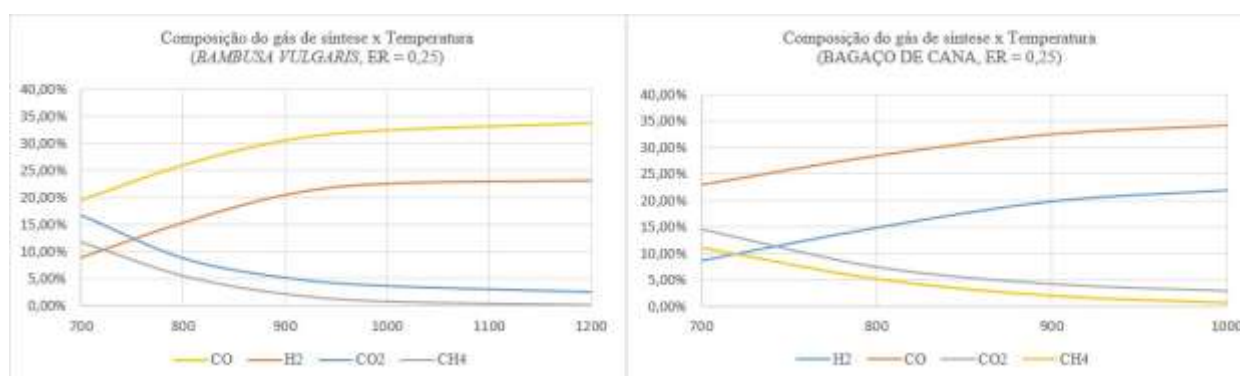
Composição do gás de síntese gerado						
T	BAMBUSIA VULGARIS					
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂
700	8,98%	19,55%	16,67%	11,73%	4,75%	47,29%
800	15,36%	25,97%	8,78%	5,50%	4,86%	39,53%
900	20,43%	30,45%	5,21%	2,16%	4,59%	37,14%
1000	22,50%	32,33%	3,72%	0,78%	4,51%	36,16%
T	BAGAÇO DE CANA					
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂

700	8,68%	22,88%	14,61%	11,13%	3,44%	47,94%
800	14,87%	28,35%	7,43%	5,24%	3,65%	40,45%
900	19,83%	32,40%	4,20%	2,07%	3,37%	38,13%
1000	21,91%	34,05%	2,89%	0,75%	3,23%	37,16%

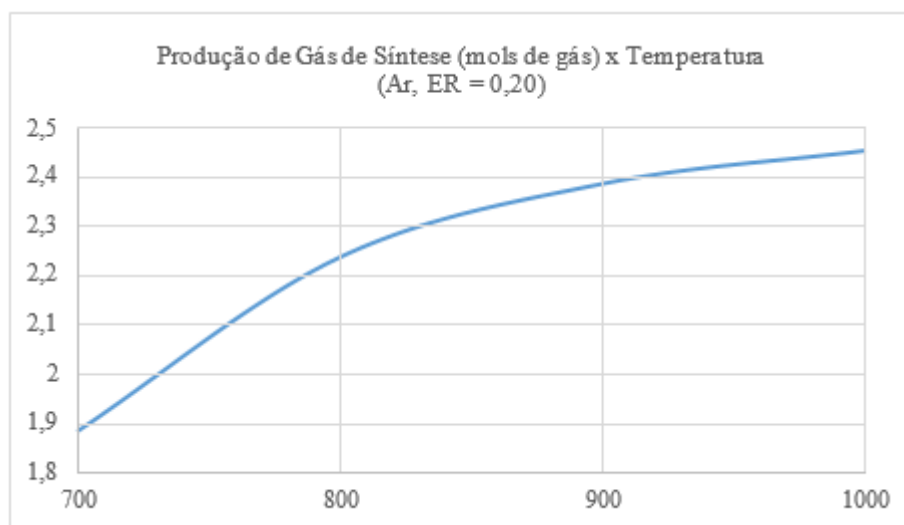
Tabela 23 - Características do gás de síntese gerado por biomassa, variando a temperatura

Características do gás de síntese gerado				
T	BAMBUSA VULGARIS		BAGAÇO DE CANA	
	H ₂ /CO	PCI (MJ/Nm ³)	H ₂ /CO	PCI (MJ/Nm ³)
700	7,649	0,459	7,820	0,380
800	6,913	0,591	7,067	0,525
900	6,828	0,671	6,975	0,612
1000	6,793	0,696	6,937	0,644

Figura 9 - Variação da composição do gás de síntese gerado por biomassa, variando a temperatura



Outra influência notável da temperatura no processo de gaseificação é o aumento da produção de gás com a temperatura, que pode ser visto na Figura 9. Kumar et al. (2008) cita que o aumento da produção de gás se dá devido ao aumento da conversão do carbono presente na biomassa, que cresce em função da temperatura.

Figura 10 - Produção do gás de síntese gerado variando a temperatura

Uma vez que o modelo utilizado é simples e reduzido, não estão sendo levados em consideração a influência da temperatura na produção e destruição de alcatrões e na eficiência energética do processo (KUMAR et al., 2009). Alcatrões são hidrocarbonetos mais pesados, geralmente aromáticos, gerados durante o processo. São impurezas e sua desconsideração faz o processo parecer mais eficiente, como se todo o carbono presente na biomassa fosse convertido apenas nos produtos de interesse, aproximando o método utilizado do ideal.

Para tornar a análise mais abrangente, a simulação foi feita também contemplando mais variações das condições operacionais, detalhadas nas próximas subseções. A expansão da análise será focada na simulação utilizando o bambu, uma vez que é uma biomassa menos citada na literatura que o bagaço de cana, que aparece de forma recorrente.

5.2.2 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE SÍNTESE GERADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DO AGENTE GASEIFICANTE

A Tabela 24 mostra um comparativo global, mostrando como o agente gaseificante influencia na composição do gás de síntese gerado para uma mesma biomassa, com o processo à mesma temperatura. Para a simulação usando o oxigênio puro como agente, foi mantida a mesma razão de equivalência que na simulação usando o ar. Para a simulação usando oxigênio e vapor d'água, foi especificada a razão molar de vapor/biomassa. Para a simulação usando puramente o vapor, foi mantida a mesma razão vapor/biomassa que na simulação usando oxigênio e vapor. Na Tabela 25, ficam expostas as características do gás. As subseções a seguir mostram com mais detalhes o comparativo da geração do gás de síntese em função dos diferentes agentes gaseificantes propostos.

Tabela 24 - Composição do gás de síntese gerado por biomassa, variando a temperatura e o agente gaseificante

Composição do gás de síntese gerado						
<i>BAMBUSIA VULGARIS</i> (ER = 0,25; S/B = 0,85; T = 800 C)						
MEIO	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂
AR	15,36%	25,97%	8,78%	5,50%	4,86%	39,53%
O ₂	25,40%	42,95%	14,52%	9,10%	8,04%	0,00%
O ₂ +VAPOR	23,55%	14,81%	21,63%	7,82%	32,19%	0,00%
VAPOR	21,44%	32,34%	24,51%	6,49%	15,21%	0,00%

Tabela 25 - Características do gás de síntese gerado variando o agente gaseificante

Composição do gás de síntese gerado		
<i>BAMBUSIA VULGARIS</i> (ER = 0,25; S/B = 0,85; T = 800 C)		
MEIO	PCI (MJ/Nm ³)	H ₂ /CO
AR	6,913	0,591
O ₂	11,432	0,591
O ₂ +VAPOR	8,728	0,663
VAPOR	7,221	1,590

5.2.2.1 COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO E DAS CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE SÍNTESE GERADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA, VARIANDO O AGENTE GASEIFICANTE ENTRE O AR E O OXIGÊNIO PURO

A composição pode ser encontrada na Tabela 26 e o poder calorífico na Tabela 27. Na mudança do agente gaseificante para oxigênio puro e mantendo a mesma razão de equivalência que a simulação com o ar, não há produção do nitrogênio diluente, fazendo com que a proporção dos gases energéticos sejam mais relevantes, aumentando seu poder calorífico por m³ de gás produzido.

É importante notar que uma vez que a simulação foi realizada usando a mesma proporção molar do oxigênio necessário para a gaseificação com ar, o volume de gás gerado é menor. A combinação entre maior proporção dos gases energéticos, a retirada do diluente um menor volume de gás gerado por mol explicam o aumento do poder calorífico. A retirada do nitrogênio e da pressão parcial que o gás exerce pode implicar em uma maior sensibilidade do processo à pressão.

Tabela 26 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura, utilizando oxigênio puro como agente gaseificante

Composição do gás de síntese gerado						
T	<i>BAMBUSA VULGARIS</i> (ER = 0,25; O ₂ puro)					
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂
700	17,04%	37,10%	31,63%	22,26%	9,02%	0,00%
800	25,40%	42,95%	14,52%	9,10%	8,04%	0,00%
900	32,51%	48,45%	8,30%	3,43%	7,31%	0,00%
1000	35,25%	50,64%	5,82%	1,22%	7,06%	0,00%
1200	35,87%	52,28%	4,06%	0,21%	7,58%	0,00%

Tabela 27 - Comparação do poder calorífico do gás de síntese gerado variando a temperatura, utilizando ar e oxigênio puro como agentes gaseificantes

Poder calorífico do gás de síntese (MJ/Nm ³)		
T	<i>BAMBUSA VULGARIS</i>	
	AR	O ₂
700	7,649	14,511
800	6,913	11,432
900	6,828	10,863
1000	6,793	10,641

Figura 11 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura, utilizando oxigênio puro como agente gaseificante

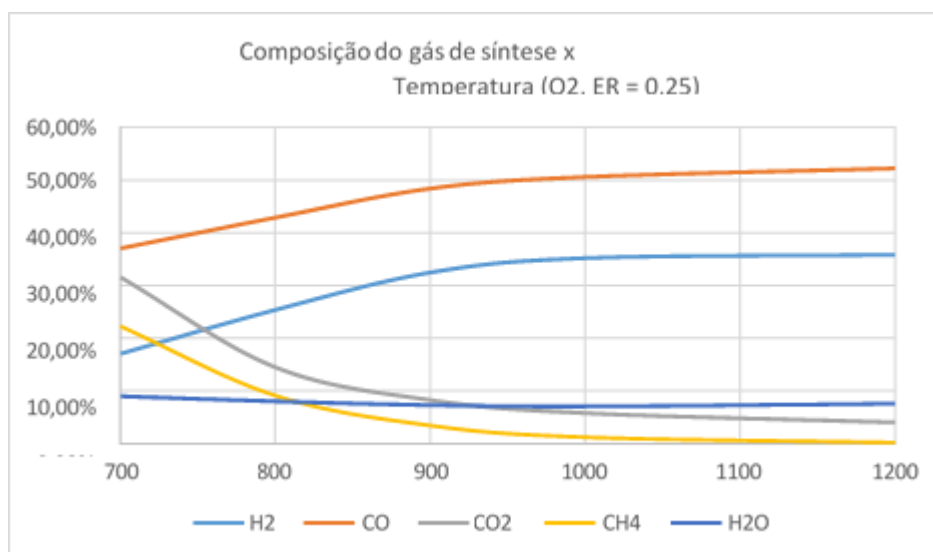
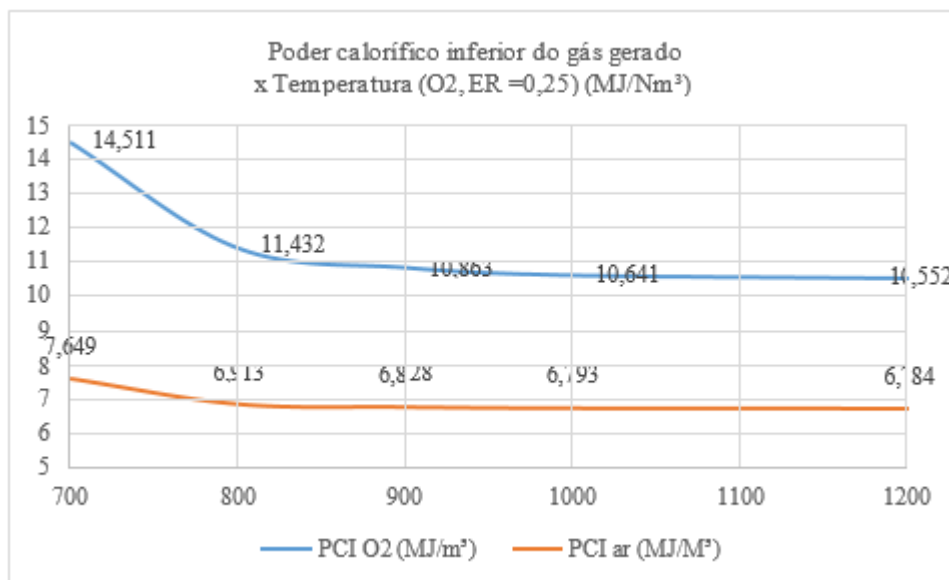


Figura 12 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e o agente gaseificante (ar e O₂)



A análise do poder calorífico inferior do gás mostra que seu valor decresce com a temperatura. Olhando detalhadamente a composição, como evidenciado na Tabela 26, a queda da quantidade de metano reduz drasticamente o poder calorífico. O aumento nas porcentagens de CO e H₂ não compensam, uma vez que o metano é o composto mais energético.

5.2.2.2 COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO E DAS CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE SÍNTESE GERADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA, VARIANDO O AGENTE GASEIFICANTE ENTRE O AR E UMA MISTURA DE OXIGÊNIO PURO E VAPOR D'ÁGUA

A composição pode ser encontrada na Tabela 28. Uma vez que a razão de equivalência foi mantida constante, é possível observar diretamente a influência do vapor d'água no gás de síntese gerado através da comparação com a simulação feita com o oxigênio puro. Segundo Kumar et al. (2009), a presença de vapor d'água desloca o equilíbrio da reação de mudança do vapor d'água, favorecendo os produtos, o que implica em maiores proporções de H₂ e CO.

Entretanto, a porcentagem de vapor d'água na composição final mostra que boa parte do vapor não reagiu. Uma grande diferença em relação ao gás gerado usando ar como meio foi a proporção H₂/CO. Esse valor é bastante relevante para obtenção de compostos químicos e hidrogênio através do gás de síntese, conforme explicitado na seção 3.3.

Tabela 28 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura, utilizando como agente gaseificante uma mistura de oxigênio e vapor d'água em uma nova proporção

Composição do gás de síntese gerado						
T	BAMBUSIA VULGARIS (ER = 0,25; S/B = 0,85; O ₂ + Vapor)					
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂
800	23,55%	14,81%	21,63%	7,82%	32,19%	0,00%
900	30,25%	21,66%	15,92%	2,97%	29,19%	0,00%
1000	32,22%	25,16%	12,88%	1,02%	28,72%	0,00%
1200	31,49%	28,30%	9,94%	0,16%	30,11%	0,00%

Uma vez que houve um excedente notável de vapor d'água, a simulação foi refeita usando as misturas O₂+ vapor d'água e ar + vapor d'água foi feita, dessa vez reduzindo a proporção entre vapor e biomassa para 0,5. As composições geradas estão nas Tabelas 29 e 30.

Tabela 29 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura, utilizando como agente gaseificante uma mistura de oxigênio e vapor d'água numa nova proporção

Composição do gás de síntese gerado						
T	BAMBUSIA VULGARIS (ER = 0,25; S/B = 0,50; O ₂ + VAPOR)					
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂
800	24,94%	21,70%	21,47%	8,78%	23,10%	0,00%
900	31,83%	29,13%	14,69%	3,29%	21,07%	0,00%
1000	33,98%	32,60%	11,47%	1,14%	20,82%	0,00%

Tabela 30 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura, utilizando como agente gaseificante uma mistura de ar e vapor d'água numa nova proporção

Composição do gás de síntese gerado						
T	BAMBUSIA VULGARIS (ER = 0,25; S/B = 0,50; AR+ VAPOR)					
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂
800	16,49%	14,35%	14,20%	5,80%	15,28%	33,88%
900	21,73%	19,89%	10,03%	2,25%	14,38%	31,72%
1000	23,51%	22,55%	7,93%	0,79%	14,40%	30,83%

As três simulações mostram que a influência principal do vapor d'água é o aumento da relação H₂/CO. O poder calorífico do gás é mais afetado pela redução de diluentes, como o excesso de vapor d'água e o nitrogênio. As Figuras 13 e 14 mostram uma comparação de gráfica dessas duas características.

Figura 13 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e o agente gaseificante (Ar, O₂, mistura O₂ + vapor)

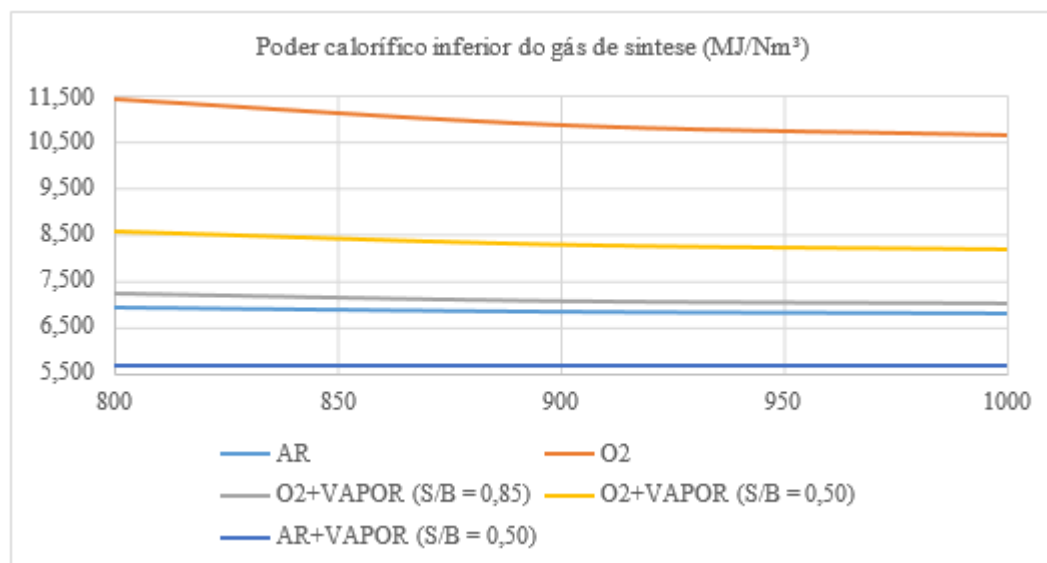
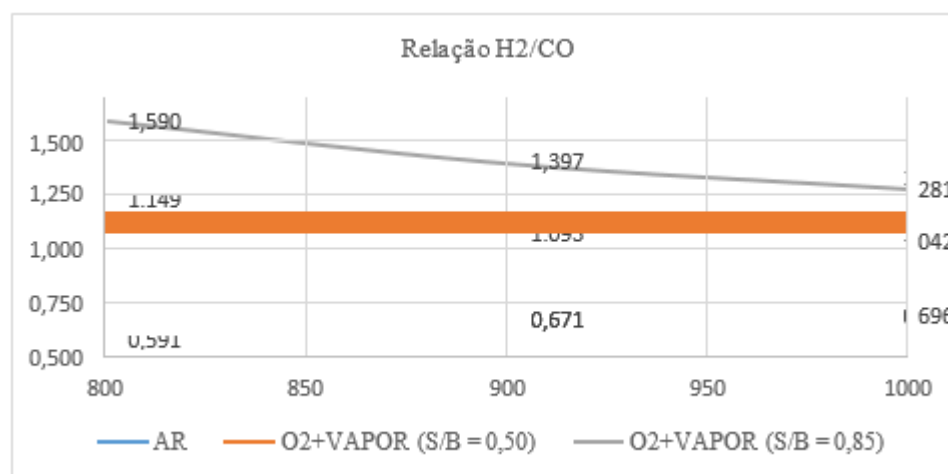


Figura 14 - Relação H₂/CO do gás de síntese gerado, variando a temperatura e o agente gaseificante (Ar, O₂, mistura O₂ + vapor)



5.2.2.3 COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO E DAS CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE SÍNTESE GERADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA, VARIANDO O AGENTE GASEIFICANTE ENTRE O AR E O VAPOR D'ÁGUA

A Tabela 31 mostra a composição do gás gerado. A seção anterior evidencia que a adição de vapor ao ar ou ao oxigênio puro tem como principal influência o aumento da relação H₂/CO. Utilizando apenas o vapor d'água como agente gaseificante pode-se verificar o mesmo efeito no aumento da reação H₂/CO, com valores comparáveis aos da mistura O₂ + vapor, mas verifica-se um aumento do poder

calorífico inferior em relação ao gás gerado usando outros agentes gaseificantes. As figuras 15 e 16 mostram, graficamente, a comparação entre os poderes caloríficos e as relações H₂/CO para os diferentes agentes gaseificantes utilizados.

É bastante válido lembrar que a adição de vapor d'água desloca o equilíbrio de reações exotérmicas da gaseificação, como a metanação e a mudança do vapor d'água, fazendo com que o calor gerado pelas reações internas de combustão possa não ser o suficiente para alimentar o processo, podendo requerer calor externo. Isso faz com que a temperatura precise estar num patamar mínimo de 750 °C para a injeção de vapor favorecer as reações.

Ainda que esta simulação use um modelo bastante simples, esses efeitos estão previstos aqui, uma vez que o modelo não previa o equilíbrio ou chegava a resultados não factíveis em quaisquer simulações utilizando vapor d'água em temperaturas inferiores a 750 °C. Além disso, Kumar et al. (2009) cita que razões mais altas entre o vapor d'água e a biomassa contribuem para a quebra de alcatrões.

Tabela 31 - Composição do gás de síntese utilizando vapor d'água como agente gaseificante, variando a temperatura e a razão vapor/biomassa.

Composição do gás de síntese gerado						
T	BAMBUSA VULGARIS (S/B = 0,50; VAPOR)					
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂
800	31,70%	30,61%	11,94%	14,18%	11,57%	0,00%
900	42,35%	37,87%	5,65%	5,83%	8,30%	0,00%
1000	47,31%	40,70%	3,24%	2,20%	6,55%	0,00%
1200	49,57%	42,31%	1,84%	0,40%	5,88%	0,00%
T	BAMBUSA VULGARIS (S/B = 0,85; VAPOR)					
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂
800	30,03%	19,82%	15,47%	12,72%	21,95%	0,00%
900	40,07%	27,74%	9,31%	5,22%	17,66%	0,00%
1000	44,33%	31,36%	6,47%	1,93%	15,92%	0,00%
1200	45,63%	33,88%	4,32%	0,33%	15,84%	0,00%

Figura 15 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e o agente gaseificante (Ar, O₂, mistura O₂ + vapor, vapor puro)

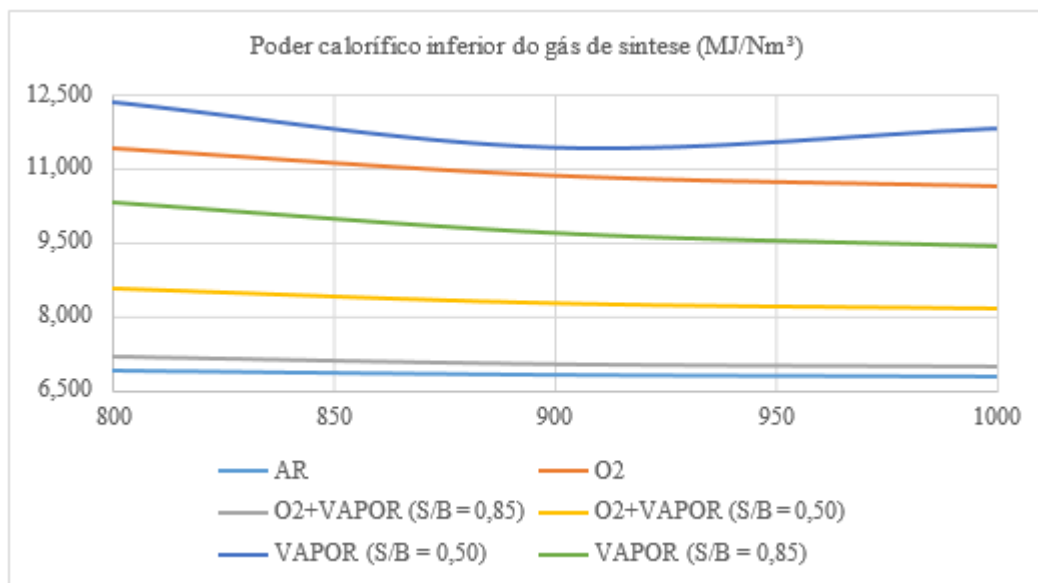
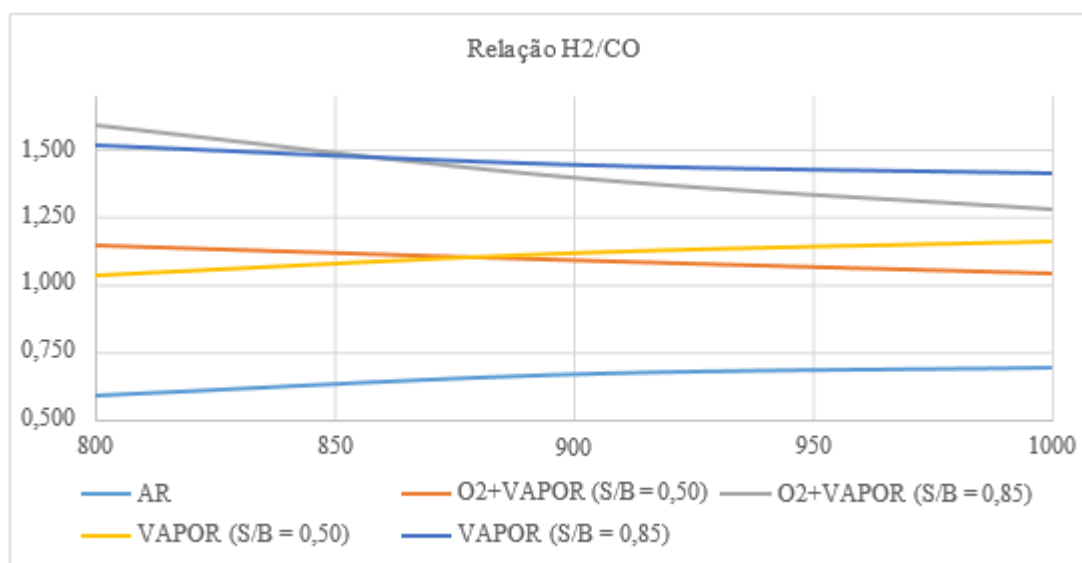


Figura 16 - Relação H₂/CO do gás de síntese gerado, variando a temperatura e o agente gaseificante (Ar e mistura O₂ + vapor, vapor puro)



A experiência com a variação da razão vapor/biomassa mostra como a proporção do agente gaseificante pode influenciar nas características do gás de síntese gerado. Simulando para outras razões vapor/biomassa, pode-se visualizar melhor o comportamento desse fator nas características do gás de síntese. As Figuras 17 e 18 mostram, respectivamente, o poder calorífico inferior e a relação H₂/CO para diferentes razões vapor/biomassa.

Figura 17 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão vapor/biomassa

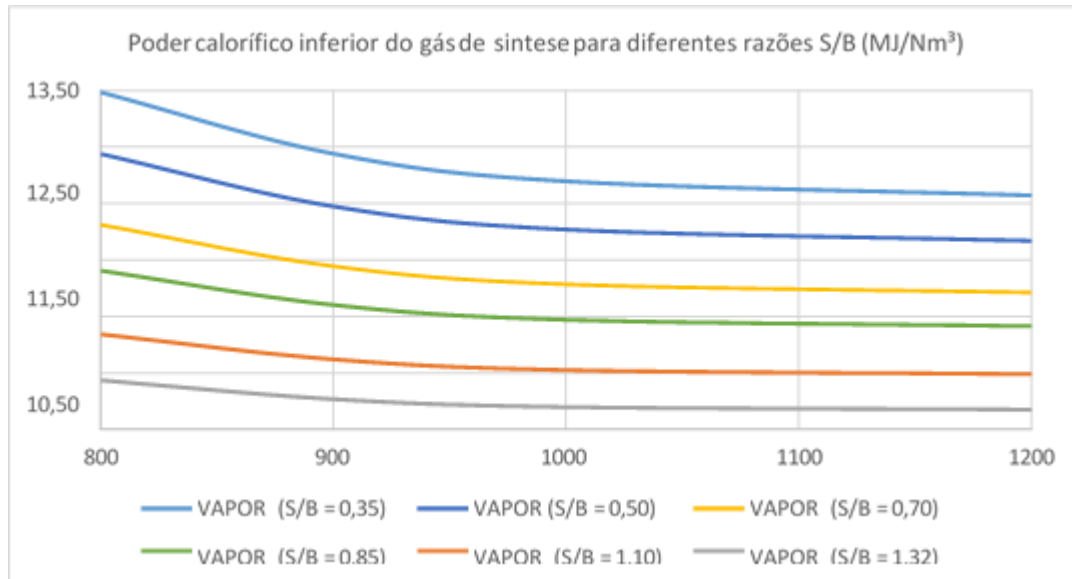
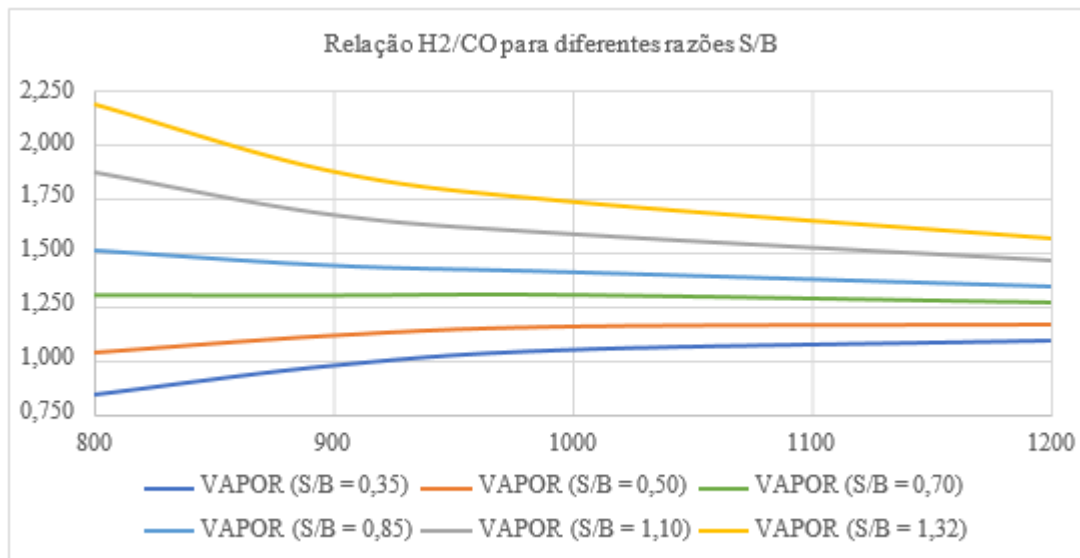


Figura 18 - Relação H₂/CO do gás de síntese gerado, variando a temperatura e razão vapor/biomassa



Pela Figura 17, é possível inferir que, para uma dada temperatura, quanto menor a relação S/B, menor o poder calorífico inferior para o gás gerado. Essa variação no poder calorífico pode ser explicada da mesma forma que antes, com o deslocamento do equilíbrio da equação favorecendo a formação de hidrogênio em detrimento do metano, o que pode ser justificado pela composição do gás, que pode ser vista parcialmente na Tabela 32.

Já pela Figura 18, pode-se concluir que, para uma dada temperatura, a relação H₂/CO vai ser sempre maior se a relação S/B for maior. Um fato interessante é que para relações vapor/biomassa abaixo de

0,70 a relação H₂/CO cresce com o aumento da temperatura, enquanto que para a relações vapor/biomassa acima desse limite, a relação H₂/CO decresce com a temperatura.

A partir da composição exposta na Tabela 32, pode-se verificar que, conforme esperado, as proporções de hidrogênio e monóxido de carbono crescem, assim como as proporções de dióxido de carbono e metano decrescem conforme a temperatura aumenta, para todas as condições da razão vapor/biomassa, conforme esperado.

A grande diferença entre o grupo de cima, com razão vapor/biomassa menor que 0,7 e o de baixo, com razões maiores que o limite, é a proporção do vapor d'água que não reagiu. O aumento da temperatura causa o consumo de grande parte do vapor d'água disponível, deslocando o equilíbrio das reações de metanação e troca do vapor d'água, fazendo com que o hidrogênio continue a ser produzido a uma taxa maior que ou próxima a do monóxido de carbono, conforme evidenciado na Tabela 33.

Tabela 32 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura e a razão vapor/biomassa

Composição do gás de síntese gerado: <i>BAMBUA VULGARIS</i> x T x S/B											
T; S/B=0,35	H2	CO	CO2	CH4	H2O	T; S/B=0,5	H2	CO	CO2	CH4	H2O
800	32,10%	37,95%	8,61%	14,53%	6,81%	800	31,70%	30,61%	11,94%	14,18%	11,57%
900	43,11%	44,03%	2,98%	6,04%	3,83%	900	42,35%	37,87%	5,65%	5,83%	8,30%
1000	48,51%	46,14%	1,07%	2,31%	1,96%	1000	47,31%	40,70%	3,24%	2,20%	6,55%
1200	51,42%	47,03%	0,28%	0,43%	0,84%	1200	49,57%	42,31%	1,84%	0,40%	5,88%
T; S/B=0,85	H2	CO	CO2	CH4	H2O	T; S/B=1,1	H2	CO	CO2	CH4	H2O
800	30,03%	19,82%	15,47%	12,72%	21,95%	800	28,65%	15,29%	16,15%	11,58%	28,32%
900	40,07%	27,74%	9,31%	5,22%	17,66%	900	38,33%	22,86%	10,63%	4,78%	23,40%
1000	44,33%	31,36%	6,47%	1,93%	15,92%	1000	42,25%	26,60%	7,81%	1,75%	21,59%
1200	45,63%	33,88%	4,32%	0,33%	15,84%	1200	43,13%	29,40%	5,44%	0,30%	21,73%

Tabela 33 - Crescimento percentual das espécies químicas do gás de síntese

CRESCIMENTO PERCENTUAL DAS ESPÉCIES QUÍMICAS DO GÁS DE SÍNTESE X TEMPERATURA					
T; S/B=0,35	H2	CO	T; S/B=0,5	H2	CO
800-900	134,33%	116,01%	800-900	133,60%	123,69%
900-1000	112,52%	104,79%	900-1000	111,69%	107,49%
1000-1200	106,00%	101,93%	1000-1200	104,79%	103,94%
T; S/B=0,85	H2	CO	T; S/B=1,1	H2	CO
800-900	133,43%	139,97%	800-900	133,78%	149,48%
900-1000	110,62%	113,04%	900-1000	110,22%	116,35%
1000-1200	102,94%	108,04%	1000-1200	102,09%	110,54%

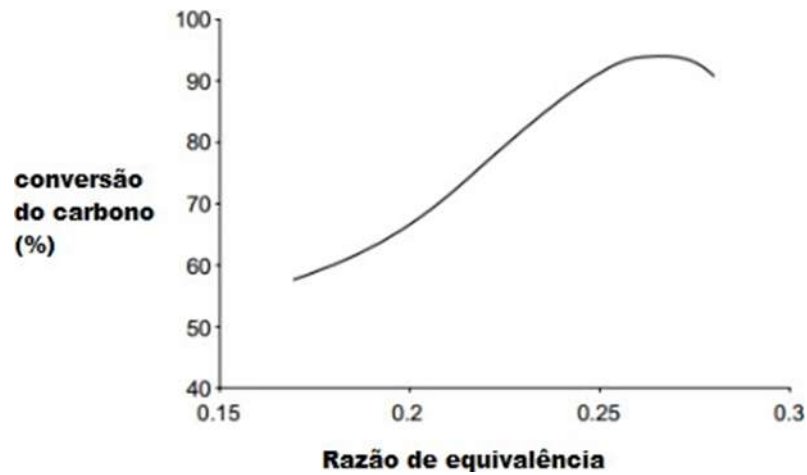
5.2.3 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE SÍNTESE GERADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA, DO AGENTE GASEIFICANTE E DA RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA

A simulação com a variação da razão vapor/biomassa mostra como a proporção do agente gaseificante pode influenciar as características do gás de síntese gerado. Diferentemente do vapor, em que autores utilizam razões vapor/biomassa de forma arbitrária, escolhendo usar ora uma razão molar, ora uma razão em massa, sem limites numéricos bem definidos, a razão de equivalência do ar e do oxigênio foi extensivamente medida, com fontes como Basu (2010), Kumar et al. (2009) e McKendry (2001) citando sua nítida influência na composição final do gás e na temperatura do processo.

A quantidade de oxigênio disponível favorece a reação de combustão, o que aumenta a temperatura do processo, o tempo de residência e estimula a conversão do carbono e a quebra de alcatrões, melhorando a qualidade do combustível. Entretanto, combustão em excesso pode acarretar no consumo excessivo da biomassa disponível, afetando negativamente o gás gerado. Portanto, é necessário chegar a um valor ótimo da razão de equivalência. Segundo Basu (2010), os valores ótimos para a razão de equivalência para a conversão de carbono estão em torno de 0,25, conforme mostrado na Figura 19.

Kumar et al. (2009) cita que o aumento da razão de equivalência geralmente vem seguido de aumento na produção de gás, mas as diferentes fontes que ele consultou chegaram a resultados contraditórios quanto ao aumento das proporções dos componentes energéticos, como hidrogênio, metano e monóxido de carbono. Portanto, para estudar como a razão de equivalência afeta este processo proposto, novas simulações foram feitas variando a razão de equivalência. O resultado pode ser visto nas Figuras 20 a 25.

Figura 19 - Relação entre a razão de equivalência e a conversão percentual do carbono no processo de gaseificação



Fonte: Basu (2010), adaptado.

Figura 20 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando o ar como agente gaseificante

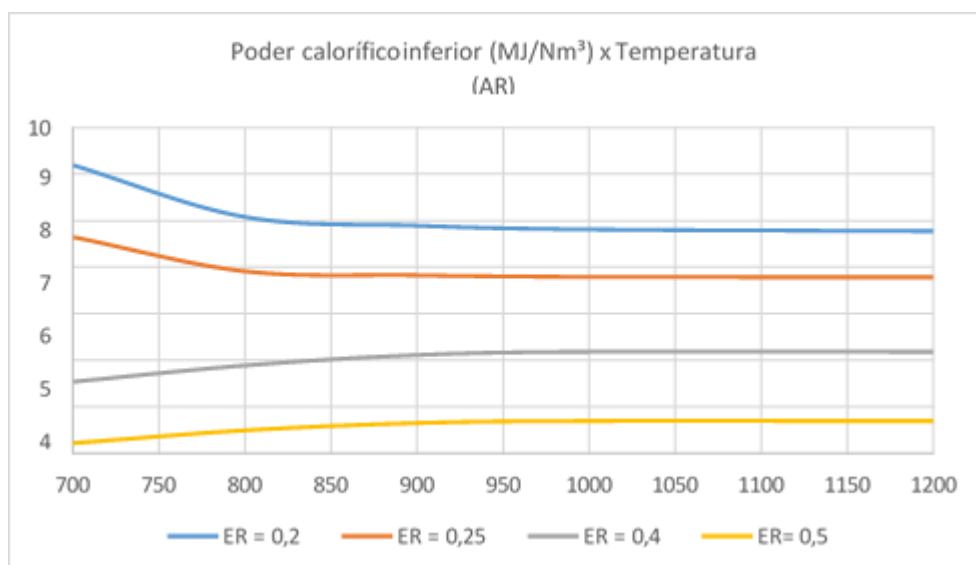


Figura 21 - Comparação da relação H_2/CO do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando o ar como agente gaseificante

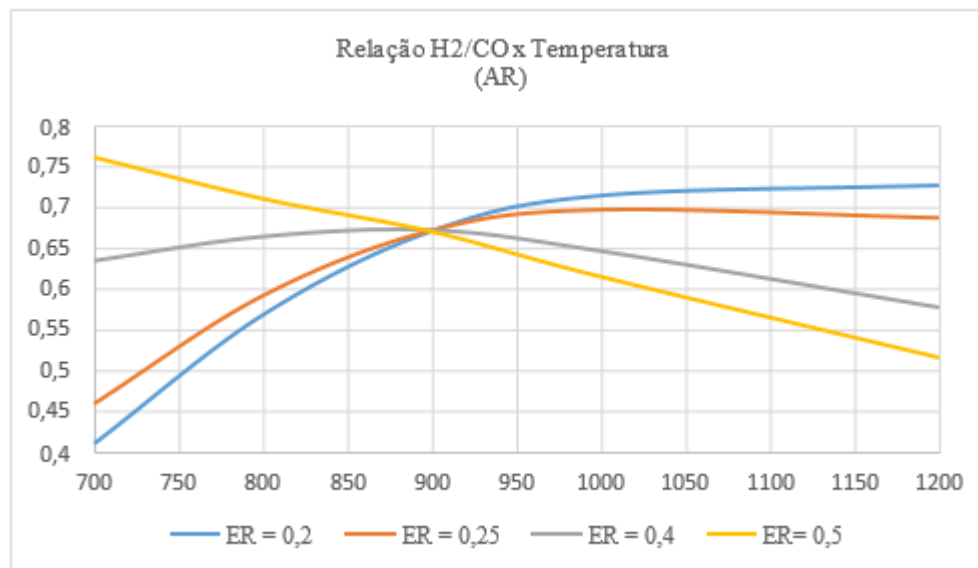


Figura 22 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando o oxigênio como agente gaseificante.

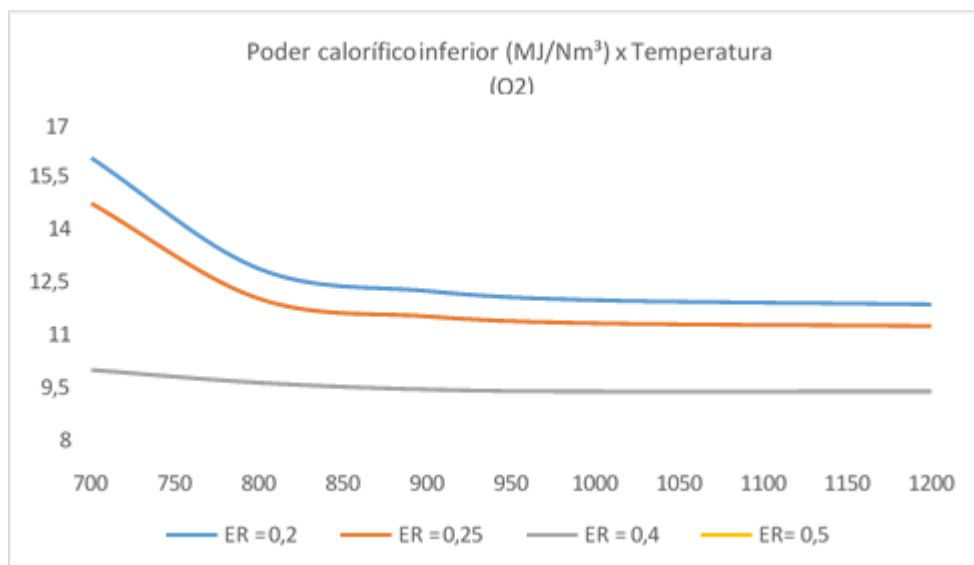


Figura 23 - Comparação da relação H_2/CO do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando o oxigênio como agente gaseificante.

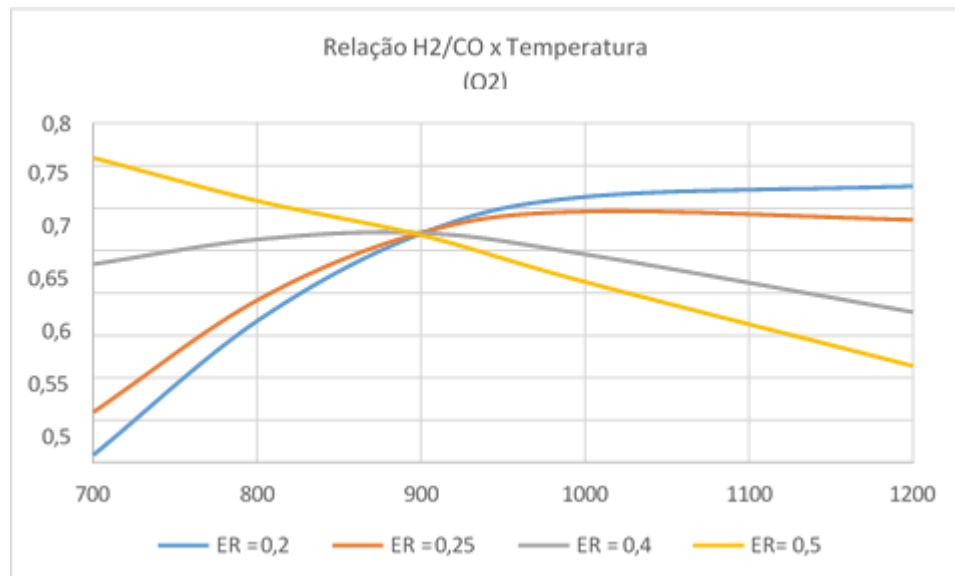


Figura 24 - Comparação do poder calorífico inferior do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando a mistura oxigênio + vapor d'água ($S/B = 0,85$) como agente gaseificante.

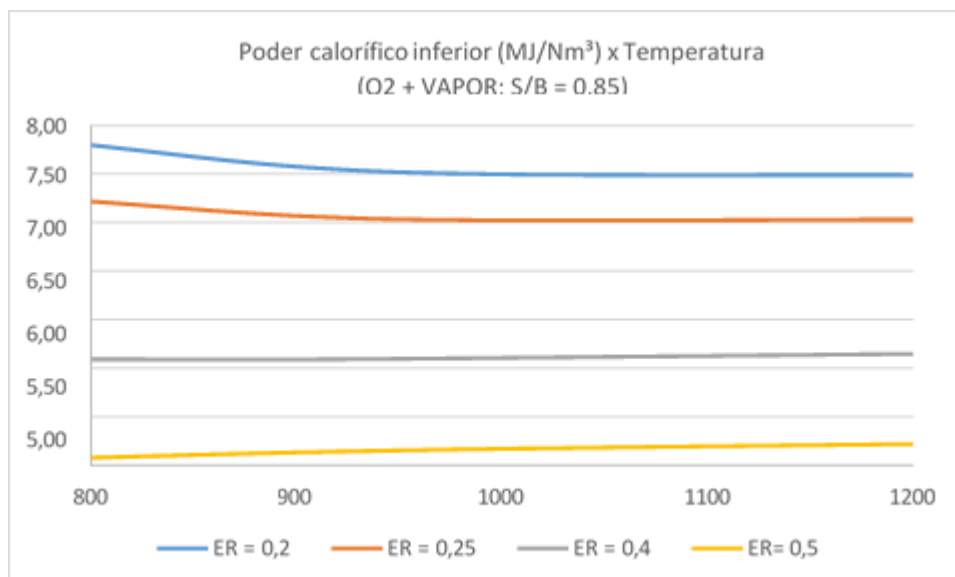
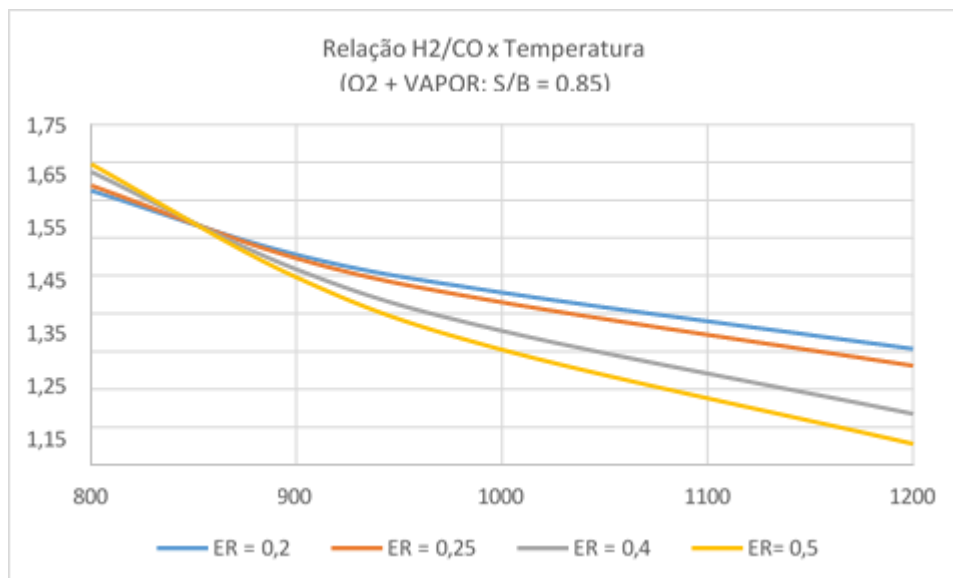


Figura 25 - Comparação da relação H₂/CO do gás de síntese gerado, variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando a mistura oxigênio + vapor d'água (S/B = 0,85) como agente gaseificante.



As Figuras 20 e 22 mostram que, para uma dada temperatura, a redução da razão de equivalência aumenta o poder calorífico inferior do gás de síntese.

As Figuras 21 e 23 mostram um perfil parecido na relação H₂/CO. Em ambos os gráficos, quanto menor o valor da razão de equivalência, maior a temperatura em que o gás gerado atingia o máximo valor para a razão H₂/CO. Valores intermediários da razão de equivalência mostram um pico de eficiência em temperatura intermediárias, de forma análoga ao esperado pela literatura.

Já as Figuras 24 e 25 mostram que a quantidade de oxigênio presente teve uma influência diminuta ou até irrelevante para ambos os critérios, sendo a quantidade de vapor d'água na reação o determinante.

A influência da razão de equivalência na composição do gás pode ser brevemente vista na Tabela 33, que explicita a variação da composição do gás gerado em função da temperatura e da razão de equivalência, usando o ar como agente gaseificante. A Tabela mostra que o aumento da razão de equivalência tem uma influência direta na composição, para qualquer temperatura.

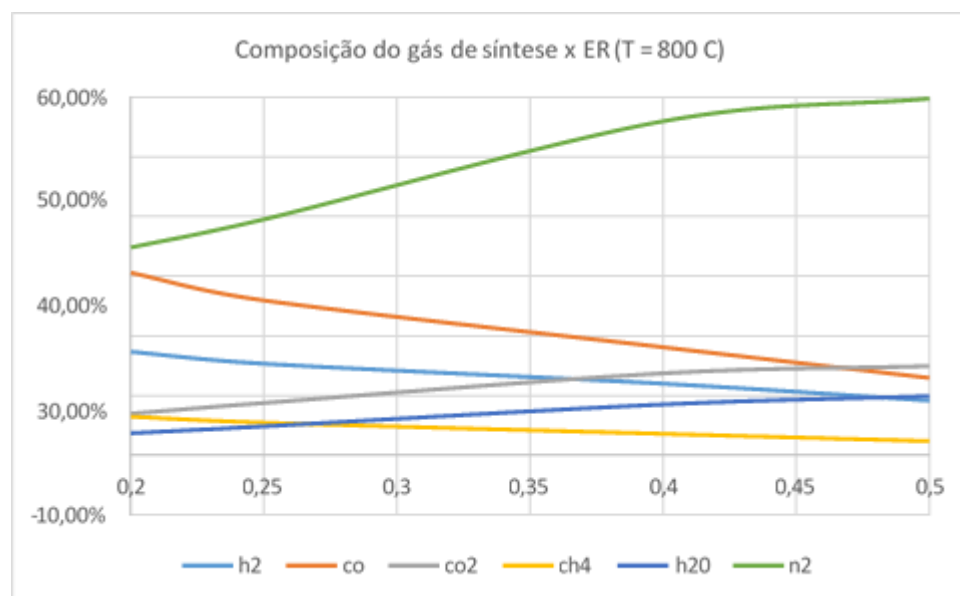
A mudança na razão de equivalência ora aumenta a proporção de um composto, como visto no dióxido de carbono e água, que crescem com o crescimento da razão de equivalência, ora diminui a proporção do composto, como visto no hidrogênio, no monóxido de carbono e no metano. A diminuição na proporção dos três compostos energéticos com a razão de equivalência explica a diminuição do poder

calorífico inferior, mostrado na Figura 20. Também é possível ver que a produção do gás cai com o aumento da razão de equivalência. O comportamento dos gases em função da razão de equivalência para uma temperatura fixa pode ser visto na Figura 26.

Tabela 34 - Composição do gás de síntese gerado variando a temperatura e a razão de equivalência, utilizando o ar como agente gaseificante.

Composição do gás de síntese gerado: <i>BAMBUSA VULGARIS</i> x T x ER (AR)													
T; ER=0,20	h2	co	co2	ch4	h2o	n2	T; ER=0,25	h2	co	co2	ch4	h2o	n2
700	10,20%	24,95%	15,04%	13,77%	3,82%	42,41%	700	8,98%	19,55%	16,67%	11,73%	4,75%	47,29%
800	17,36%	30,61%	6,99%	6,52%	3,71%	34,81%	800	15,36%	25,97%	8,78%	5,50%	4,86%	39,53%
900	23,43%	34,98%	3,47%	2,64%	3,06%	32,42%	900	20,43%	30,45%	5,21%	2,16%	4,59%	37,14%
1000	26,17%	36,70%	2,12%	0,98%	2,63%	31,40%	1000	22,50%	32,33%	3,72%	0,78%	4,51%	36,16%
T; ER=0,40	h2	co	co2	ch4	h2o	n2	T; ER=0,50	h2	co	co2	ch4	h2o	n2
700	6,33%	9,98%	18,72%	7,23%	7,37%	56,70%	700	5,04%	6,64%	18,89%	5,12%	8,90%	60,45%
800	12,01%	18,12%	13,73%	3,63%	8,52%	55,99%	800	9,19%	12,97%	14,93%	2,41%	9,90%	59,78%
900	15,66%	23,35%	10,53%	1,33%	9,27%	55,53%	900	11,33%	16,96%	12,26%	0,80%	10,75%	59,22%
1000	16,56%	25,66%	8,84%	0,44%	9,94%	55,13%	1000	11,50%	18,76%	10,77%	0,25%	11,50%	58,72%

Figura 26 - Variação da composição do gás em função da razão de equivalência, para temperatura de 800 °C, usando ar como agente gaseificante.



5.3 USOS DO GÁS DE SÍNTESE

As Tabelas 7 e 8, na seção 3.3, explicitam os requisitos do gás de síntese para a produção eficiente de um produto final. A partir dos critérios das Tabelas 7 e 8 e dos dados gerados nas simulações apresentados na seção 5.2, é possível gerar uma correspondência entre os requisitos para os usos finais e as condições operacionais que gerariam um gás de síntese capaz de atender aos requisitos de maneira otimizada. O resultado desta correspondência está exibido na Tabela 35.

As condições operacionais escolhidas na Tabela 35 levam em consideração a forma mais eficiente de atender aos requisitos. Foi assumido que a produção seria em baixa escala e outros fatores, como tempo de residência, não foram levados em consideração. Pré- processamento da biomassa não foi levado em consideração. Pós-processamento do gás gerado não foi levado em consideração devido à tentativa de enquadrar os gases com as condições mais otimizadas. Através do pós-processamento, o gás poderia se enquadrar em condições boas o bastante para produção de um certo produto final ou refinar as condições de um gás cuja composição se enquadre melhor nos requisitos.

Outro fator que não foi considerado foi o custo. Oxigênio puro é um combustível caro, sendo bastante significativo nos custos da gaseificação, podendo não ser viável em todas as situações. Custos também podem ser fatores decisivos para o uso ou não de uma biomassa, devido a condições de pré-processamento, ou do enquadramento ou refino de um gás para uma dada aplicação, devido a condições de pós-processamento. Outros custos, como instalação e manutenção do reator, ou de uma planta produtora, também não foram levados em consideração.

Tabela 35 - Correspondência entre os critérios para uso do gás de síntese e as condições operacionais capazes de gerar um gás que atenda aos critérios de forma otimizada

Requisitos x Condições Operacionais Sugeridas			
USO FINAL	Geração de Energia	Formação de H ₂	Processo de Fischer-Tropsch
PCI	Alta	Irrelevante	Irrelevante
RAZÃO H ₂ /CO	Irrelevante	Alta	Alta
% CH ₄	Desejável	Baixa	Alta
% CO ₂ e H ₂ O	Baixa	Água é desejável	Baixa
PUREZA	Alta	Altíssima	Desejável
CONFIGURAÇÃO DO REATOR	Co-corrente (assumindo baixa escala)		
MEIO	Oxigênio	Vapor d'água	Vapor d'água
ER; S/B	0,20 - 0,25	1 ou acima	Abaixo de 0,7
TEMPERATURA DE OPERAÇÃO (°C)	700 - 800	Próximo aos 800	800 – 1000

Uma vez que o trabalho usou o custo como critério de seleção na seção 4.1, buscando formas econômicas de usar o gás gerado, é relevante mostrar o que seriam composições do gás de bom custo-

benefício e suas possíveis aplicações. A estimativa pode ser vista na Tabela 36. Para esta estimativa, foram usadas as mesmas considerações feitas para a análise acima, representada pela Tabela 35.

Tabela 36 - Estimativa de menor custo e suas possíveis aplicações

Condições operacionais de custo baixo x uso final			
MEIO	ER; S/B	TEMPERATURA DE OPERAÇÃO (°C)	Uso final
Ar	0,2 - 0,25	700 - 800	Geração de Energia
Ar + Vapor d'água	0,2 - 0,25; em torno de 0,5	800 - 900	Produção de Hidrogênio
Vapor d'água	0,35 - 0,50	800 - 900	Processo de Fischer - Tropsch

6. CONCLUSÃO

Existe biomassa residual na região Nordeste que pode ser transformada em energia através do processo de gaseificação. O bagaço de cana, resíduo da atividade agrícola, e o bambu, resíduo da atividade industrial, são apenas dois exemplos, escolhidos devido à similaridade de sua composição baseada na análise elementar.

O processo de gaseificação é bastante versátil, uma vez que aceita um grande número de combustíveis orgânicos, sendo uma alternativa interessante, do ponto de vista econômico, para reaproveitamento de resíduos orgânicos de uma forma geral. Em compensação, é um processo que é fortemente afetado por inúmeros parâmetros, afetando bastante a previsibilidade dos resultados gerados.

A fim de garantir uniformidade nos resultados e obter um gás com a condição desejada, é necessário conhecimento prévio detalhado dos combustíveis, conhecimento da influência do reator, investimento em pré-processamento e no conhecimento e controle fino das condições operacionais. Critérios de seleção qualitativos foram criados de modo a entender melhor essa relação entre as diversas condições e facilitar a escolha da configuração do gaseificador que será utilizada para o processo, e assim, atender os requisitos de forma eficiente.

Existem várias abordagens na literatura que se propõem a prever as características do processo de gaseificação. Uma vez que o trabalho visava entender melhor a influência da temperatura, foi tomada a decisão de usar um modelo termodinâmico para descrever o processo, a estequiometria e o

equilíbrio de suas reações químicas. A resolução do modelo é possível através do uso de métodos numéricos. Para o modelo deste trabalho, o método Newton-Raphson foi suficiente para gerar soluções satisfatórias e prever a composição e as condições do gás gerado. O modelo, entretanto, foi feito de forma bastante simples a partir de diversas considerações simplificadoras utilizadas. Na comparação com a literatura, viu-se que modelo tinha algumas imprecisões, que poderiam ser resolvidas no caso da criação de um modelo mais robusto.

Dentre as condições operacionais, a temperatura é a condição mais relevante. Como o processo de gaseificação consiste de várias reações parciais de naturezas diferentes, a temperatura desloca o equilíbrio químico dessas subreações, influenciando fortemente a composição de produtos intermediários e finais. Através da simulação, pode ser visto que a temperatura influencia bastante a produção e a composição do gás e seu poder calorífico. Outros fatores também tem bastante relevância no processo, como o agente gaseificante utilizado e a razão de equivalência.

Uma vez gerado o gás de síntese, foi feita uma análise tendo achar as melhores correspondências entre as propriedades do gás gerado e os requisitos para seus diferentes usos. O gás de síntese é um produto relevante uma vez que tem diversas aplicações, diretas e indiretas. A análise proporcionou diretrizes sobre quais das composições simuladas seriam mais eficientes para um dado uso, assim como relevou formas econômicas de atender um dado uso final do gás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2ª edição. Brasília, 2005. Disponível em <www.aneel.gov.br>. Acesso em 04/2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ª edição. Brasília, 2008. Disponível em <www.aneel.gov.br>. Acesso em 04/2019.

ANSELMO FILHO P., Bard, O. Biomass Resources for Energy in Northeastern Brazil. Applied Energy. Cranfield. V. 77, p. 51-67, 2004.

Bambu e bioconstrução. Sítio Aborígene. Disponível em <<https://sitioaborigene.com.br/5-bambu-e-bioconstrucao/>>. Acesso em 07/2019.

BASU, P. Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory. Oxford, Academic Press, 2010.

BP. Statistical Review of World Energy. 2019. Disponível em <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>> Acesso em 07/2019.

CALLAGHAN, C. A., Kinetics and catalysis of the water-gas-shift reaction: a microkinetic and graph theoretic approach. Tese de doutorado, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 2006.

ÇENGEL, Y. A., BOLES, M. A. Thermodynamics: An Engineering Approach. 7a edição. Nova Iorque, McGraw-Hill, 2010.

CHANNIWALA, S.A., PARIKH, P.P., A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. Fuel, v. 81, p. 1051-1063, 2002.

CHEN, W.H., CHEN C., HUNG, C. SHEN, C., HSU, H. A comparison of gasification phenomena among raw biomass, torrefied biomass and coal in an entrained flow reactor. Applied Energy 112, p. 421-430, 2013.

CHODAPANEEDI, R. SANKE, N., REDDY, D.N., CFD Simulation of an Advanced Biomass Gasifier. Second International Conference on Emerging Trends in engineering, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, p. 42-48 2009.

CODECEIRA NETO, A. Assessment of novel power generation systems for the biomass industry. PhD thesis, School of Mechanical Engineering, Cranfield University, UK, 1999.

CORTEZ, L.A.B. LORA, E. E. S., GOMEZ, E. O. Biomassa para energia. Campinas, Editora da Unicamp, 2008.

ECN. Phyllis2: Database for biomass and waste. Disponível em <<https://phyllis.nl/>>. Acesso em 09/2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional. 2019. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes/dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico->

470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf> Acesso em 05/2019.

EPHRAIM, A., POZZOBON, V., LOUISNARD, O., PHAM MINH, D., NZIHOU, A.,

SHARROCK, P. Simulation of Biomass Char Gasification in a Downdraft Reactor for Syngas Production..AIChE Journal, v. 62, n. 4, 2015.

FABREGAS, J., FONTALVO, C.E., VALENCIA, G.E., OBREGON, L.G., CARDENAS,Y.D. Obtaining and Evaluation of Synthesis Gases from Biomass Gasification using Finite Element Analysis. 7th Academic International Workshop: Advances in Cleaner Production. Barranquilla, Colombia, 2018.

GUPTA, R., JAIN, P., VYAS, S. CFD Modeling and Simulation of 10KWE Biomass Downdraft Gasifier. Internation Journal of Current Engineering and Technology 4, v.7. Inpressco, 2017.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, v. 2, 2006.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook. 2018. Disponível em<www.iea.org>. Acesso em 05/2019.

JARDIM, J. F. Cultura do bambu e sua utilização. 1997. Trabalho apresentado na 2ª Semana de Engenharia Florestal. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1997.

JARUNGTHAMMACHOTE, S., DUTTA, A. Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. Energy 32, p. 1660-1669, 2007.

JORAPUR, R., RAJVANSHI, A.K. Sugarcane leaf-bagasse gasifiers for industrial heating applications. Biomass and Bioenergy, v. 13(3), p. 141-146., 1997.

KARATAS, H., OLGUN, H., AKGUN, F. Experimental results of gasification of cotton stalk and hazelnut shell in a bubbling fluidized bed gasifier under air and steam atmospheres. Fuel 2013, v. 112, p. 494–501, 2013.

KUMAR, A., JONES, D.D., MILFORD, A.H. Thermochemical Biomass Gasification: A Review of the Current Status of the Technology. Energy 2009, v.2, p. 559-581, 2009.

LA VILLETTE, M., COSTA, M., MASSAROTTI, N. Modelling approaches to biomass gasification: A review with emphasis in the stoichiometric method. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 74, p. 71-88, 2017.

LOHA, C., CHATTERJEE, P.K., CHATTOPADAHYAY, H. Performance of fluidized bed steam gasification of biomass – modeling and experiment. Energy Conversion and Management, v. 52, p. 1583 – 1588, 2011.

Lower and Higher Heating Values. Disponível em <http://www.cement-co2-protocol.org/en/Content/Internet_Manual/tasks/lower_and_higher_heating_values.htm>. Acesso em 09/2019.

MAGALHÃES, E.M., Combustion study of mixtures resulting from a gasification process of forest biomass. 2011. 233f. Tese de doutorado, École Nationale Supérieure de Mécanique et D'Aérotechnique, Chasseneuil-du-Poitou, 2011.

MARTINEZ, J.D., et al. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. *Renewable Energy*, v. 38, p. 1-9, 2012.

MARTINEZ-HERNANDEZ, E., et al. Sugarcane bagasse valorization strategies for bioethanol and energy production. *Sugarcane – Technology and Research*. Disponível em

<<https://www.intechopen.com/books/sugarcane-technology-and-research/sugarcane-bagasse-valorization-strategies-for-bioethanol-and-energy-production>> Acesso em 06/2019.

MCKENDRY, P. Energy Production from biomass (part 1): overview of biomass. *Biosources Technology*. v. 83, p. 37-46, 2002.

MCKENDRY, P. Energy Production from biomass (part 2): conversion technologies. *Biosources Technology*. v. 83, p. 47-57, 2002.

Methane Tabela. NIST-JANAF Thermochemical Tables. NIST Standard Reference Database 13, National Institute of Standards and Technology, 1998.

MOREIRA, J.R., GOLDEMBERG, J. The alcohol program. *Energy Policy*, 27, v.4, p. 229- 245, 1999.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional. Brasília, 1982.

PAL, R. Chemical exergy of ideal and non-ideal gas mixtures and liquid solutions with applications. *International Journal of Mechanical Engineering*, v. 47, p. 44 – 72, 2019.

PEDUZZI, P. Conab: produção de cana-de-açúcar diminui 3,6%. Brasília, 2018. Disponível em <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2018-04/conab-producao-de-cana-de-acucar-diminui-36>>. Acesso em 07/2019.

PRING, J. N., FAIRLIE, D. M. The methane equilibrium. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, v. 101, p. 91-103, 1912.

PRINS, M.J, PTASINSKI, K.J., JANSSEN, F.J.J.G. From coal to biomass gasification: Comparison of thermodynamic efficiency. *Energy*, v. 32, p. 1248 – 1259, 2007.

PróAlcool – Programa Brasileiro de Álcool. 2012. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool/programa-etanol>>. Acesso em 07/2019.

RAMPLING, T. Fundamental research on the thermal treatment of wastes and biomass: literature review of part research on thermal treatment of biomass and waste. ETSU B/T1/00208/Rep/1, 1993.

RAUCH, R., HRBEK, J., HOFBAUER, H. Biomass gasification for synthesis gas production and applications of the syngas. *WIREs Energy Environ*, v. 3, p. 343-362, 2014.

RODRIGUE, J. The Geography of Transport Systems. 4 edição. Nova Iorque, 2017. Disponível em: <https://transportgeography.org/?page_id=5844>. Acesso em 08/2019.

RUIZ, J.A., JUÁREZ, M.C., MORALES, M.P., MUÑOZ, P., MENDÍVIL, M.A. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 18, p. 174-183, 2013.

SAMIRAN, N.A., JAAFAR, M.N.M., NG, LAM, CHONG. Progress in biomass gasification technique – With focus on Malaysian palm biomass for syngas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 62, p. 1047-1062, 2016.

SHETH, K. Top Sugarcane Producing Countries. 2017. Disponível em:<<https://www.worldatlas.com/articles/top-sugarcane-producing-countries.html>>. Acesso em 06/2019.

SILVA, J. A., Análise paramétrica da transformação termoquímica de biomassa via processo de gaseificação: uma abordagem numérica. Dissertação de mestrado, UFPE, Recife, 2016.

SINGH, A., SRIVASTAVA, N. K., YADAV, V., KUMAR, D. Thermodynamic Study and Improving Efficiency of Biomass Gasifier. *Advance Research in Electrical and Electronic Engineering*, v. 2, n. 5, p. 47-51, 2015.

UNIVERSITY OF COLORADO. What is Biomass? Disponível em<<http://lsa.colorado.edu/essence/texts/biomass.html>>. Acesso em 06/2019.

UR-REHMAN, S., MUSHTAQ, Z., ZAHoor, T., JAMIL, A.; MURTAZA, M.A. "Xylitol: a review on bioproduction, application, health benefits, and related safety issues". *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2005. <doi:10.1080/10408398.2012.702288. >

U.S ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Biomass Explained. Disponível em <<https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>>. Acesso em 06/2019.

WAGMAN. D. D., KILPATRICK, J.E., TAYLOR, W.J., PITZER, K.S., ROSSINI, F.D.

Heats, free energies, and equilibrium constants of some reactions involving O₂, H₂, H₂O, C, CO, CO₂ and CH₄. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, v. 34, p.143- 161, 1945.

WANG, L., WELLER, C. L., JONES, D. D., HANNA, M. A. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production. *Biomass and Energy*, v. 32, p. 573 – 581, 2008.

WANG, Y., KINOSHITA, C. M., Kinetic model of biomass gasification. *Solar Energy*, v. 51, n. 1, p. 19-25, 1993.

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA PRODUÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE ATRAVÉS DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

Victor Ferreira Guimarães
Jornandes Dias da Silva



conhecimentolivre.org/home



contato@conhecimentolivre.org



[editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE