

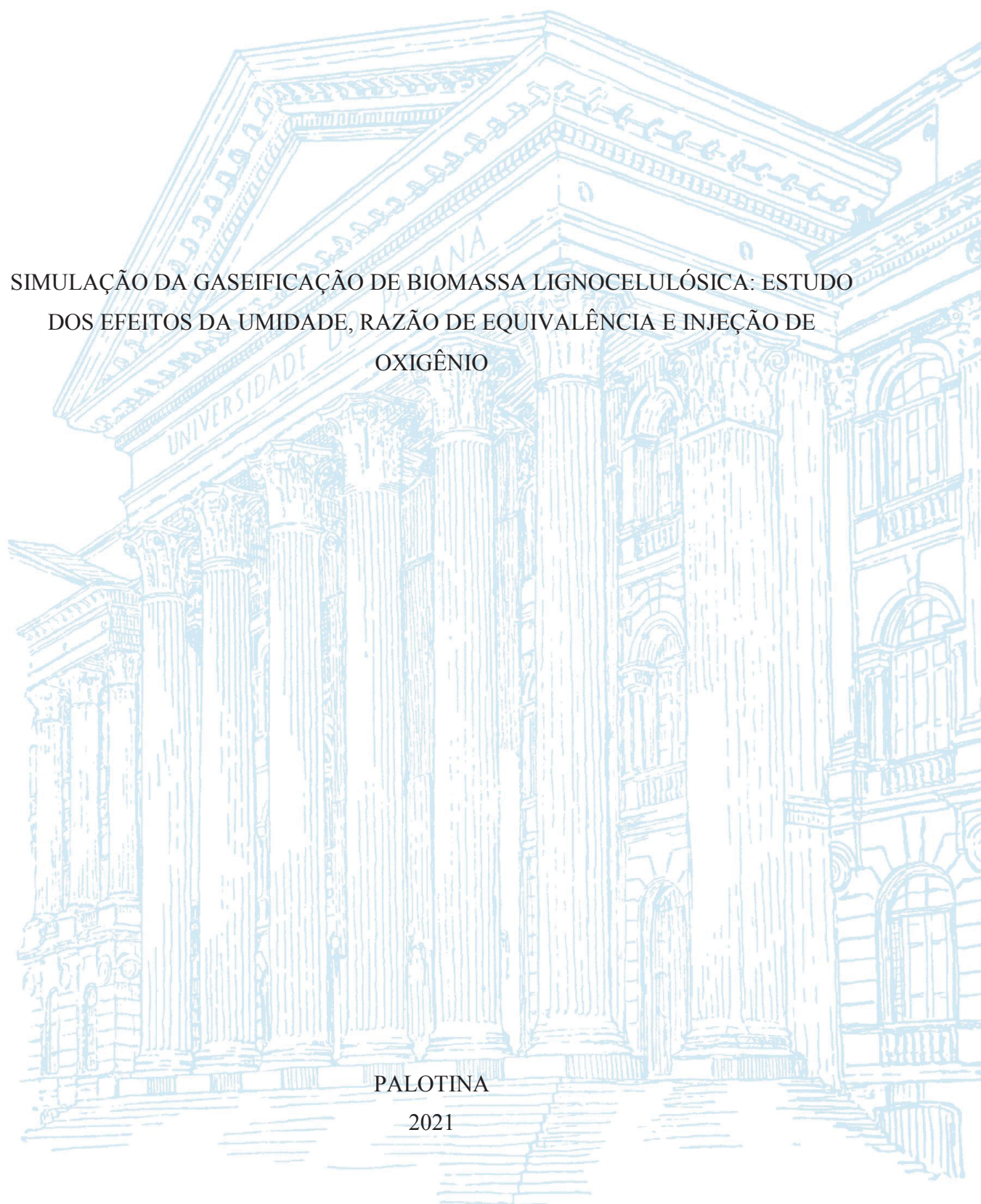
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELIAS GABRIEL MAGALHÃES SILVA

SIMULAÇÃO DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA: ESTUDO
DOS EFEITOS DA UMIDADE, RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA E INJEÇÃO DE
OXIGÊNIO

PALOTINA

2021



ELIAS GABRIEL MAGALHÃES SILVA

SIMULAÇÃO DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA: ESTUDO
DOS EFEITOS DA UMIDADE, RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA E INJEÇÃO DE
OXIGÊNIO

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de Concentração: Produção de Biocombustíveis e Co-produtos. para obtenção do título *Magister Scientiae*.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sequinel

Co-Orientadores: Prof. Dr. Wilson de Aguiar Beninca
Dr. Juarez Campolina Machado

PALOTINA
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586 Silva, Elias Gabriel Magalhães
Simulação da gaseificação de biomassa lignocelulósica: estudo dos efeitos da umidade, razão de equivalência e injeção de oxigênio / Elias Gabriel Magalhães Silva – Palotina, 2021.
101f.

Orientador: Rodrigo Sequinel
Coorientador: Wilson de Aguiar Beninca
Coorientador: Juarez Campolina Machado
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Programa de Pós-graduação em Bioenergia.

1. Biomassa. 2. Modelagem. 3. Simulação. 4. Energia. 5. Gaseificação. 6. Geração descentralizada. 7. Otimização. I. Sequinel, Rodrigo. II. Beninca, Wilson de Aguiar. III. Machado, Juarez Campolina. IV. Universidade Federal do Paraná. V. Título.

CDU 620

Ficha catalográfica elaborada por Liliane Cristina Soares Sousa – CRB 9/1736



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR PALOTINA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO BIOENERGIA - UEL -
UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR -
40002012041P8

ATA Nº44

**ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE MESTRADO PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM BIOENERGIA - UEL - UEM - UEPG - UNICENTRO -
UNIOESTE - UFPR**

No dia nove de setembro de dois mil e vinte e um às 13:30 horas, na sala online, via Plataforma Microsoft Teams, foram instaladas as atividades pertinentes ao rito de defesa de dissertação do mestrando **ELIAS GABRIEL MAGALHÃES SILVA**, intitulada: **SIMULAÇÃO DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA: ESTUDO DOS EFEITOS DA UMIDADE, RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA E INJEÇÃO DE OXIGÊNIO**, sob orientação do Prof. Dr. RODRIGO SEQUINEL. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em BIOENERGIA - UEL - UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: RODRIGO SEQUINEL (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), FABIANO BISINELLA SCHEUFELE (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ). A presidência iniciou os ritos definidos pelo Colegiado do Programa e, após exarados os pareceres dos membros do comitê examinador e da respectiva contra argumentação, ocorreu a leitura do parecer final da banca examinadora, que decidiu pela APROVAÇÃO. Este resultado deverá ser homologado pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais definidos pelo programa. A outorga de título de mestre está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, RODRIGO SEQUINEL, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos demais membros da Comissão Examinadora.

Palotina, 09 de Setembro de 2021.

Assinatura Eletrônica

10/09/2021 16:16:57.0

RODRIGO SEQUINEL

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

10/09/2021 11:21:56.0

EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

10/09/2021 18:13:15.0

FABIANO BISINELLA SCHEUFELE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR PALOTINA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO BIOENERGIA - UEL -
UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR -
40002012041P8

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em BIOENERGIA - UEL - UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ELIAS GABRIEL MAGALHÃES SILVA** intitulada: **SIMULAÇÃO DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA: ESTUDO DOS EFEITOS DA UMIDADE, RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA E INJEÇÃO DE OXIGÊNIO**, sob orientação do Prof. Dr. RODRIGO SEQUINEL, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 09 de Setembro de 2021.

Assinatura Eletrônica

10/09/2021 16:16:57.0

RODRIGO SEQUINEL

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

10/09/2021 11:21:56.0

EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

10/09/2021 18:13:15.0

FABIANO BISINELLA SCHEUFELE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho ao local onde nasci e cresci, ao Bairro que fui criado, onde as oportunidades não são muitas para muitos interessados. Por um mundo onde a educação seja acessível a todos.

Agradecimentos

Os esforços coletivos me conduziram a conclusão desta etapa individual, logo, muitos são os agradecimentos a todas as pessoas que colaboraram direta ou indiretamente para o êxito desta etapa. Deixarei aqui meus agradecimentos formais:

Aos meus pais Geraldo Elias da Silva e Emília Maria Magalhães Silva e meu irmão Tiago Magalhães Silva, sempre preocupados com o bem comum, me deram todas as ferramentas para que eu pudesse desfrutar e me preocupar apenas com meu processo de formação, do fundo do coração obrigado, amo vocês.

À minha companheira de vida, a pequenina Raphaela Trezza Lima, por correr sempre ao meu lado, incentivando, apoiando, comemorando e sendo um mar de amor e carinho. Obrigado meu amor, a conquista é nossa.

Ao meu orientador e agora amigo Professor Doutor Rodrigo Sequinel, profissional exemplar, educador de corpo e alma, sempre solícito e disposto a colaborar, aceitando inclusive tocar um projeto fora do seu escopo de trabalho. Obrigado mestre.

Ao amigo e grande profissional Guilherme Lenz, sempre disposto a colaborar ajudando de maneira bastante intensa na construção deste trabalho e de tudo que cercou o mesmo. Obrigado.

Ao Professor Doutor Wilson de Aguiar Beninca e o Pesquisador Doutor Juarez Campolina Machado pelo apoio no desenvolvimento deste projeto. Muito obrigado mestres.

Aos membros da banca pelas valiosas colaborações neste trabalho.

Aos amigos que participaram de maneira mais próxima desta etapa, em

especial, Lígia, Sérgio, Marquinho, Michael e Augusto. Muito obrigado pelos bons momentos vividos e sucesso nas carreiras de cada um de vocês.

À toda minha família, tios e tias, primos e primas, amigos e amigas, que se emocionam e se sentem realizados através de nossas conquistas. A oportunidade de estar aqui hoje é fruto de um esforço feito por vocês na tentativa de alcançar melhores condições de vida.

À toda a comunidade Científica pela produção de estudos relevantes que nos mostram como somos pequenos diante da imensidão de conhecimento, pela dedicação de suas vidas à produção e reprodução da ciência mesmo em um país que momentaneamente tem total desprezo por ela.

À CAPES pela concessão da bolsa.

À todas e todos que trabalham diariamente permitindo que a UFPR Setor Palotina seja um local ideal para desenvolvimento das atividades acadêmicas.

“Jamais volte para sua
quebrada de mão e mente vazia”.

Leandro Roque de Oliveira

RESUMO

Diversos estudos buscam melhorar os processos de gaseificação. Neste sentido, processos de simulação e modelagem são extremamente necessários, pois permitem uma variação de parâmetros para respostas otimizadas, além de apresentar um custo relativamente baixo. O presente trabalho objetivou-se em realizar a simulação de um processo de gaseificação de biomassa de Capim Elefante e Eucalipto utilizando o software Comprehensive Fluidized and Mobile Bed Simulator (CeSFaMB ©), a fim de analisar a variação do Poder Calorífico Inferior (PCI) e da concentração de algumas espécies (CO_2 , CH_4 , H_2 e CO) no gás de saída com base na alteração de parâmetros, além de propor uma possível rota de utilização para o gás produzido. O modelo virtual criado neste trabalho, foi validado comparando os resultados obtidos na simulação com um experimento prático. Foi utilizado reator de leito fixo e fluxo concorrente, alimentado com biomassa em discos. A simulação apresentou um gás com PCI de $3,45 \text{ MJ/Nm}^3$, perfil de temperatura da zona de combustão de $999,5^\circ\text{C}$, para uma umidade de 17% da biomassa, ar como agente de gaseificação e razão de equivalência de 0,11. Os valores das simulações se aproximaram aos dados experimentais. A variação da razão de equivalência para valores inferiores a 0,10 proporcionou um gás com maior poder calorífico, porém, quanto maior o PCI menor o fluxo de gás produzido. À medida que a razão de equivalência aumentou, percebeu-se um aumento de CO_2 , que pode ter relação com o aumento da reação de combustão. A substituição do ar por oxigênio como agente de gaseificação, provocou ganhos substanciais no processo com aumento do PCI e aumento das concentrações de H_2 , CH_4 e CO . A umidade da biomassa provocou pequenas mudanças no gás produzido. De modo geral a biomassa de eucalipto apresentou resultados superiores à biomassa de capim elefante. Destaca-se a configuração onde a umidade da biomassa de eucalipto era de 6%, o agente de gaseificação era oxigênio e a razão de equivalência foi de 0,11, o gás de saída apresentou um PCI de 8,08

$MJ kg^{-1}$. A aplicação deste gás em um ciclo com motor adaptado para queima de gás acoplado a um gerador, com um rendimento combinado de 28% possibilita a geração de 3.488,65 *GWh* de energia elétrica com o resíduo da cadeia produtiva de Eucalipto no estado de Minas Gerais. A energia seria gerada em usinas alocadas próximas aos centros de geração de biomassa, ao todo foram alocadas 91 usinas com potência instalada entre 4,5 a 5 *MW*, e injetada na rede de distribuição através da normativa 482 da ANEEL. Com os resultados obtidos, pode-se comprovar que o CeSFaMB © é uma excelente ferramenta de simulação para processos de conversão termoquímicos e que a utilização de resíduos de biomassa para geração de energia pode ser uma solução para pequenos municípios em regiões remotas.

Palavras-Chave: Biomassa, Modelagem, Simulação, Energia, Gaseificação, Geração Descentralizada, Otimização.

ABSTRACT

Several studies seek to improve gasification processes. In this sense, simulation and modeling processes are extremely necessary, as they allow a variation of parameters for optimized responses, in addition to presenting a relatively low cost. The objective of this work was to perform a simulation of a biomass gasification process of Elephant Grass and Eucalyptus using the Comprehensive Fluidized and Mobile Bed Simulator (CeSFaMB ©) software, in order to analyze the variation of the Lower Heating Value (LHV) and the concentration of some species (CO_2 , CH_4 , H_2 e CO) in the output gas by changing parameters, in addition to proposing a possible route of use for the produced gas. The virtual model created in this work was validated comparing the results obtained in the simulation with a practical experiment. A fixed bed and concurrent flow reactor was used, fed with biomass in disks. The simulation presented a gas with LHV of $3,45 \text{ MJ/Nm}^3$, combustion zone temperature profiles of 999.5°C , for a moisture content of 17% of biomass, air as a gasification agent and equivalence ratio of 0.11. The values were very close to the experimental results. The variation in the equivalence ratio provides a gas with greater calorific power for values less than 0.10, but the higher the LHV, the lower the gas flow produced. As the equivalence ratio increased, an increase in CO_2 which may be related to increased combustion reaction. The replacement of air by oxygen as a gasification agent, caused substantial gains in the process with increased LHV and increased concentrations of H_2 , CH_4 and CO . Biomass moisture caused small changes in the gas produced. In general, eucalyptus biomass showed superior results than elephant grass biomass. Noteworthy is the configuration where the eucalyptus biomass had 6% moisture, the gasification agent was oxygen and the equivalence ratio was 0.11, with a LHV for the exit gas of $8,08 \text{ MJ kg}^{-1}$. The application of this gas in a cycle with an adapted engine and a combined efficiency of 28% enables the generation of 3,488.65 GWh of electricity from the residue of the Eucalyptus

production chain in the state of Minas Gerais. The energy would be generated in plants located close to the biomass generation centers, a total of 91 plants with installed capacity between 4.5 and 5 MW were allocated, and injected into the distribution network through ANEEL regulation 482. With the results obtained, it can be proved that CeSFaMB © is an excellent simulation tool for thermochemical conversion processes and that the use of biomass residues for energy generation can be a solution for small municipalities in remote regions.

Keywords: Biomass, Modeling, Simulation, Energy, Gasification, Decentralized Generation, Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente Fonte: CORTEZ (2008)	29
Figura 2 – Especificação das zonas dentro do reator.....	43
Figura 3 – Rotina simplificada do modelo base para o software CeSFaMB©.....	44
Figura 4 – Variação do PCI para diferentes valores de razão de equivalência da biomassa de eucalipto com 17% de umidade.....	54
Figura 5 – Variação das concentrações de CO , CO_2 , H_2 e CH_4 para diferentes valores da razão de equivalência com biomassa de eucalipto a 17% de umidade e injeção de ar	55
Figura 6 – Variação do PCI do gás à frio para ER variando de 0 a 0,3, umidade da biomassa de eucalipto variando em 10%, 8%, 6% e 4% e injeção de ar.	57
Figura 7 – Variação das concentrações de CO , CO_2 , H_2 e CH_4 em base molar para ER variando de 0 a 0,3 e umidade da biomassa de eucalipto de 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de ar.....	59
Figura 8 – Variação do PCI do gás à frio para ER variando de 0 a 0,11, umidade da biomassa de eucalipto variando em 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de oxigênio.....	61
Figura 9 – Variação das concentrações de CO , CO_2 , H_2 e CH_4 em base molar para ER variando de 0 a 0,11, umidade da biomassa de eucalipto de 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de oxigênio.	63
Figura 10 – Variação do PCI do gás à frio para ER variando de 0 a 0,10, umidade da biomassa de capim elefante variando em 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de ar.....	65
Figura 11 – Variação das concentrações de CO , CO_2 , H_2 e CH_4 em base molar para ER variando de 0 a 0,11, umidade da biomassa de capim elefante de 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de ar	67
Figura 12 – Variação do PCI do gás à frio para ER variando de 0 a 0,10, umidade da biomassa de capim elefante variando em 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de oxigênio.....	70
Figura 13 – Variação das concentrações de CO , CO_2 , H_2 e CH_4 em base molar para ER variando de 0 a 0,11, umidade da biomassa de capim elefante de 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de oxigênio	71
Figura 14 – Usinas de geração de energia elétrica movidas a gaseificação de biomassa.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos principais tipos e fontes de biomassa.....	23
Tabela 2 – Evolução de área plantada de madeira no Brasil (ha).....	24
Tabela 3 – Principais reações durante o processo de gaseificação.....	27
Tabela 4 - Parâmetros de Entrada Utilizados para Simulação.....	46
Tabela 5 – Características das biomassas utilizadas no processo de gaseificação	48
Tabela 6 – Principais parâmetros de resposta do processo simulado e do experimento para as mesmas variáveis de entrada	51
Tabela 7 – Melhores resultados para gaseificação de biomassa lignocelulósica	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Estrutura do trabalho.....	19
1.2	Objetivos.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Referencial teórico.....	21
2.1.1	Biomassa.....	21
2.1.2	Processos de gaseificação.....	25
2.1.2.1	Gaseificadores concorrentes.....	28
2.1.3	Utilização do gás de síntese.....	30
2.2	Estado da arte.....	31
2.2.1	Biomassa lignocelulósica em processos de gaseificação	32
2.2.2	Ajuste de variáveis no processo de gaseificação de biomassa lignocelulósica ..	35
2.2.3	Simulação e validação de processos de gaseificação	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Características básicas do CeSFaMB©	42
3.2	Parâmetros do processo de simulação da gaseificação.....	45
3.3	Estimativa do potencial energético via gaseificação de resíduos da cadeia produtiva de eucalipto.....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1	Simulação e validação do modelo virtual utilizando a biomassa de eucalipto	51
4.2	Variação de parâmetros no modelo para biomassa de eucalipto	53
4.2.1	Respostas do modelo utilizando ar como agente gaseificador	53
4.2.2	Respostas do modelo utilizando oxigênio como agente gaseificador	60
4.3	Variação de parâmetros no modelo para biomassa de capim elefante.....	64
4.3.1	Respostas do modelo utilizando ar como agente gaseificador	64

4.3.2	Respostas do modelo utilizando oxigênio como agente gaseificador	68
4.4	Potencial energético teórico e alocação das usinas de geração.....	72
5	CONCLUSÃO.....	75
5.1	Contribuições do trabalho	76
	REFERÊNCIAS	77
	ANEXO A – DETALHES E CONFIGURAÇÕES DO EXPERIMENTO.....	84
	ANEXO B – PRINCIPAIS REAÇÕES CONSIDERADAS PELO MODELO	87
	ANEXO C – DETALHES DO ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE USINAS	97

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros registros de processos de gaseificação são do final do século XVIII e tratam da adaptação de motores de combustão interna para o uso do gás de síntese (Syngás¹) como combustível. No século XIX, o combustível gerado por meio da destilação a seco do carvão era utilizado para iluminação pública. O mundo vivia uma mudança no cenário energético e a gaseificação surgiu como uma possibilidade para suprir essa necessidade. O gás produzido pelo processo foi usado para iluminar algumas cidades do mundo, como Londres e Rio de Janeiro. Após a descoberta, e distribuição em larga escala, de gás natural e petróleo, a gaseificação perdeu força, voltando ao cenário mundial durante a Segunda Guerra Mundial, com a crise de distribuição do petróleo. Ao longo da Segunda Guerra Mundial, o processo foi amplamente aplicado a automóveis e embarcações (BRIDGWATER, 1995; CARDOSO, 2014; REED, 1985; SWAAIJ, 1981).

Muitas rotas de transformação de biomassa em energia têm sido aplicadas nos últimos anos, incluindo a gaseificação. A reação ocorre em diferentes etapas, como: secagem, pirólise, combustão e oxidação parcial. As temperaturas variam de 400 a 1200°C, ocorrendo com fornecimento de ar em valores menores do que as condições estequiométricas para combustão completa, o que leva a biomassa a oxidação parcial. Como resultado deste processo se tem gás com características especiais. O processo pode ocorrer na presença de agente gaseificador, como oxigênio puro, vapor d'água, ar atmosférico, entre outros. A presença de agente no processo de gaseificação está diretamente relacionada ao uso do gás, e garante ao produto

¹ Syngas ou Gás de síntese, é formado por uma mistura de gases que apresentam características de um combustível. Produzido a partir de processos de gaseificação, ou seja, da combustão incompleta de combustíveis sólidos. Utiliza-se, por exemplo, madeira, carvão ou outros combustíveis, geralmente ricos em carbono, usando oxigênio insuficiente para a queima completa e (em alguns casos) vapor de água ou outros agentes gaseificadores, (SÁNCHEZ, 2010)

gasoso maior ou menor poder calorífico². O processo ocorre em reatores chamados gaseificadores, que possuem características particulares e podem ser alimentados por diferentes tipos e tamanhos de partículas de biomassa (BRIDGWATER, 1995; KHAN, 2015). O gás (Syngás) resultante da reação de gaseificação pode ter baixo poder calorífico, em torno de 5MJ/Nm³, ou alto poder calorífico, em torno de 15MJ/Nm³, e é basicamente composto por N₂, CO e CO₂ em maiores proporções, CH₄ e H₂ em pequenas concentrações e traços de outros gases (H₂S, NH₃, SO₂, entre outros) (DÍAZ GONZÁLEZ; PACHECO SANDOVAL, 2020; PATRA; SHETH, 2015).

A gaseificação se apresenta como possibilidade para conversão de biomassa seca, onde o material é convertido em gás combustível e depois em eletricidade por meio de grupo gerador – possibilidade para áreas rurais remotas com falta de eletricidade, mas com abundância de arbustos, palha, casca de arroz e amendoim ou outras formas de biomassa. A gaseificação pode ser utilizada para gerar energia mecânica, eletricidade, calor e através de processos de síntese química produzir combustíveis líquidos. O Brasil tem alto potencial para utilização desta tecnologia, dada a extensa área plantada, com diversas espécies de biomassa (DE OLIVEIRA et al., 2013, 2018; DIMPL, 2011; FERREIRA et al., 2018; IBGE, 2019; LIMA et al., 2020; REZENDE, 2012; SHAHABUDDIN et al., 2020; ZENG-HUI; HONG-BO, 2010).

Transformação da biomassa em vetor energético através da gaseificação é relatada de maneira ampla pela literatura, mostrando como esta possibilidade é real e lucrativa. Luz (2013), através de uma análise minuciosa demonstrou a possibilidade de tratamento de resíduos através de estações de gaseificação. Shahabuddin (2020) mostrou a possibilidade de transformação de energia (combustíveis líquidos) para o setor aéreo por meio da gaseificação. Pode-se dizer que atualmente a gaseificação com maior potencial escalável é aplicada no tratamento de resíduos

² Valor que refere-se a capacidade que o combustível tem de liberar calor (energia) por unidade de massa ou volume à condições normais de temperatura e pressão. Pode-se dividir em PCI e PCS, ou seja, o Poder Calorífico Inferior refere-se a parcela do combustível sem a presença de água e o Poder Calorífico Superior refere-se a parcela do combustível com a presença de água, (ÇENGEL; BOLES, 2013).

industriais e urbanos, e o gás gerado é aplicado em ciclos combinados movidos a gás para transformação em energia elétrica (IGCC) (DÍAZ GONZÁLEZ; PACHECO SANDOVAL, 2020; JANAIREH et al., 2020; LUZ, 2013; PEREIRA et al., 2012; SANSANIWAL et al., 2017; SHAHABUDDIN et al., 2020).

Os processos de gaseificação são complexos e os reatores para procedimentos práticos não são facilmente construídos, por isso, simular esses processos torna-se essencial, pois permite prever respostas e ajustar os parâmetros para proporcionar maior eficiência. Além disso, pesquisadores e fabricantes de equipamentos têm usado extensivamente mais pesquisas fundamentais destinadas a compreender modelos matemáticos e simulações. Assim, apenas a combinação de experimentos e modelagem do processo podem fornecer compreensão dos fenômenos físicos e químicos dentro do gaseificador (JANAIREH et al., 2020; SAFARIAN; UNNÞÓRSSON; RICHTER, 2019).

A gaseificação pode utilizar extensa variedade de combustíveis, sendo que no presente trabalho foram utilizadas as biomassas de Capim Elefante e Eucalipto. A biomassa de Capim Elefante desperta grande interesse por suas características facilitadas de cultivo e manejo e por sua produção de matéria seca por hectare superior a biomassas tradicionais utilizadas no Brasil, como a Cana-de-Açúcar e o Eucalipto (MARAFON et al., 2014, 2016). O eucalipto é uma biomassa extremamente abundante no Brasil que, segundo o IBGE, no ano de 2019 foram extraídos mais de 104 milhões de m³ para processamento. Além da abundância de biomassa seu processamento é de baixo rendimento, gerando uma quantidade considerável de resíduos que ainda possuem valor energético e financeiro (IBGE, 2016). Estudos na literatura debatem sobre aspectos de otimização, modelagem, produção de energia para regiões remotas e produção de carvão através do Capim Elefante e do Eucalipto.

A demanda por energia elétrica cresce, com as atenções voltadas ao crescimento de forma mais sustentável, ou seja, com modelos de transformação que impactem menos o meio

ambiente e diversifiquem a matriz elétrica (ABDOLI; PAMULAPATI; KARA, 2020). O gás resultante do processo de gaseificação, pode auxiliar nesse processo de diversificação elétrica sendo aplicado em motores de combustão interna alternativos adaptados, ou sofrer processos de melhoria e ser aplicado em turbinas a gás e ciclos combinados (BRYNDA et al., 2020; MARTÍNEZ et al., 2011; NIU et al., 2021; ZAINAL et al., 2002).

As possibilidades de uso de um combustível gasoso colocam a gaseificação como uma rota interessante para a conversão de biomassa em energia. O presente trabalho objetivou-se a encontrar, através de processos simulados, qual a melhor configuração de gaseificação entre o Capim Elefante e Eucalipto para diferentes configurações de agente gaseificador, razão de equivalência e umidade de biomassa. Ao final, foi proposta uma rota possível de utilização para o gás de síntese gerado na geração de energia elétrica.

1.1 Estrutura do trabalho

A Seção 2 apresenta uma revisão bibliográfica e o estado da arte para processos de gaseificação em reatores de leito fixo e fluxo concorrente alimentados com biomassa de Eucalipto e Capim Elefante. A seção 3 apresenta os métodos utilizados neste trabalho, assim como maiores detalhes sobre o software utilizado para realização da simulação e alocação das usinas de geração de energia elétrica. A seção 4 apresenta os resultados encontrados, assim como discute-se os mesmos. A seção 5 apresenta a conclusão deste trabalho e as possíveis colaborações.

1.2 Objetivos

O objetivo geral foi a comparação das concentrações dos gases CH_4 , H_2 , CO , CO_2 presentes no gás de síntese e do PCI, para os processos alimentados com biomassa de capim elefante e eucalipto. O software CeSFaMB © foi utilizado para criação do modelo virtual. Após as simulações foi proposta uma rota de utilização do gás gerado no processo.

Os objetivos específicos são:

- Comparar os valores observados na simulação com os resultados experimentais obtidos por Resende (2016) para o gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente alimentado com o eucalipto;
- Realizar simulação com os dois combustíveis (eucalipto e capim elefante) variando alguns parâmetros, como: razão de equivalência, agente gaseificador e umidade do combustível;
- Comparar os valores observados e selecionar uma condição ideal (com maior volume de gás produzido e maior PCI) para utilização do gás em processos de geração de energia elétrica.
- Alocar de maneira otimizada pequenas centrais de geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Referencial teórico

2.1.1 Biomassa

Classifica-se como biomassa vegetal todo e qualquer material de origem orgânica, que é resultante direta ou indiretamente de processos fotossintéticos. Pode-se dizer que a biomassa vegetal é uma forma indireta de energia solar, ou seja, energia solar é convertida em energia química, através da fotossíntese (CORTEZ, 2008).

A biomassa para fins energéticos teve grande destaque entre o final do século XIX e o início do século XX. Com o uso da energia do carvão, do petróleo e o gás natural, a biomassa ficou reduzida a usos domiciliares e em regiões agrícolas. Porém nota-se atualmente uma mudança de postura no mercado energético. As nações vêm concentrando esforços, recursos humanos e financeiros, em pesquisas e no desenvolvimento de fontes alternativas de energia, principalmente movidas a biomassa. Destaca-se sua capacidade de redução na emissão de gases do efeito estufa (balanço favorável de carbono), possibilidade de diversificação na matriz energética e contribuição para uma independência de países exportadores de petróleo, por exemplo (HOFFERT et al., 2008; JUNGINGER et al., 2008).

O Brasil apresenta grande capacidade renovável em seus recursos energéticos, devido a extensão de suas bacias hidrográficas, com aproveitamento via centrais hidroelétricas, assim como características edafoclimáticas que proporcionam o cultivo de diversas espécies de biomassa para fins energéticos, seja de forma direta ou indireta. O perfil produtivo agroindustrial brasileiro também se destaca, seja na produção de culturas energéticas ou no reaproveitamento dos resíduos do processamento dessas culturas. Segundo o Balanço

Energético Nacional de 2019, produzido pela Empresa de Pesquisa Energética, o Brasil possui 43,5% de sua oferta interna de energia oriunda de fontes renováveis, destaca-se o setor sucroalcooleiro com a queima do bagaço de cana e o setor dendroenergético com a produção de papel e celulose, o uso da lenha e seus derivados. Tratando-se apenas de energia elétrica, o Brasil possui 85,9% da oferta interna oriunda de fontes renováveis, enquanto que o mundo possui apenas 24% (EPE, 2019a).

A biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, de vegetais lenhosos, resíduos agrícolas, urbanos e industriais. Pode ser obtida também através dos biofluidos, como os óleos vegetais (canola, pinhão manso) (CORTEZ, 2008; PANDEY; PRAJAPATI; SHETH, 2019; PANG, 2019; REIS; REIS, 2017). A Tabela 1 apresenta quais são as fontes de biomassa e suas divisões.

O Brasil é um grande produtor agrícola, e ao longo do tempo percebe-se um crescimento importante em área plantada e produção agrícola. Dentre os vegetais não-lenhosos, destaca-se a cana-de-açúcar. O setor sucroalcooleiro é responsável por 17,6% da oferta interna de energia, (EPE, 2019b). A tecnologia do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar se desenvolveu exponencialmente, em função do seu elevado poder calorífico inferior ($1850 \text{ kcal kg}^{-1}$ à umidade de 50%) e sua elevada disponibilidade (SAIDUR et al., 2011; SHAFIE et al., 2012).

Tabela 1 – Classificação dos principais tipos e fontes de biomassa

Biomassa	Vegetais não-lenhosos	Sacaríneos	Cana-de-açúcar
		Celulósicos	Capim elefante
		Amiláceos	Milho
		Aquáticos	Micro algas
	Vegetais Lenhosos	Madeiras	Eucalipto
	Resíduos orgânicos	Agrícolas	Casca de arroz
		Urbanos	Lixo
		Industriais	Bagaço de malte
	Biofluidos	Óleos vegetais	Óleo de soja

Fonte: CORTEZ, (2008)

Segundo dados do levantamento sistemático da produção agrícola, feito pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, o Brasil produziu cerca de 885 Mton das principais culturas com potencial energético em seus resíduos: o arroz, a cana-de-açúcar, o milho e a soja, (IBGE, 2017). Os dados deixam evidente o grande potencial energético oriundo dos resíduos agrícolas brasileiros. Estima-se que em 2016 foram produzidos 49.236 GWh de energia elétrica por centrais termelétricas movidas a biomassa. Isto representa 8,5% do total de transformação de energia elétrica no Brasil em 2016. A maior parte são centrais co-geradoras a bagaço de cana, alguns empreendimentos são movidos a resíduos de madeira e casca de arroz, (EPE, 2017).

Destaca-se nesse âmbito a biomassa de origem florestal, que é todo e qualquer produto ou subproduto dos recursos florestais. Eles podem ser resíduos deixados para trás na coleta da madeira, como galhos finos e folhas, tanto em florestas e bosques naturais como em reflorestamento, ou podem ser resíduos do processamento da madeira, estes em forma de cavaco, serragem, casca e aparas. Vale destacar que o processamento da madeira é de um rendimento baixo, gerando assim uma quantidade considerável de resíduos, que não são utilizados de forma adequada. O Brasil apresenta uma grande extensão de área plantada de

árvores para o processamento. A Tabela 2 apresenta a evolução das áreas plantadas. O Brasil possui 5.570 municípios, destes, 4.867 municípios registraram produção florestal, ou seja, 87% dos municípios apresentam alguma atividade relacionada à madeira (IBGE, 2019).

Tabela 2 – Evolução de área plantada de madeira no Brasil (ha)

Espécie Florestal	2014	2015	2016
Eucalipto	6.952.509	7.444.625	7.543.707
Pinus	2.049.234	2.065.560	2.079.162
Outras espécies	364.998	427.762	400.207
Total	9.366.741	9.937.947	10.023.076

Fonte: (SNF, 2017)

Outra biomassa lignocelulósica, o capim elefante, uma espécie com elevado percentual de fibras e lignina, possui características importantes para o uso como matéria-prima na produção de combustíveis. Elevados teores de celulose (28,2%) e lignina (11,9%), associados ao alto potencial produtivo fazem com que essa matéria prima se assemelhe ao bagaço de cana-de-açúcar e o coloquem em patamar de possibilidades para fins energéticos, podendo ser usado em formato de biocombustíveis sólidos (*pellets* e briquetes), energia térmica através de queima em fornalha para a transformação de vapor e etanol de segunda geração obtido através da celulose (ROCHA et al., 2017).

O capim elefante (*Pennisetum purpureum*), espécie de gramínea perene com origem africana, apresenta resistência a doenças, fácil adaptação, facilidade na propagação e no manejo, curtos ciclos de produção, alta eficiência fotossintética, múltiplas colheitas anuais, melhoramento no uso da água e do solo, resistência a frio, à seca, alto poder calorífico e possuem elevado percentual de fibras e lignina. O volume de produção além de proporcionar cortes a cada seis meses, permite extração entre 150 e 200 toneladas de massa fresca por hectare cultivado, o que rende de 40 a 50 toneladas de matéria seca. Fazendo comparativo com a mesma área plantada, consegue-se de 15 a 20 toneladas de matéria seca, se tratando de cana-de-açúcar e cerca de 15 toneladas de massa seca se tratando de Eucalipto, o que mostra eficiência

interessante do capim elefante (MARAFON et al., 2014). O cultivo do capim elefante não interfere na produção de alimentos e pode se desenvolver em solos com condições adversas (ROCHA et al., 2017).

Tradicionalmente usava-se biomassa de forma direta, através da combustão em geradores de vapor (caldeiras), fornos, entre outros, o que apresenta baixa eficiência. Além disso, apesar de apresentar diversas características positivas para aplicações energéticas, a biomassa in natura apresenta elevados índices de umidade. Os indicadores variam entre 60 e 80% no ato da colheita quando a matéria está fresca. Os teores de água presentes na planta podem variar com a idade, tempo da rebrota e época da colheita (período chuvoso ou não). Processos que tenham o capim elefante como combustível, por exemplo, precisam propor pré-tratamentos para a secagem da planta. É importante também que o capim elefante possua baixas concentrações de sais minerais, pois caso a aplicação da biomassa seja para combustão direta, a alta concentração destes sais pode ocasionar danos nos fornos, devido a formação de cinzas (DAHER et al., 2014; FLORES, 2009; SILVA OLIVEIRA et al., 2015). (SILVA OLIVEIRA et al., 2015). Objetivando uma melhora no uso da biomassa para fins energéticos tem-se desenvolvido e aperfeiçoado processos de conversão energética, como a pirólise e a gaseificação.

2.1.2 Processos de gaseificação

A gaseificação é um processo de conversão termoquímica, produzido a partir de um combustível sólido e que resulta em um gás com características de um combustível. Ao processo de gaseificação são fornecidas quantidades restringidas de ar, o que resulta na oxidação do material carbonoso sólido. A conversão termoquímica acontece a temperaturas acima dos processos de pirólise e abaixo dos processos de combustão. Durante o processo é

necessário a inserção de um agente de gaseificação, que pode ser ar atmosférico, oxigênio puro, entre outros. A escolha do agente de gaseificação está diretamente relacionada com o uso do gás gerado, podendo resultar em um gás com baixo poder calorífico (5 MJ/Nm³) ou com alto poder calorífico (15 MJ/Nm³) (CORTEZ, 2008; DE SOUZA-SANTOS, 2010; SÁNCHEZ, 2010).

O gás produzido a partir da gaseificação da biomassa pode ser usado de algumas formas, dentre elas a queima direta em motores a combustão interna para a transformação de eletricidade em pequenas potências e localidades isoladas (MURARO, 2006). Pode ser aplicado em ciclos combinados de turbina a gás (BENINCA, 2016). Pode-se aplicar o gás de síntese para aquecimento de aviários na produção de proteína animal (ZANATTA, 2011). Além disso o gás de síntese pode ser aplicado em processos de síntese química catalítica (fischer-tropsch) para a produção de combustíveis líquidos (SÁNCHEZ, 2010).

A gaseificação apresenta algumas vantagens em relação à queima direta da biomassa, como por exemplo, para a transformação de eletricidade em pequenas potências não existe a necessidade de um ciclo a vapor, basta apenas realizar-se a queima do gás em um motor de combustão interna adaptado, com potencial para reduzir a dependência de países e regiões à importação de energia (SÁNCHEZ, 2010).

O processo apresenta alguns desafios tecnológicos que precisam ser resolvidos como: alta complexidade, a dificuldade de controle; alto consumo de energia em alguns casos, o que diminui a eficiência global; e a necessidade da adição de vapor de água ou oxigênio puro para obtenção de gás com alto poder calorífico. A conexão direta do gás, em motores de combustão interna, pode reduzir a vida útil do motor devido a presença de componentes tóxicos e particulados, o que exige um pré-tratamento do gás (CORTEZ, 2008; SÁNCHEZ, 2010).

Os reatores que promovem a reação, chamados de gaseificadores, possuem características particulares, e podem ser classificados de acordo com alguns fatores, como:

poder calorífico do gás gerado (baixo, médio e alto poder calorífico); tipo de agente gaseificador (ar atmosférico, vapor de água, oxigênio e hidrogênio); movimento da biomassa e do agente de gaseificação (concorrente, contracorrente, fluxo cruzado, leito fluidizado, leito arrastado); pressão de trabalho (atmosférico, pressurizados até 6 MPa) e tipos e granulometrias de biomassa (resíduos agrícolas, resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos, biomassa in natura, pelletizada e pulverizada) (CORTEZ, 2008).

As reações que ocorrem dentro dos reatores, são em sua maioria, afetadas pela variação de temperatura e pelo agente gaseificador. Reações do tipo sólido-sólido, gás-líquido e gás-gás, acontecem dentro dos gaseificadores, são complexas e interferem na produção de carvão, alcatrão e gás de síntese. A Tabela 2 apresenta as principais reações químicas junto com seus valores de entalpia que podem ocorrer em um sistema de gaseificação (NIU et al., 2016).

Tabela 3 – Principais reações durante o processo de gaseificação

Reação	Descrição
Secagem da biomassa $\rightarrow C + \text{Alcatrão} + \text{Gás}$	1-Pirólise e liberação de voláteis
Alcatrão $\rightarrow CH_4 + H_2 + H_2O + C_xH_y$	2-Craqueamento do alcatrão
$C_xH_y + 2xH_2O \rightarrow xCO_2 + (2x + y)/2H_2$	3-Reforma a vapor de hidrocarbonetos
$C_xH_y + xH_2O \rightarrow xCO + (x + y/2)/H_2$	4- Reforma a vapor de hidrocarbonetos
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \rightarrow 206,3 \text{ kJ mol}^{-1}$	5- Reforma a vapor de hidrocarbonetos
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 \rightarrow 131,29 \text{ kJ mol}^{-1}$	6-Oxidação de Carbono
$C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2 \rightarrow 90,2 \text{ kJ mol}^{-1}$	7 - Oxidação de Carbono
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \rightarrow 41,17 \text{ kJ mol}^{-1}$	8 - Deslocamento de monóxido de carbono e vapor
$C + CO_2 \rightarrow CO \rightarrow 172,46 \text{ kJ mol}^{-1}$	9 - Redução de Dióxido de Carbono
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4 \rightarrow 74,52 \text{ kJ mol}^{-1}$	10 - Metanação
$CH_4 + CO_2 \rightarrow 2CO + H_2 \rightarrow 274 \text{ kJ mol}^{-1}$	11 - Reforma de Metano

Referência:(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008; DE SOUZA-SANTOS, 2010; NIU et al., 2021, 2016; REED, 1985; SÁNCHEZ, 2010; YUCEL; HASTAOGLU, 2016)

A eficiência dos processos de gaseificação pode ser definida pela entalpia de combustão do gás de saída e pode ser dividida em duas bases: base quente e base fria. A eficiência à quente é a soma da entalpia de combustão do gás de saída mais o valor sensível na temperatura do fluxo de saída. A composição do gás leva em consideração todos os componentes, incluindo água e alcatrão. A eficiência em base fria leva em consideração apenas a entalpia de combustão do gás existente em base seca e livre de alcatrão em temperatura e pressão ambientes. Outro ponto bastante observado em processos de gaseificação é a taxa de conversão de carbono, que apresenta quanto do carbono presente na matéria orgânica foi consumido no processo reacional (DE SOUZA-SANTOS, 2010).

Processos de gaseificação podem ocorrer com diferentes agentes da gaseificação, que podem ser o ar, oxigênio, mistura de gases, vapor, entre outros. Para que o processo ocorra é necessário que o ar seja fornecido em proporções inferiores às estequiométricas para a combustão completa. A razão de equivalência (ER) precisa apresentar valores inferiores a 1, representando assim que o processo ocorre em condições inferiores às estequiométricas. A literatura relata valores inferiores a 0,4 para gaseificação de biomassa (DE SOUZA-SANTOS, 2010; JANAJREH et al., 2020).

2.1.2.1 Gaseificadores concorrentes

Os gaseificadores concorrentes, ou gaseificadores de leito fixo e fluxo de ar concorrente foram os gaseificadores mais difundidos em todo mundo durante a Segunda Guerra Mundial. Estima-se que cerca de 1 milhão de veículos em todo o mundo utilizavam esse tipo de reator para a produção de potência mecânica. No Brasil cerca de 20.000 veículos possuíam esses equipamentos. O reator era alimentado com pedaços de madeira, coque, turfa e antracito. A

aplicação do gás gerado produzia uma operação dos motores de forma confiável, porém, com uma perda de potência de 25% em relação a operação com gasolina, e uma maior necessidade de manutenção nos filtros, sistemas de refrigeração, entre outros. Os gaseificadores de leito fixo e fluxo concorrente também foram aplicados em tratores, navios e barcos (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008; REED, 1985; SÁNCHEZ, 2010).

A Figura 1 apresenta as zonas durante o processo de conversão termoquímica. Este tipo de reator apresenta a zona de oxidação acima da zona de redução, o que é oposto aos gaseificadores que utilizam o fluxo de ar contracorrente, ou seja, o fluxo de ar no sentido contrário ao sentido de alimentação da biomassa (combustível). Nos gaseificadores concorrentes, a alimentação da biomassa ocorre pelo topo do reator e a alimentação de ar ocorre no mesmo sentido do combustível, em um fluxo descendente passando pela zona de combustão e redução (CORTEZ, 2008; SÁNCHEZ, 2010).

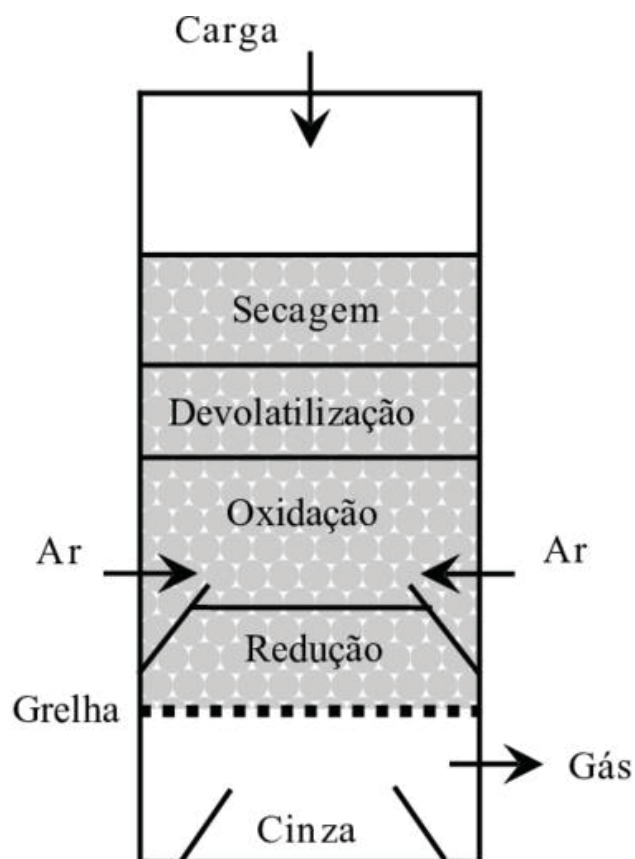


Figura 1 – Gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente
Fonte: CORTEZ (2008)

Durante o processo de gaseificação existe a formação de material particulado e alcatrão. Os gaseificadores concorrentes apresentam como característica principal o direcionamento desses compostos para zona de combustão, onde, em condições de controle da operação, os materiais que são produzidos na zona de pirólise poderão ser craqueados, no caso do alcatrão, e convertidos em gás, no caso dos particulados. Neste cenário, o alcatrão é convertido em um composto com menor peso molecular e em coque, e o gás de síntese da saída apresenta baixa indicação desse composto, da ordem de 0,1 a 1,2 g/Nm³. Essa característica confere a este tipo de gaseificador uma faixa de temperatura mais elevada, pois, no caso da operação em temperaturas mais baixas os compostos poderiam passar pela zona de combustão sem sofrerem o craqueamento, resultando num processo ineficiente (DE SOUZA-SANTOS, 2010).

Na maioria das aplicações, a zona onde ocorre a combustão tem seu diâmetro reduzido, criando uma espécie de garganta, que pode ou não ser constituída de um material diferente do reator. As entradas do agente oxidante ficam nesta parte, na tentativa de promover uma injeção de ar de maneira uniforme. O objetivo é que a temperatura em toda região também atinja valores que consigam craquear o alcatrão (DE SOUZA-SANTOS, 2010).

A gaseificação em fluxo concorrente apresenta alguns pontos críticos, o gás é liberado diretamente da zona de redução, este tende a ter quantidades significativas de cinzas e fuligem, na faixa de 0,1 a 1 g/Nm³. A temperatura de saída do gás também é bem elevada, por volta de 700°C, devido ao fato de não trocar calor diretamente com as zonas de pirólise e secagem. Este tipo de reator também apresenta certa sensibilidade a matéria prima que apresente variação no teor de humidade e elevado teor de cinzas (CORTEZ, 2008; DE SOUZA-SANTOS, 2010; SÁNCHEZ, 2010).

2.1.3 Utilização do gás de síntese

Processos de gaseificação podem ser aplicados para transformação de biomassa em energia elétrica proporcionando destinação valorosa para alguns resíduos. Mesmo com suas limitações, a rota pode ser uma das diversas possibilidades existentes a contribuir para diversificação da matriz elétrica brasileira e mundial. Processos com maior escalabilidade tem sido aplicados para alimentar ciclos combinados de potência e no tratamento de resíduos sólidos urbanos (ENGELBRECHT et al., 2011; LUZ, 2013; SOUZA-SANTOS; CERIBELI, 2013).

Ao longo dos anos, estudos foram e vem sendo feitos no desenvolvimento de gaseificadores de leito fixo e na utilização do produto desses processos para a transformação em energia elétrica. O programa Francês de biomassa, energia e meio ambiente previa a instalação de unidades com até 80kW em ciclos de motor a combustão. Segundo BECKER (1988), os reatores apresentaram gás com PCI entre 4,39 e 4,65 MJ/Nm³ com baixo teor de alcatrão, entre 0,06 e 0,05 g/Nm³ (gás seco).

Além da diversificação dos processos de transformação de energia elétrica, a utilização da gaseificação pode permitir uma redução nas emissões de gases de efeito estufa, porém, os processos necessários para purificação do gás de síntese exigem um elevado volume de água, fator este que se coloca como um dos principais entraves da sustentabilidade e renovabilidade de centrais de transformação a base de gaseificação. Estes e diversos outros fatores (econômicos, sociais, técnicos) precisam ser levados em consideração em estudos mais detalhados para a construção de centrais de gaseificação (INDRAWAN et al., 2020; KHOSHGOFTAR MANESH; REZAZADEH; KABIRI, 2020; YANG et al., 2018).

2.2 Estado da arte

2.2.1 Biomassa lignocelulósica em processos de gaseificação

A biomassa *in natura* pode possuir baixa densidade energética e mássica, apresentar dificuldades no transporte, manipulação e armazenamento e possuir grande volume. Por esses e outros aspectos, afirma-se que a biomassa em seu estado natural pode não ser um vetor energético de grande eficiência, apesar de ser amplamente utilizada em ciclos tradicionais, como na transformação de calor e vapor. Processos que convertam a biomassa em um vetor energético com melhores características são necessários para promover melhor aproveitamento das capacidades energéticas da biomassa (BRIDGWATER, 1995). Das rotas utilizadas para conversão de biomassa em energia, a gaseificação é das mais antigas, sendo utilizada para diferentes fins a mais de um século (SÁNCHEZ, 2010).

O Brasil, com suas características agrícolas, produz culturas energéticas (cana-de-açúcar, eucalipto), e culturas alimentares (milho, soja, arroz). O manejo e processamento de ambas as culturas produz alto volume de resíduos como casca, bagaço e palha. Estes resíduos podem ser transformados em vetores energéticos através de processos como a gaseificação. Pensando no reaproveitamento destes resíduos, DE OLIVEIRA *et al.* (2018) propôs o processo de gaseificação para os resíduos de madeira e das lavouras de café. O reator utilizado foi do tipo de fluxo descendente, o mesmo utilizado neste estudo, tendo o ar como agente de gaseificação. O gás resultante do processo apresentou um PCI de $7,76 \pm 1,27$ MJ/Nm³, utilizando como combustível a casca de café, sendo sua concentração rica em metano, dióxido de carbono e monóxido de carbono. Quando utilizou-se madeira de eucalipto como combustível, chegou-se ao PCI de $6,81 \pm 0,34$ MJ/Nm³, com predomínio de monóxido de carbono (DE OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Pode-se também alterar as propriedades do combustível, ou seja, promover pré-tratamentos da biomassa antes de levá-la ao gaseificador. O adensamento de biomassa é uma

dessas formas, que tem sido muito utilizadas para diferentes tipos de conversão. O estudo feito por KALLIS (2013) propõe a gaseificação de pellets de madeira, que são feitos a partir de resíduos de madeira e resíduos secos da produção de etanol. Os pellets foram gaseificados em reator de leito fixo e fluxo descendente para a produção de energia elétrica com potência da planta de 50 kW. O gás produzido possui um PCI de 3,7 MJ/Nm³ com eficiência a frio do reator de 30% (KALLIS; SUSINI; OAKEY, 2013).

WEI (2011) realizou a mistura de biomassa e glicerol bruto. O glicerol é o resíduo produzido em larga escala em processos de produção de biodiesel. O estudo utilizou cavacos de madeira e apontou que para altos índices de glicerol bruto adicionado no processo, as concentrações de CO, CH₄ e alcatrão do gás de síntese também aumentaram, mas a concentração de material particulado diminuiu. O estudo indica que para gaseificadores de fluxo descendente e leito fixo é interessante que se use glicerol bruto em uma proporção máxima de 20% em peso, desta forma se obteve um gás com PCI de 5,95 MJ/Nm³ (WEI et al., 2011).

A literatura apresenta trabalhos realizados utilizando capim elefante como combustível em processos de gaseificação. ADENIYI (2019) relatou a construção de um reator de leito fixo e fluxo descendente para a produção de gás de síntese e biocarvão, o rendimento foi de 14,29% em peso de biocarvão. Como destacado anteriormente, o excesso de sais minerais presentes na biomassa pode danificar o equipamento de uso do gás para aplicação em motores de combustão interna (ADENIYI; IGHALO; ONIFADE, 2019).

FERREIRA *et al.* (2017) realizou um pré-tratamento para a biomassa de capim elefante transformando-a em um biocarvão. O estudo realizou a gaseificação do biocarvão e monitorou algumas características, entre elas o tempo de reação. Como agente de gaseificação foi utilizado vapor, e as temperaturas variaram nos seguintes valores: 800, 850, 900 e 950°C. Concluiu-se ainda que a medida que a temperatura aumentava houve um incremento na presença de H₂ no gás de síntese e no rendimento da produção de gás (FERREIRA et al., 2017).

Alguns trabalhos abordam a alteração de características da biomassa para que ela tenha melhores rendimentos em processos de transformação termoquímicos. Pode-se aplicar processos de adensamento, secagem, carbonização e também melhoramentos tanto genéticos nas plantas quanto em seus processos produtivos. O trabalho de SILVA OLIVEIRA *et al.* (2015) abordou diferentes níveis de nitrogênio para fertilização do solo com o objetivo de se obter maior volume de matéria seca por unidade de área, chegando a uma produtividade de 61 toneladas de matéria seca por hectare para o genótipo *Camerron Piracicaba* (ROCHA *et al.*, 2017; SILVA OLIVEIRA *et al.*, 2015).

MANERA *et al.* (2020) relatou um processo de gaseificação em reatores de leito fixo utilizando ar como agente gaseificador, onde chegou-se a 97% de conversão do capim elefante e uma temperatura média de gaseificação de 900 °C. O experimento possui um arranjo onde o gás passa por um processo de reforma, com o objetivo de reduzir a presença de alcatrão e aumentar a concentração de outros gases. Utilizou-se um catalisador de níquel para essa reação, e o mesmo se mostrou extremamente eficiente, reduzindo a presença de alcatrão de 1,77 g/Nm³ para 0,13 g/Nm³ acompanhado por um aumento nas concentrações de H₂, CH₄ e CO (MANERA *et al.*, 2020).

Outro tema muito reportado na literatura é a construção e/ou a transformação de empreendimentos energéticos em biorrefinarias, locais capazes de gerar energia de diferentes formas utilizando combustíveis renováveis. A biomassa de capim elefante foi utilizada como combustível é extremamente versátil e permite ser transformada em produtos distintos, como eletricidade, biocombustíveis, carvão e produtos químicos, além de realizar a captura de dióxido de carbono para seu desenvolvimento. O estudo proposto por FONTOURA *et al.* (2015) analisou a transformação de usina de biomassa convencional em biorrefinaria, levando em consideração os aspectos econômicos. O modelo econômico proposto estuda a comercialização híbrida, onde parte da energia gerada é vendida a longo prazo, em contratos de 20 anos, e o

restante é variável, podendo ser vendido como eletricidade, carvão ou etanol com o objetivo de otimizar os resultados (FONTOURA; BRANDÃO; GOMES, 2015).

2.2.2 Ajuste de variáveis no processo de gaseificação de biomassa lignocelulósica

Com o objetivo de se otimizar o processo, diversos estudos têm sido feitos com diferentes abordagens. JARUNGTHAMMACHOTE e DUTTA (2010) propuseram a otimização do processo para produzir gás com baixo teor de alcatrão e rico em hidrogênio, utilizando como agente gaseificador ar e vapor. Com a injeção média de 100 L/min de ar e vapor, produziu-se gás de síntese com 42% de hidrogênio, ganho de aproximadamente 2% na concentração de H_2 em relação a processos apenas com ar. Porém, a adição em excesso de vapor promove desvantagens no processo. O estudo mostra os dados obtidos no modelo e em experimentos práticos, e aponta resultados muito próximos, validando o modelo para prever a composição, o PCI e demais características do gás gerado (JARUNGTHAMMACHOTE; DUTTA, 2012).

Muitos trabalhos buscam diminuir a quantidade de alcatrão gerada no processo de gaseificação. EDUARDO (2011) apresentou estudo com duplo estágio de alimentação de ar, o que é uma maneira muito reportada na literatura. Utilizando madeira de eucalipto como combustível e reator de fluxo descendente com dois estágios de fornecimento de ar, foi possível reduzir a concentração de alcatrão no gás gerado, porém, percebeu-se redução na concentração de CH_4 . Os compostos produzidos pela reação de pirólise (desvolatilização da biomassa) são mais leves, portanto, são mais facilmente quebrados na zona de combustão. O processo produziu gás com concentrações de: 19,04% de CO , 16,78% de H_2 e 0,89% de CH_4 em base molar. O PCI do gás ficou em torno de 4,539 MJ/Nm³. O projeto tinha consumo de 12 kg/h de biomassa, consumo de ar de 20 Nm³/h para razão entre o fluxo de ar de primeiro e segundo

estágios de 80% (MARTÍNEZ et al., 2011). O mesmo grupo de estudo propôs usar o gás de síntese gerado no processo para produção de energia elétrica através de motor ciclo diesel adaptado com potência de 50 kW (MARTÍNEZ, J. D.; LORA, 2011).

Variando-se a razão entre os dois estágios, LISBETH *et al.* (2014) conseguiram resultados expressivos sobre a diminuição da presença de alcatrão no combustível líquido. O fluxo de ar de alimentação no gaseificador variou entre 18 e 23 Nm³/h e a razão entre os dois estágios ficou em 80%. O gás apresentou concentração de alcatrão e material particulado de $54,25 \pm 0,66$ mg/Nm³ e $102,4 \pm 1,09$ mg/Nm³, para o fluxo de alimentação de ar de $20 \pm 0,45$ Nm³/h. O Gás de síntese apresentou um PCI de $4,74 \pm 0,5$ MJ/Nm³ (GALINDO et al., 2014).

Estudos relatando essa forma de utilização de mais de um estágio para suprimento de ar são de certa forma recentes. JAOJARUEK (2011) realizou testes com dois estágios de alimentação de ar, porém, se fornece mistura de ar e gás de síntese, e o resultado é gás produzido com menores concentrações de alcatrão e com maior poder calorífico, além de atingir eficiência de 15% maior do que em modelos com dois estágios convencionais. O PCI do gás aumentou de 5,4 para 6,5 MJ/Nm³ e o alcatrão caiu para valores inferiores a 45 mg/Nm³. Com essas características, o gás produzido neste experimento pode ser fornecido diretamente para motores de combustão interna (JAOJARUEK et al., 2011).

Dados reais foram obtidos através de planta em larga escala, que possui gaseificação em duplo estágio, utilizando madeira de eucalipto como combustível com o objetivo de gerar energia elétrica e calor. Neste trabalho, atingiu-se valores muito baixos de alcatrão próximos a 5 mg/Nm³. A planta apresentou uma eficiência global de 32,9% e produziu gás com 5,8 MJ/Nm³ com a seguinte concentração: 25% de CO, 23% de H₂, 1,2% de CH₄, 9,5% de CO₂ e 41% de N₂ (BRYNDA et al., 2020). O autor também colocou como elemento positivo, que pode favorecer a utilização de plantas de grande porte, a produção de biocarvão em torno de 36 kg por tonelada de biomassa seca.

MA *et al.* (2012) apresentou resultados de um experimento prático em pequena planta de 190 kW de potência elétrica, alimentada por gaseificador de fluxo descendente, de duplo estágio de ar, sendo madeira o combustível. Atingiu-se valor de PCI de 5,25 MJ/Nm³. A planta é de politransformação, ou seja, produz gás de síntese para transformação de energia elétrica, extrato líquido e carvão na capacidade de produção de 500 Nm³/h de gás de síntese, produção de biocarvão de 60 kg/h e 65 kg/h de extrato líquido. A planta apresenta automação para sistema de alimentação e controle, motor e sistema de limpeza de gás (MA *et al.*, 2012).

Também é essencial para os projetos possuírem facilidade para operação e manutenção. Sistema de gaseificação acoplado a processos de transformação do gás de síntese em energia elétrica, que pode funcionar mesmo em locais remotos, foi proposto por GUPTA (2013). Reator de fluxo descendente e de duplo estágio de alimentação de ar foi projetado para produzir gás limpo a partir de combustível de biomassa, que posteriormente é usado para transformação em eletricidade. Este sistema é proposto para superar alguns desafios técnicos. O sistema está equipado com limpeza a seco e equipamento de resfriamento indireto de gás. O processo de lavagem a seco do gás permite diminuir o gasto com água e o descarte de água poluída. A eficiência a frio do reator foi de 89%, consumo de 15 a 17 kg/h e gás com PCI de 5,5 MJ/Nm³ (RAMAN; RAM; GUPTA, 2013).

BHATTACHARYA (1999) propôs algumas mudanças que apresentaram resultados relevantes. Primeiro, variou-se a taxa de alimentação de ar (fluxo de biomassa/ fluxo de ar) em 0,8, 1 e 1,25. Propôs-se também sistema para o armazenamento do gás, que com o tempo de retenção de aproximadamente 4 horas percebeu-se diminuição no teor de alcatrão de 27 mg/Nm³ para 9,24 mg/Nm³. A biomassa utilizada foi carvão vegetal e percebeu-se que quanto maior a umidade do combustível, maiores eram as concentrações de CO₂ e H₂, porém o alcatrão não sofreu variações (BHATTACHARYA; MIZANUR RAHMAN SIDDIQUE; PHAM, 1999).

A variação da razão massa de ar/massa de biomassa também foi observada por WANDER (2004). O autor propôs uma rota para consumo do resíduo gerado em serraria para a transformação em eletricidade. O gaseificador de leito fixo e fluxo descendente foi utilizado com uma capacidade de 12 kg/h de biomassa. O diferencial do trabalho estava em recircular de parte do gás gerado, o que eleva a temperatura da zona de gaseificação. A razão variou 0,5,1, 1,5, 2, 2,5 e 3. O gás gerado possui PCI de 5,125 MJ/Nm³ e concentrações altas de CO, CO₂ e H₂ (WANDER; ALTAFINI; BARRETO, 2004).

O estudo de ZAINAL (2002) realizou variação da razão de equivalência, que é definida por equação, onde se leva em consideração o fluxo de alimentação de ar, o fluxo de alimentação e biomassa e o tempo de reação. O estudo variou a razão de equivalência entre 0,25 e 0,45. Observou-se variações significativas no PCI e nas concentrações dos gases que formam o syngás (CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂). O PCI médio foi de 5,34 MJ/Nm³, porém, observou-se que o PCI atingiu seu valor máximo de 5,62 MJ/Nm³ com a razão de equivalência de 0,38 e para valores maiores de razão de equivalência o PCI decresce. A eficiência de conversão de massa foi acima de 90% e a eficiência a frio em torno de 75% (ZAINAL et al., 2002).

Variações nas taxas de alimentação de ar e vapor também provocam significativas mudanças nos parâmetros de gaseificação. ZHAI *et al.* (2017) realizou experimento variando a taxa de fluxo de vapor em gaseificador de leito fixo e fluxo descendente operando em temperaturas elevadas (600 a 1200 °C). A injeção de vapor proporciona gás com maior PCI, fato comprovado pelo valor do PCI medido na saída em torno de 10,5MJ/Nm³ e um gás muito rico em H₂, em torno de 60% (ZHAI et al., 2017).

O estudo de NIU *et al.* (2016) também abordou a gaseificação de biomassa com uso de vapor em gaseificadores de leito fixo e fluxo descendente. O objetivo é obter um gás rico em H₂, e mostra como as concentrações de H₂ aumentam com o aumento da temperatura (23,4% a 700 °C para 44,79% a 950 °C). Porém, para temperaturas superiores aos 950 °C o valor diminui.

Com esse aumento de temperatura e aumento de H_2 , diminui-se ligeiramente a produção de CO_2 . O H_2 também aumenta com o aumento da injeção de agente gaseificador (vapor, de 37,1% para 47,7% com 0,3 e 0,9 kg/h na temperatura de 900 °C de vapor). A produção de gás é de 2,69 m³/kg com um PCI de 11,53 MJ/Nm³ (NIU et al., 2016).

2.2.3 Simulação e validação de processos de gaseificação

A simulação de processos permite conhecer um pouco melhor as variáveis envolvidas, e desta forma pode permitir ajustar determinados parâmetros. JAYAH *et al.* (2003) construiu modelo para otimizar a eficiência de conversão do processo de gaseificação. O autor dividiu o processo em duas grandes etapas: Pirólise e Gaseificação. Os modelos construídos determinavam a temperatura e a composição do gás que deixava a etapa da pirólise e entrava na etapa de gaseificação. O modelo de gaseificação determinou umidade e granulometria ideais da biomassa. Os autores concluíram que cavacos de madeira deveriam possuir tamanhos entre 3 e 5 cm com uma umidade de no máximo 15%, além de se evitar matérias que apresentem em sua composição um percentual de carbono fixo acima dos 30%. Apresentaram também a necessidade do revestimento térmico no reator para evitar perdas de calor superiores a 15% e comprimento mínimo da zona de gaseificação de 33 cm, para que a eficiência de conversão fique em valores satisfatórios (JAYAH et al., 2003).

A realização de experimentos em projetos simulados é relevante e permite a validação dos resultados obtidos na simulação. O trabalho de GUPTA (2020) apresentou comparação entre simulação e experimento prático, e as concentrações no gás do experimento prático foram maiores do que na simulação. A temperatura variou entre 750, 800 e 850°C e a razão de equivalência de 0,3, 0,35 e 0,40, além de variar o fluxo de ar em 0,2, 0,5 e 0,8 do fluxo de

biomassa (kg/h). O gás de síntese apresentou 4% de CH_4 em sua composição (GUPTA et al., 2021).

USMANI *et al.* (2020) mostrou como as concentrações de CO e H_2 aumentaram com a injeção da mistura ar e vapor a uma temperatura de 600 a 1200°C, e validou a modelagem com experimentos. A biomassa utilizada foi madeira e o reator de leito fixo e fluxo descendente. Neste trabalho também houve uma variação no fluxo de alimentação de ar em 10, 15 e 20 L/min. A maior concentração de H_2 foi observada quando a temperatura atingiu 1200°C. O valor do PCI aumentou na proporção da mistura vapor/ar na medida que a temperatura também aumentava, para os mesmos valores de temperatura percebeu-se diminuição do PCI (USMANI et al., 2020).

O estudo de AYDIN *et al.* (2019) também abordou a lógica de simulação e validação através de experimento. O objetivo do estudo era obter gás rico em hidrogênio por meio da gaseificação de madeira em formato de pellets, utilizando reatores de leito fixo e fluxo descendente, através de planta com potência elétrica de 10 kW. A variação da razão de equivalência entre 0,14 e 0,37 obteve como resposta diferentes níveis de concentração de CO e H_2 . Variação da temperatura também alterou a presença destes gases no gás de síntese. Observou-se que a temperatura variou de 701 a 1046 °C para a zona de gaseificação utilizando o ar como agente de gaseificação. O processo apresentou eficiência a frio no reator de 78%. O trabalho também destaca como os pellets de eucalipto proporcionam maior eficiência a frio no processo em comparação com partículas de pinha (AYDIN; YUCCEL; SADIKOGLU, 2018).

YUCCEL (2016) também validou seu modelo cinético de simulação através de experimento prático em planta com 10kW de potência elétrica, alimentada com madeira e equipada com reator de leito fixo e fluxo descendente. A simulação apresentou gás com 25,85% de CO , 7,84% de CO_2 e 2,9% de CH_4 , 18,25% de H_2 , enquanto que o processo prático

apresentou 35,07 – 20,77 % de CO , 18,30 – 13,66% de H_2 , 13,68 - 5,95% de CO_2 e 6,7 - 1,2% de CH_4 (YUCEL; HASTAOGLU, 2016).

A modelagem e simulação dos processos é importante, principalmente quando se deseja otimizar a produção de determinado composto, como mostrou SAID *et al.* (2020). O estudo utilizou capim elefante como combustível e o reator trabalhou com uma razão de equivalência de 0,3 em média. O objetivo era aumentar a produção de H_2 , e foi possível chegar a valores próximos a 4,5% em concentração molar, além de ter apresentado 2,29% de CH_4 . As temperaturas do leito atingem em média 750 °C. O modelo foi validado pois os valores apresentam resultados extremamente próximos ao experimento prático (SAID *et al.*, 2020). MOHAMMED *et al.* (2015) também realizou a modelagem do processo de gaseificação propondo divisão da biomassa, ou seja, ele realizou reações apenas com o caule do capim elefante, com as folhas e por fim com o caule e folha. Encontrou-se temperaturas médias para a gaseificação em torno de 600 °C, alto teor de material volátil 85% e umidade *in natura* da biomassa acima de 70%. Nota-se também um teor de cinzas baixo, em torno de 5% e o PCS da biomassa acima dos 16 MJ/kg (MOHAMMED *et al.*, 2015).

Percebe-se que os trabalhos apontam para diferentes possibilidades que permitem um gás com menores teores de alcatrão e maior quantitativo energético. Para que isso ocorra destaca-se a configuração com duplo estágio de alimentação de agente gaseificador, injeção de parte do gás de síntese ao processo e utilização de vapor. Há também grande expectativa na criação de biorrefinarias que consigam extrair diferentes produtos de uma mesma biomassa. Precauções quanto as características da biomassa também devem ser analisadas, principalmente umidade e concentração de sais minerais. São apresentadas oportunidades para maior rendimento de plantas com processos de gaseificação, como o aproveitamento das cinzas e a produção de biofluidos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Características básicas do CeSFaMB©

Este trabalho utilizou o Comprehensive Fluidized and Mobile Bed Simulator (CeSFaMB ©) com a autorização de seu autor. Este software já foi validado e aplicado a vários tipos de equipamentos, incluindo gaseificadores, alimentados com uma ampla gama de combustíveis e misturas de mais de um combustível, (BENINCA, 2016; CADAVEZ; DE SOUZA-SANTOS, 2021; CERIBELI; SOUZA-SANTOS, 2019; SOUZA-SANTOS, 2016; SOUZA-SANTOS; CERIBELI, 2013).

O modelo matemático básico do CeSFaMB © vem sendo aprimorado e testado com sucesso desde 1987 e funciona com base em equações diferenciais de balanço de massa e energia, levando em consideração que a unidade simulada opera em regime permanente, sendo especialmente útil para otimização e projeto de processos. O modelo é capaz de simular unidades industriais e piloto, dentre estas unidades estão fornos, caldeiras, gaseificadores, secadores e reatores. Os equipamentos podem ser de leitos móveis descendentes, leitos móveis ascendentes, leitos fluidizados borbulhantes, leitos fluidizados circulantes, leitos descendentes arrastado, ascendente arrastado e fluxo pneumático. A versão mais atualizada do modelo permite a simulação de equipamentos utilizando camisas para: pré-aquecimento a gás, aquecimento a gás, aquecimento de água, geração de vapor, mantas elétricas e várias outras combinações.

O modelo utiliza equações diferenciais de primeira ordem e inclui todos os fenômenos relevantes que ocorrem dentro do reator. Ele assume que todas as mudanças de variáveis ocorrem na direção vertical e descreve as condições de temperatura, concentração, vazão e dinâmica de fluidização ao longo do interior do equipamento. Para cada ponto no leito, região

próxima ao local onde fica depositada a biomassa e em zonas acima do leito (freeboard) são realizados os balanços de energia, assim como para cada fase sólida e gasosa, e também os balanços de massa para todas as espécies químicas. A Figura 2 apresenta o que o modelo considera como freeboard e leito em reatores de leito fixo e fluxo concorrente.

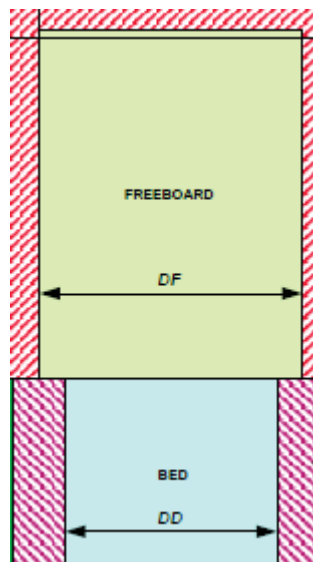


Figura 2 – Especificação das zonas dentro do reator
Fonte: SOUZA-SANTOS (2010) (reprodução permitida pelo autor)

Os processos que ocorrem dentro dos gaseificadores podem envolver até cinco fases físicas, reações químicas em todas as fases, dinâmica de cada fase, transferência de calor e massa entre todas as fases, transferência de calor entre fases e as partes internas (tubos e paredes). Além disso, o modelo considera cerca de uma centena de reações químicas possíveis, incluindo processos como desvolatilização e secagem de combustíveis sólidos carbonosos. A estrutura considera 18 gases e 14 componentes químicos sólidos, mas pode ser expandida para incluir mais espécies. A maioria desses componentes químicos está presente em todas as fases físicas.

O autor fornece junto ao software um pacote para diferentes configurações de gaseificador para edição de acordo com as características do experimento que se deseja simular. Configurações de gaseificadores de biomassa e carvão, de fluxo ascendente, descendente,

fluidizado, fluidizado circulante, pressurizado, entre outros. As principais equações utilizadas pelo modelo e as principais hipóteses adotadas pelo simulador estão descritas no Anexo B deste trabalho e em trabalhos publicados do autor, (DE SOUZA-SANTOS, 2010; DYAKOV et al., 2014; SOUZA-SANTOS, 2010, 2016). A Figura 3 apresenta a rotina do modelo.

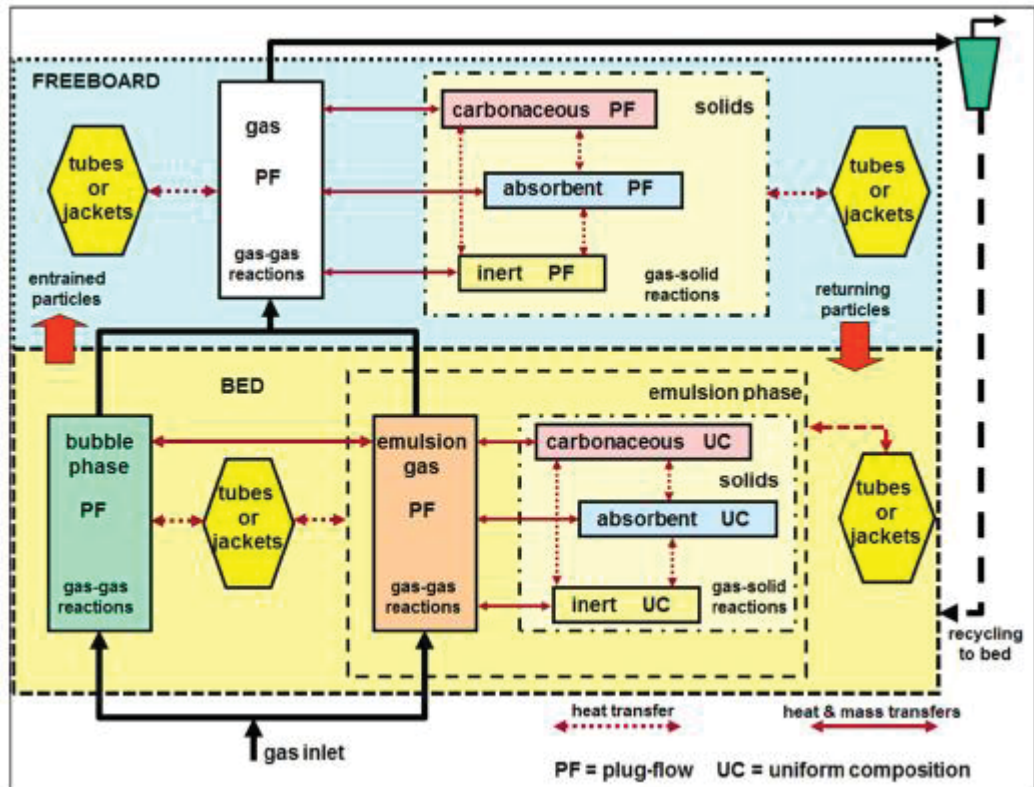


Figura 3 - Rotina simplificada do modelo base para o software CeSFaMB©
 Fonte: SOUZA-SANTOS (2010) (reprodução permitida pelo autor)

O simulador fornece como resposta taxas de gás e sólido deixando o equipamento, percentual da conversão de carbono, composição do gás em diferentes configurações (com e sem umidade, com e sem alcatrão), vazão mássica, temperatura adiabática de chama, entalpia de combustão do gás gerado, perfil de temperatura de cada região dentro do reator e diversas outras propriedades termodinâmicas. Para essas respostas são necessários alguns dados de entrada, como geometria completa do equipamento, características do combustível, taxa de alimentação de combustível e do agente da gaseificação, pressão de trabalho, condições

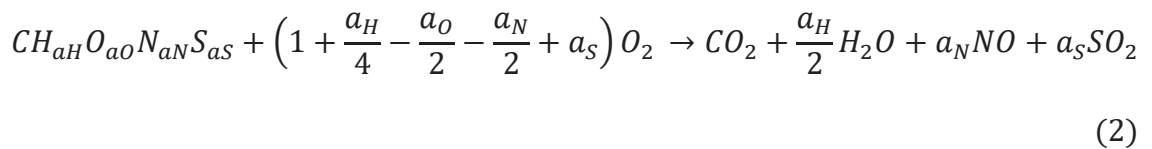
ambientes, coeficiente de condutividade térmica dos materiais, entre outros. Maiores detalhes podem ser encontradas na literatura especializada (SOUZA-SANTOS, 2010).

3.2 Parâmetros do processo de simulação da gaseificação

O funcionamento do software CeSFaMB ©, neste estudo específico, foi verificado pela comparação de dados experimentais obtidos por RESENDE (2016), em gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente, alimentado com eucalipto. O modelo virtual foi criado a partir dos parâmetros experimentais observados em um reator de leito fixo e fluxo concorrente. O fluxo de alimentação de biomassa ao reator foi de 10 kg/h. As Equações 1 e 2, de acordo com a metodologia proposta por SOUZA-SANTOS (2010), foram utilizadas para calcular os diferentes valores para a razão de equivalência e a quantidade de ar para uma oxidação completa (em condições estequiométricas). Na Equação 2 os coeficientes a_j devem ser calculados com base na biomassa seca.

$$\bar{w} = \frac{F_{ar}}{F_{estequiométrico-ar}} \quad (1)$$

Onde: F_{ar} é o vazão mássica de ar fornecida (kg s^{-1}) e $F_{estequiométrico-ar}$ vazão mássica de ar para reação estequiométrica (kg s^{-1}).



A razão de equivalência é um parâmetro importante que deve ser monitorado em processos de gaseificação, logo sua variação provoca significativas mudanças no processo e pode contribuir para um gás com maior poder calorífico e concentrações diferentes de compostos de interesse no gás de síntese. Muitos trabalhos na literatura abordam a variação de ER em valores inferiores a 0,3 e em alguns casos valores inferiores a 0,15. Em um primeiro momento variou-se o ER de 0 a 0,3 e posteriormente diminuiu-se o intervalo para 0 a 0,15 (AYDIN; YUCEL; SADIKOGLU, 2018; JAHROMI et al., 2021; KALLIS; SUSINI; OAKLEY, 2013; LENIS; PÉREZ; MELGAR, 2016; YUCEL; HASTAOGLU, 2016).

Variou-se também o agente gaseificador, outro fator muito importante para se obter um gás de síntese com diferentes configurações. Foram utilizados ar e oxigênio puro. O ar em uma proporção de 79% N_2 e 21% O_2 e posteriormente 100% O_2 . A literatura também é extensa em trabalhos com essa abordagem para diferentes agentes gaseificadores (NIU et al., 2016; SHAHABUDDIN; BHATTACHARYA, 2021; USMANI et al., 2020; ZHAI et al., 2017)

Os parâmetros apresentados na Tabela 5 foram utilizados como entrada do software para a construção do modelo virtual do gaseificador.

Tabela 4 - Parâmetros de Entrada Utilizados para Simulação

Parâmetro	Valor	Referências
Estimativa Mínima % para conversão de carbono fixo no leito	60%	R1
Estimativa Máxima % para conversão de carbono fixo no leito	98%	R1
Diâmetro dos orifícios para injeção de gás/vapor através do distribuidor	0,05 m	R2
Número de Orifícios para a injeção de gás/vapor	4	R2
Espessura da Parede de Isolamento Térmico no leito	0,003 m; 0,001 m; 0,002 m	R2
Condutividade Térmica Média no leito	13,9; 0,04; 52 (W/mK)	R3

Emissividade Média da Superfície do Leito no leito	330	R1
Espessura da Parede de Isolamento Térmico na freeboard	0,003 m; 0,001 m; 0,002 m	R2
Condutividade Térmica na freeboard	13,9; 0,04; 52 (W/mK)	R3
Emissividade Térmica da Superfície Externa na freeboard	330	R1
Espessura da Casca e do Isolamento Térmico no distribuidor	0,0026 m	R2
Condutividade Térmica no distribuidor	52 (W/mK)	R3
Fluxo de Massa de Entrada de ar no distribuidor	$1,46 * 10^{-3}$ kg/s	R2
Temperatura do Fluxo de Massa de ar na entrada no Distribuidor (K)	298,15 K	R2
Pressão do Fluxo de Massa de ar na Entrada do Distribuidor (KPa)	110 kPa	R2
Porcentagem Molar dos Componentes do Gás de Entrada (ar Atmosférico)	79% de N ₂ e 21% O ₂	R2
Condições Ambientais (Temperatura Ambiente e Velocidade do Vento)	298,15 K e 2 m/s	R2
Poder Calorífico Inferior da Biomassa	16,620 MJ/kg; 16,7 MJ/kg	R2, R4
Temperatura de Entrada da Biomassa	298,15 K	R2
Fluxo de Massa de Entrada da Biomassa	$2,77 * 10^{-3}$ kg/s	R2
Análise da Biomassa (Umidade)	17%; 10%; 8%; 6%; 4%	R2

Referências: R1 - (SOUZA-SANTOS, 2010); R2 - (RESENDE, 2016); R3 - (ÇENGEL; BOLES, 2013); R4 - (MARAFON et al., 2021)

A biomassa foi utilizada em formato de discos de diâmetro médio de 8,2 cm e 3,3cm de comprimento. A Tabela 4 apresenta o PCI em ambos os combustíveis, o teor de cinzas e as concentrações de Carbono, Hidrogênio, Oxigênio e Enxofre, em base molar. Os dados se referenciam do trabalho de RESENDE (2016) para o eucalipto e em dados de MARAFON et al. (2021) para o capim elefante.

Tabela 5 – Características das biomassas utilizadas no processo de gaseificação

Biomassa	PCI ($MJ\ kg^{-1}$)	Teor de Cinzas (%)	Umidade (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Capim elefante	16,7	4,71	10, 8, 6 e 4	43,65	5,89	49,84	0,60	0
Eucalipto	16,62	0,44	17, 10, 8, 6 e 4	47,35	6,08	45,84	0,09	0,20

Referência: (RESENDE, 2016)(MARAFON et al., 2021)

A umidade da biomassa é um fator que pode afetar a gaseificação, logo, com o objetivo de analisar as diferentes respostas, variou-se a umidade da biomassa nos seguintes valores: 10%, 8%, 6% e 4% para ambos os combustíveis. Muitos estudos na literatura trabalham com valores de umidade inferiores a 10% (BHATTACHARYA; MIZANUR RAHMAN SIDDIQUE; PHAM, 1999; GUPTA et al., 2021; KALLIS; SUSINI; OAKEY, 2013; RAMAN; RAM; GUPTA, 2013; YUCEL; HASTAOGLU, 2016).

3.3 Estimativa do potencial energético via gaseificação de resíduos da cadeia produtiva de eucalipto

A metodologia apresentada na Equação 3 foi utilizada para a estimativa do potencial de geração de eletricidade. A metodologia foi proposta por OLIVEIRA et al., (2021) e adaptada para este estudo. O volume de gás considerado na equação é o volume total de gás de síntese gerado pelo processo de gaseificação, (JAYAH et al., 2003; YUCEL; HASTAOGLU, 2016; ZAINAL et al., 2002).

$$P_{GE} = \frac{Q_{syn} * PCI * \eta_{conv}}{860} [kWh\ ano^{-1}] \quad (3)$$

Onde Q_{syn} é a quantidade de gás de síntese gerada pelo processo de gaseificação ($Nm^3\ ano^{-1}$); PCI é o poder calorífico inferior do gás de síntese $1.931\ kcal\ kg^{-1}$; η_{conv} é a eficiência de conversão de 0,28 que é o resultado da combinação entre a eficiência do motor de

combustão interna adaptado para queima de gás (30 a 40%) e o gerador (80%) (FREITAS et al., 2019) (REIS; REIS, 2017).

Para avaliar a viabilidade técnica dos potenciais energéticos estimados, foi aplicado neste estudo um algoritmo de otimização desenvolvido por OLIVEIRA et al., (2021), que realiza a alocação de usinas para geração de energia elétrica. A alocação foi feita com o objetivo de minimizar a distância dos produtores de eucalipto e as usinas, encontrando assim um ponto ótimo para a sua instalação. O objetivo está sujeito a restrições quanto à conexão na rede de distribuição impostas pela resolução normativa brasileira 482 (ANEEL, 2012) e à distância máxima.

O modelo toma como base todos os municípios que possuem potencial de geração de energia e inicia seu processo escolhendo o município de maior potencial dentre todos os municípios, após esta escolha, ele avalia a distância deste município a outros municípios que estão ao seu redor, este processo de escolha se dá com base em coordenadas geográficas de latitude e longitude de cada município. Os municípios mais próximos são escolhidos até que a potência máxima seja atingida (4,5 a 5MW), quando isso acontece aloca-se uma usina. A usina é alocada em um ponto que consiste em uma média ponderada da distância entre os municípios que compõe este aglomerado, isso ocorre para diminuir a distância do transporte de biomassa para as usinas geradoras de eletricidade. Esse processo se repete até a alocação de todos os municípios. O georreferenciamento e o uso de dados geográficos foram feitos através do software livre QGis. Maiores informações sobre o modelo podem ser encontradas no Anexo C deste estudo.

Adotou-se que o sistema funcionaria dez horas diárias e 300 dias ao ano devido a paradas para manutenção e reparo nos equipamentos. Uma vez realizada a conversão em energia elétrica é necessário converter o valor de energia em potência instalada das centrais de

geração. A Equação 4 apresenta a metodologia para a estimativa da potência da unidade geradora. A Metodologia foi aplicada e validada por OLIVEIRA et al., (2021b).

$$P_{ug} = \frac{P_{GE}}{t_{DP} * t_{OP} * fp} \quad (4)$$

Onde P_{ug} é a potência da unidade geradora; t_{OP} é o tempo de operação do sistema de 10 horas; fp é o fator de potência do gerador de 0,80; P_{GE} potencial de energia calculado através da Equação 3; t_{DP} são os dias que o sistema opera em 1 ano.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Simulação e validação do modelo virtual utilizando a biomassa de eucalipto

A Tabela 6 traz a comparação dos principais parâmetros encontrados no modelo virtual e no experimento prático proposto por RESENDE (2016). As condições de entrada foram biomassa de eucalipto, com umidade de 17% e razão de equivalência de 0,11. Embora o software CeSFaMB © permita apresentar a concentração do gás de saída com e sem a presença de umidade e alcatrão, os resultados foram todos apresentados em base seca, sem a presença de alcatrão, seguindo os parâmetros do experimento prático.

Tabela 6 – Principais parâmetros de resposta do processo simulado e do experimento para as mesmas variáveis de entrada

Propriedades	Simulação	Prático
Temperatura de Saída do Gás	390,33°C	426°C
Densidade do Gás	1,301 kg/Nm ³	1,358 kg/Nm ³
Calor Específico do Gás	1,395 kJ/kgK	1,81 kJ/kgK
Eficiência a Frio do Reator	24,00%	32,71%
Temperatura na Zona de Gaseificação	652,36°C	600°C
Temperatura na Zona de Combustão	999,5°C	1073,28°C
PCI (MJ/Nm ³)	3,44	3,59
CO ₂ (%)	15,99	2,27
CO (%)	10,33	19,26
CH ₄ (%)	1,8827	1,55
H ₂ (%)	4,28	5,87

O PCI possui valores muito próximos, 3,44 MJ/Nm³ para a simulação e 3,59MJ/Nm³ para o experimento. Percebeu-se alguns desvios, principalmente nas concentrações de CO₂, 2,27% para o experimental e 15,35% para o modelo virtual. Durante o processo de gaseificação o CO₂ pode ser gerado nas reações de oxidação do carbono, deslocamento de monóxido de carbono e vapor e reforma a vapor de hidrocarbonetos. Como o processo é extremamente instável, é possível que haja algum desequilíbrio químico nessas reações no processo simulado e no processo real, o que justifica a formação maior deste composto no modelo virtual. Maiores concentrações de monóxido de carbono são interessantes para rotas que vão produzir combustíveis sintéticos para motores e produtos químicos.

A eficiência a frio do reator também apresentou uma ligeira diferença, o motivo deve estar relacionado à porcentagem de CH₄ e H₂. A simulação apresenta concentração de metano superior ao experimento e de hidrogênio inferior ao experimento. Portanto, mesmo uma pequena diferença nestes gases pode representar um grande efeito na eficiência da gaseificação. Com relação as diferenças na concentração de CO, eles representam produtos de gaseificação incompleta (alcatrão, fuligem ou carvão), percebe-se uma maior formação deste gás no experimento, os desvios podem ser parcialmente explicados por conta da temperatura baixa na zona de gaseificação, o que ajuda na maior formação deste composto.

A qualidade da biomassa interfere muito durante o processo, os dados elementares e energéticos da biomassa foram coletados antes do experimento, porém, a simulação apresenta pequeno desvio no PCI apresentado da biomassa, em torno de + 0,85 MJ/Nm³. O Software calcula o PCI com base nos dados de composição do combustível.

Embora o software leve em consideração as mudanças térmicas do equipamento com o ambiente para a simulação, alguns parâmetros são difíceis de medir. A reação apresentou uma conversão de carbono em torno de 98%, comprovando o que a literatura traz para este parâmetro em processos de gaseificação.

Após a verificação e concordância do modelo frente a um experimento foram realizadas variações de alguns parâmetros para estudar as melhores condições de gaseificação das biomassas de eucalipto e capim elefante avaliando os resultados em termos de concentração de gases produzidos, poder calorífico inferior e volume de gás produzido.

4.2 Variação de parâmetros no modelo para biomassa de eucalipto

4.2.1 Respostas do modelo utilizando ar como agente gaseificador

A Figura 4 apresenta os resultados da variação da razão de equivalência de 0 a 0,3 utilizando como agente gaseificador o ar. Percebe-se que o PCI possui valores maiores quando a razão de equivalência é menor do que 0,10. Identifica-se valores altos para o PCI do gás gerado quando ER esteve entre 0,01 e 0,05, porém, este fato está diretamente relacionado a diminuição na produção de gás de síntese. Para razões de equivalência de 0,01 tem-se uma produção de $6,1524 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ com um PCI de $3,43 \text{ MJ kg}^{-1}$, para um consumo de 10 kg h^{-1} de biomassa de eucalipto, enquanto que para um ER de 0,05 o PCI do gás é de $2,08 \text{ MJ kg}^{-1}$ com uma produção de $17,59 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$.

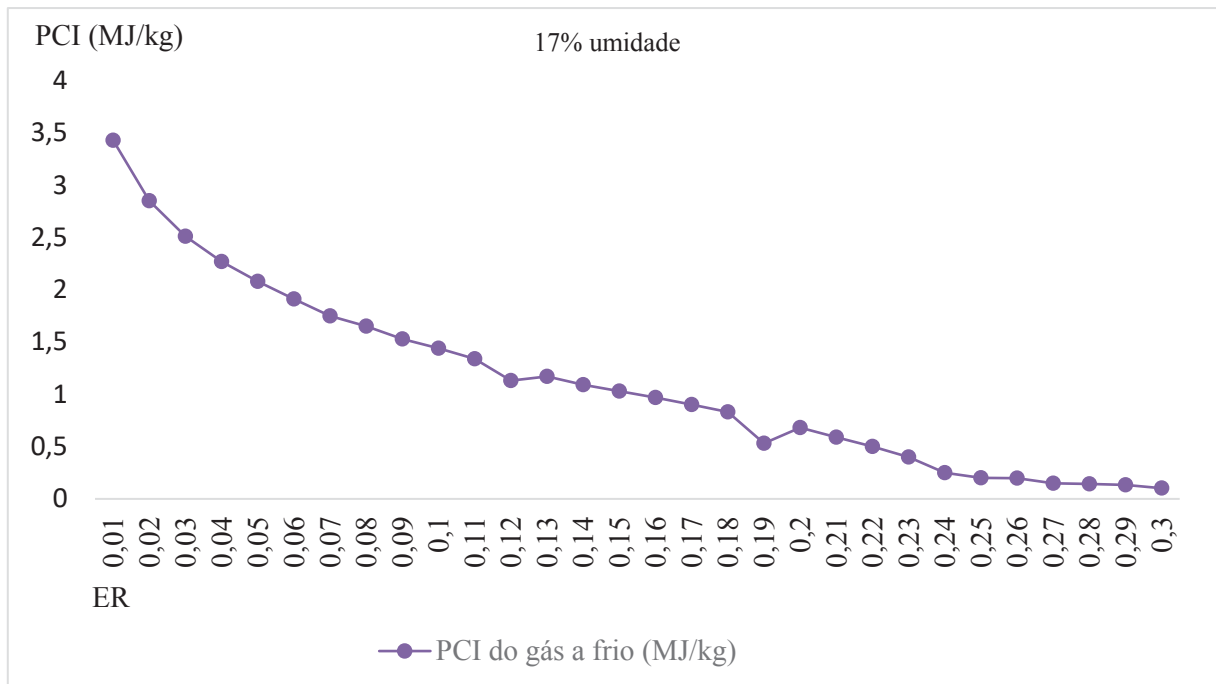


Figura 4 – Variação do PCI para diferentes valores de razão de equivalência da biomassa de eucalipto com 17% de umidade

A Figura 5 apresenta a variação da concentração em base molar dos 4 compostos analisados neste estudo e mais relatados na literatura, CO , CO_2 , H_2 e CH_4 em base molar. Para maiores valores de PCI é ideal que o gás apresente maiores concentrações de H_2 e CH_4 , e em caso de uso em motores maiores índices de CO . Maiores concentrações destes gases são observadas para razões de equivalência inferiores a 0,10. A medida que a razão de equivalência aumenta, ou seja, mais ar é fornecido ao processo, aumentasse também as concentrações de CO_2 , o que indica maiores ocorrências de combustão completa. Maiores valores de CO são atingidos com ER muito pequenos, isso ocorre por conta da reação de gaseificação incompleta, o que se justifica devido ao baixo volume de gás de síntese produzido nestas condições.

Para razões de equivalência superiores a 0,10, o CO e H_2 são oxidados para aumentar a produção de CO_2 e H_2O às custas de CO e H_2 . O aumento da produção de CO_2 é claramente visto na Figura 5, enquanto o aumento postulado na concentração de H_2O não é mostrado, uma vez que os dados de composição são apresentados em base seca.

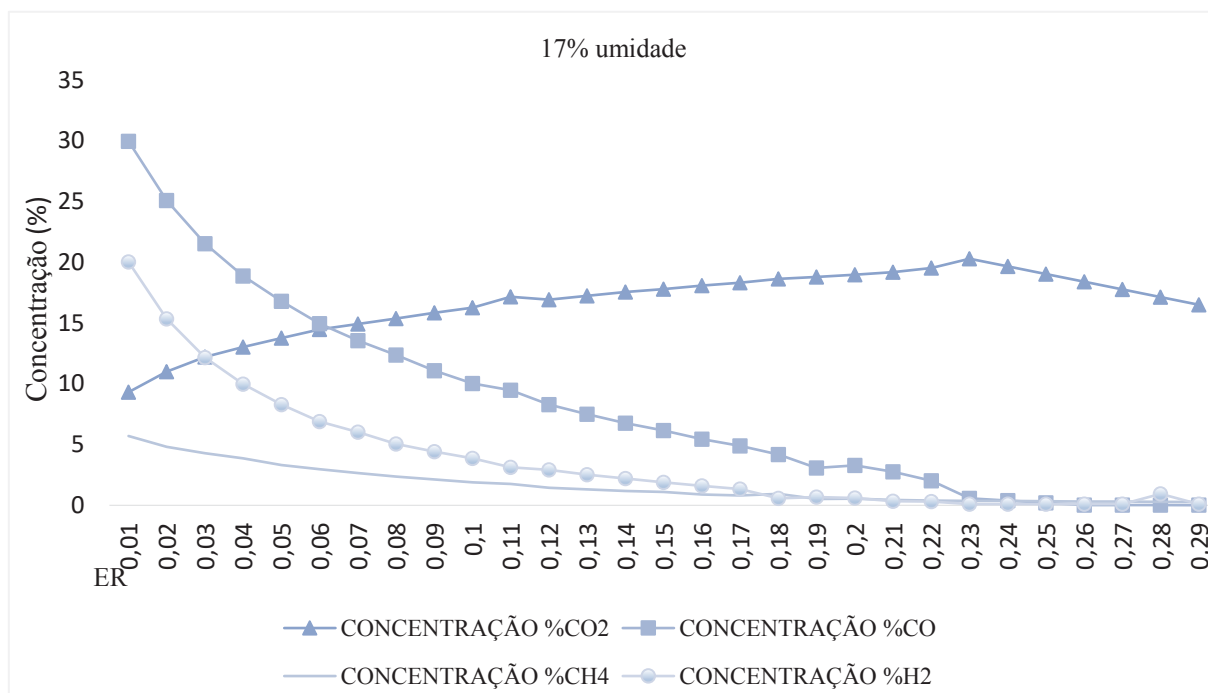


Figura 5 – Variação das concentrações de CO , CO_2 , H_2 e CH_4 para diferentes valores da razão de equivalência com biomassa de eucalipto a 17% de umidade e injeção de ar

Os valores apresentados tem como base uma biomassa de eucalipto com 17% de umidade, com o objetivo de buscar respostas diferentes variou-se a umidade do combustível em 10%, 8%, 6% e 4%. Os resultados desta variação estão apresentados na Figura 6 para diferentes valores de PCI, e na Figura 7 para diferentes concentrações dos principais gases analisados neste estudo.

Observou-se que o PCI apresenta variação semelhante com as concentrações de CO , CH_4 e H_2 , a medida que a razão de equivalência aumenta a concentração destes gases e o PCI diminuem. É importante observar que este experimento apresenta uma relação inversa com relação ao volume de gás produzido, maiores valores de PCI e de CO apresentam menores volumes de gás produzido.

A variação da umidade provocou uma pequena diminuição no PCI do gás. Para uma razão de equivalência de 0,04 tem-se um PCI de $2,35 MJ kg^{-1}$ com a umidade da biomassa em 10% e de $2,27 MJ kg^{-1}$ para umidade da biomassa de 4%. Para os outros valores de ER não foram observadas variações elevadas, indicando que a umidade da biomassa, em valores

inferiores a 10%, não influenciam tanto no PCI do gás gerado. Destaca-se a dificuldade de se obter biomassa com umidade inferior a 10%.

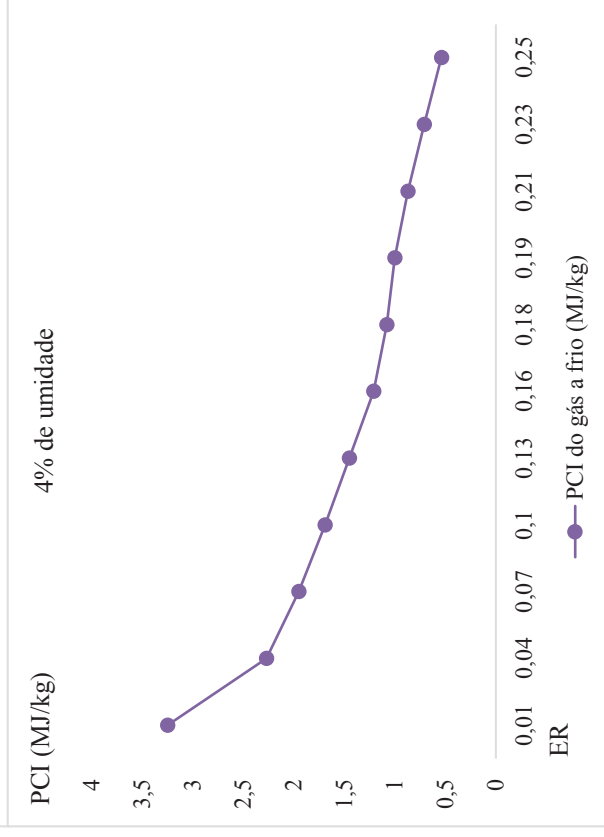
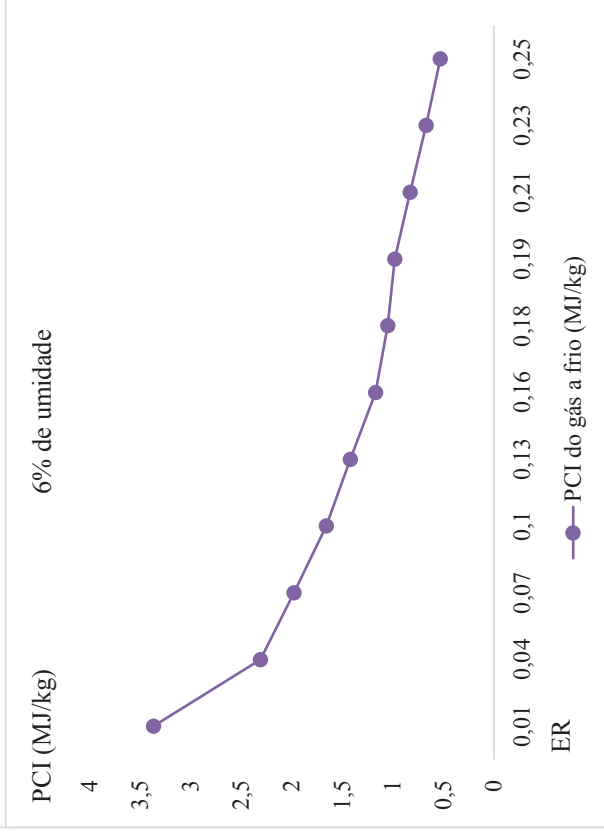
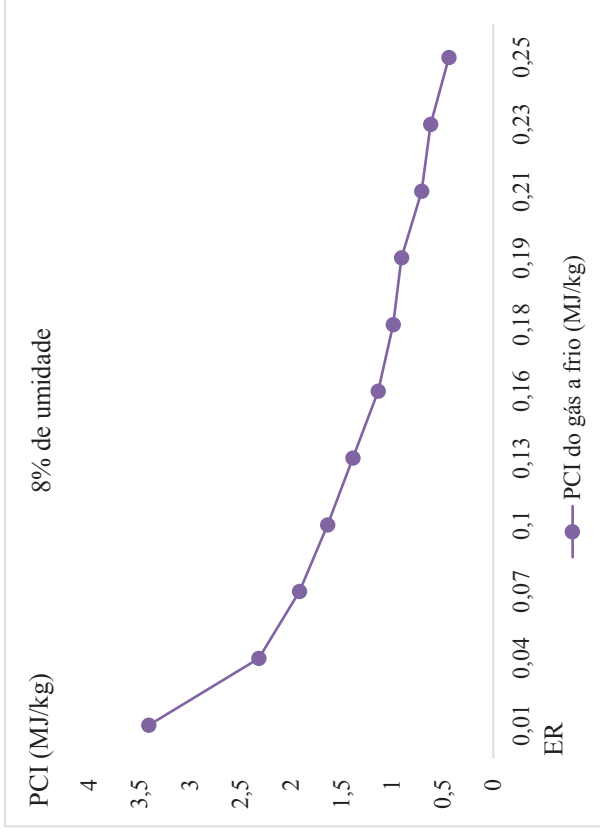
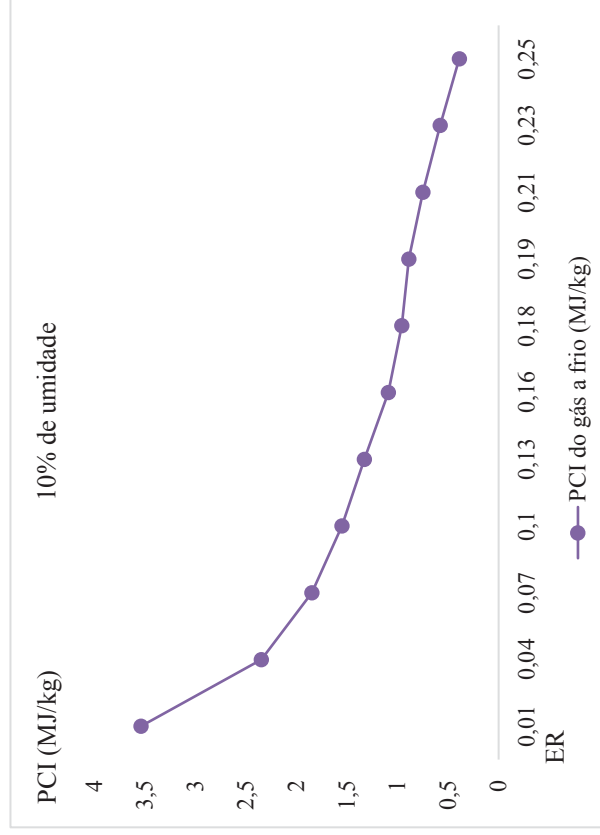


Figura 6– Variação do PCI do gás à frio para ER variando de 0 a 0,3, umidade da biomassa de eucalipto variando em 10%, 8%, 6% e 4% e injeção de ar.

As concentrações não apresentaram variações significativas quando a umidade e a razão de equivalência variaram. O CH_4 apresentou uma pequena queda de concentração de 6,45% para 5,48%, em base molar, quando a umidade variou de 10 para 8% com uma razão de equivalência de 0,01. As concentrações de CO apresentam valores muito próximos para todos os valores de ER e os diferentes valores de umidade da biomassa. Os valores de H_2 variam com a diminuição da umidade da biomassa. Para uma razão de equivalência de 0,10 e umidade de 10% a concentração do gás hidrogênio é de 4,27%, aumenta para 5,66% quando a umidade está em 8% e a razão de equivalência permanece a mesma e sofre uma queda para 4,95% quando a umidade está em 4%. Esses pequenos desvios podem ser explicados pela reação de deslocamento da água.

A eficiência a frio e a quente do reator apresenta oscilação à medida que a umidade e a razão de equivalência variam. Os valores de eficiência a frio crescem de 11% para aproximadamente 25% quando a razão de equivalência varia de 0 até 0,18 e decrescem quando ER varia de 0,18 a 0,25 para aproximadamente 15%, para todos os valores de umidade. Os maiores valores para a eficiência a frio foram de 27,77%, e foram encontrados quando a umidade da biomassa chegou a 4% e a ER foi de 0,13. A eficiência a quente apresentou de modo geral decréscimo à medida que a razão de equivalência aumentou, porém, mesmo decrescendo os valores foram maiores quando a umidade da biomassa diminuiu. Para uma mesma razão de equivalência de 0,25 foi observada uma eficiência a quente de 45,16% com uma umidade de 10% e de 59,14% com uma umidade de 4%.

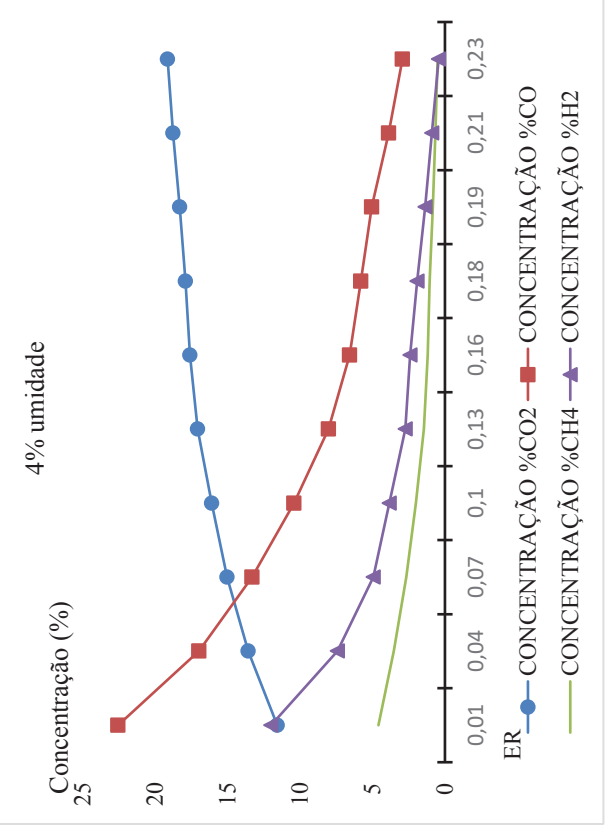
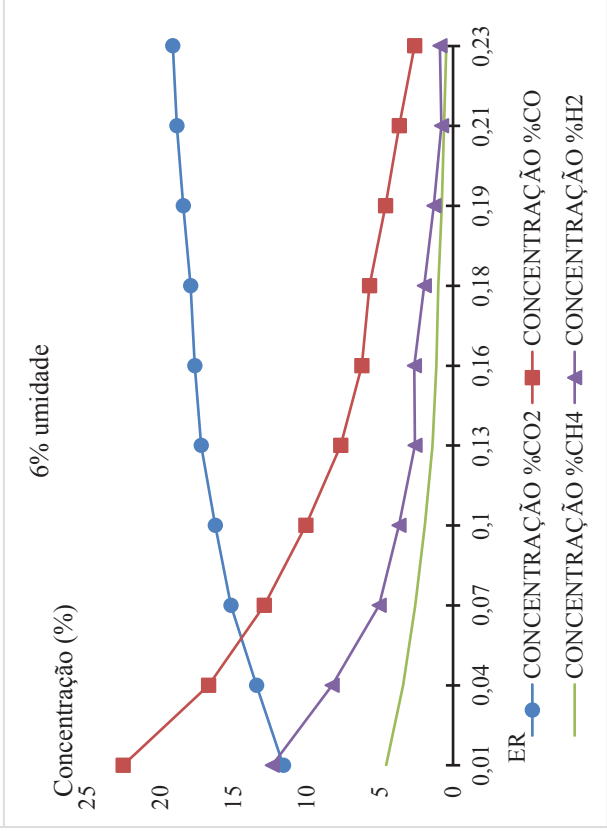
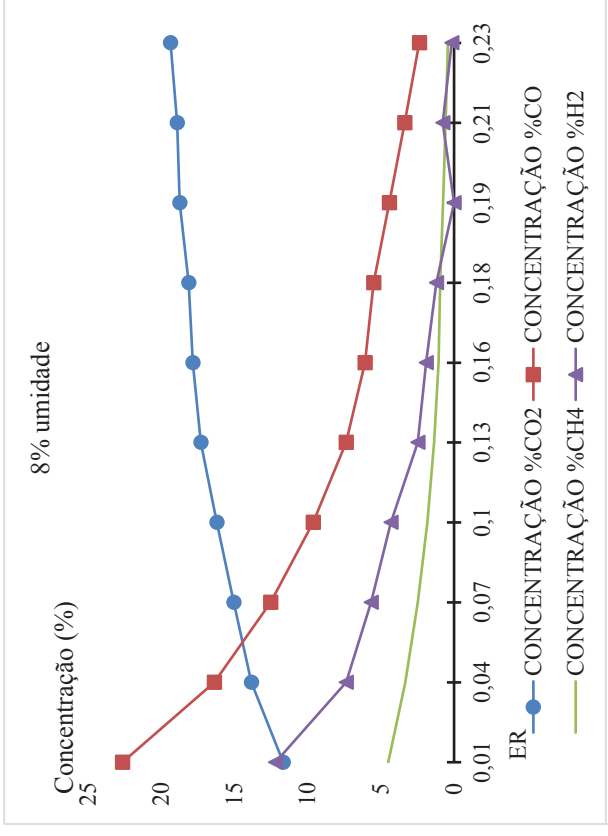
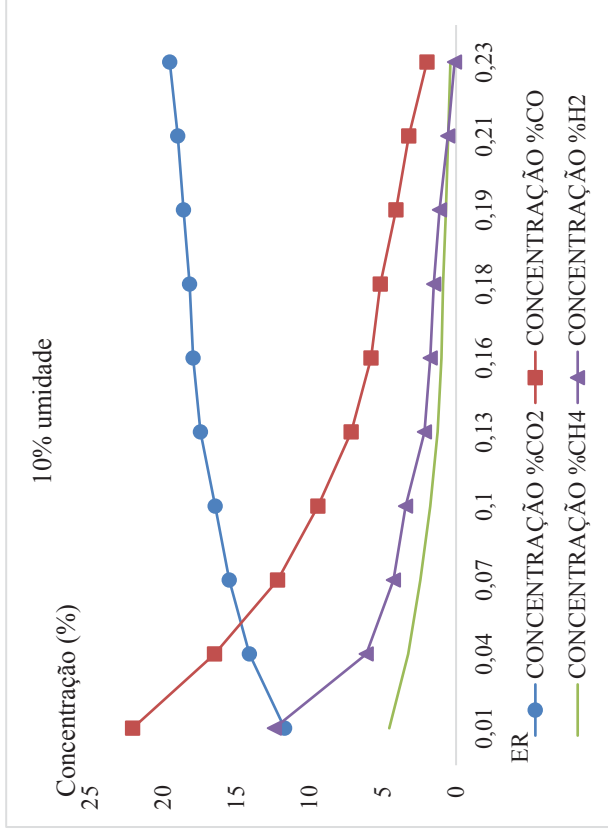


Figura 7 - Variação das concentrações de CO_2 , H_2 e CH_4 em base molar para ER variando de 0 a 0,3 e umidade da biomassa de eucalipto de 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de ar.

4.2.2 Respostas do modelo utilizando oxigênio como agente gaseificador

Além da produção de gás de síntese, também existe a possibilidade de usar o gás como combustível para produção de calor e energia. Para a produção de energia, onde o gás é queimado em motores a gás ou turbinas a gás, um alto poder calorífico inferior do gás produzido é um parâmetro de desempenho crucial, pois, facilita a ignição do gás e aumenta a eficiência termodinâmica do processo. Além disso, altas temperaturas de chama são importantes na indústria metalúrgica.

A literatura relata um aumento do PCI quando o agente gaseificador é substituído por oxigênio puro. A Figura 8 apresenta os diferentes valores do PCI para a injeção de oxigênio puro com diferentes valores de ER e umidade da biomassa. O PCI apresentou valores superiores aos valores encontrados quando o ar era o agente gaseificador. Para uma razão de equivalência de 0,11 encontrou-se um PCI de $8,14 \text{ MJ kg}^{-1}$ com uma umidade da biomassa de 4%, nas mesmas condições, porém, utilizando ar como agente gaseificador encontrou-se um PCI de $1,69 \text{ MJ kg}^{-1}$.

O PCI apresentado pela Figura 8 variou em 7,76, 7,84, 8,08 e $8,15 \text{ MJ kg}^{-1}$ para razão de equivalência de 0,11 e umidade de 10, 8, 6 e 4% respectivamente. O fluxo de gás de síntese também aumenta a medida que aumenta-se o fornecimento de oxigênio para a reação. O melhor cenário de produção foi encontrado com a razão de equivalência de 0,11 e umidade de 6% com uma produção de $2,38 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ para um consumo de 1 kg h^{-1} . Este melhor cenário foi escolhido com base no maior volume de produção e maior PCI, que nestas condições foi de $8,08 \text{ MJ kg}^{-1}$.

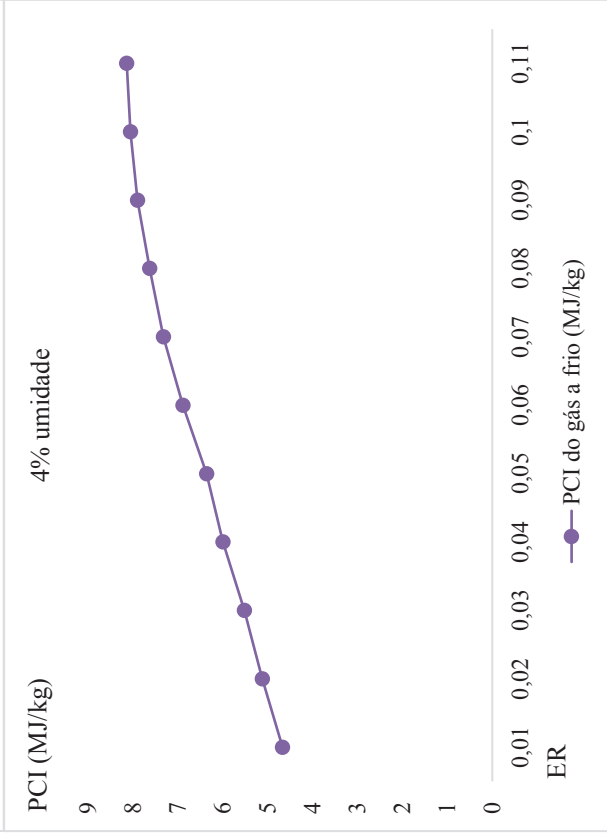
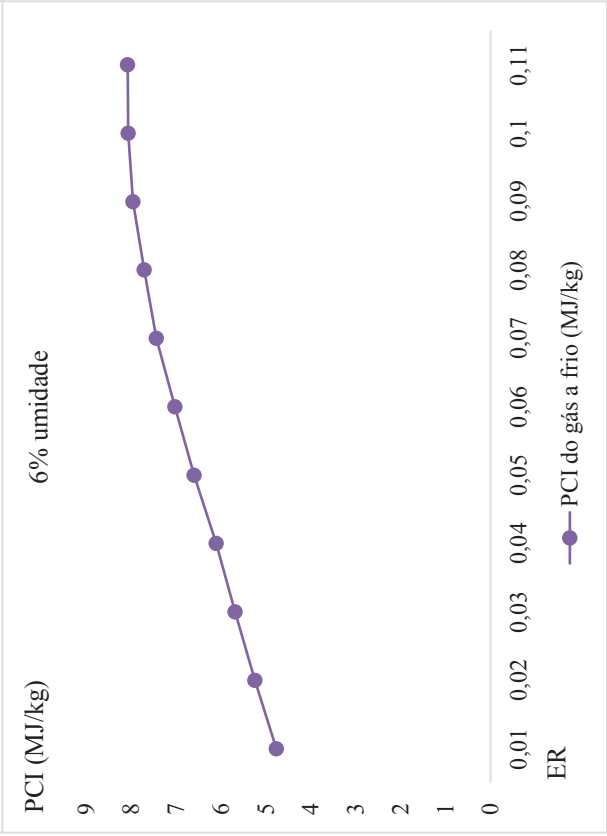
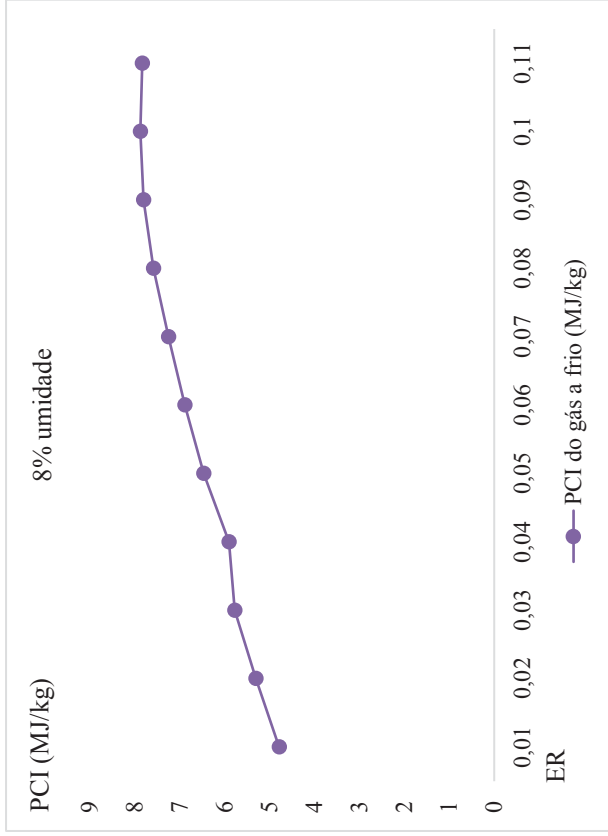
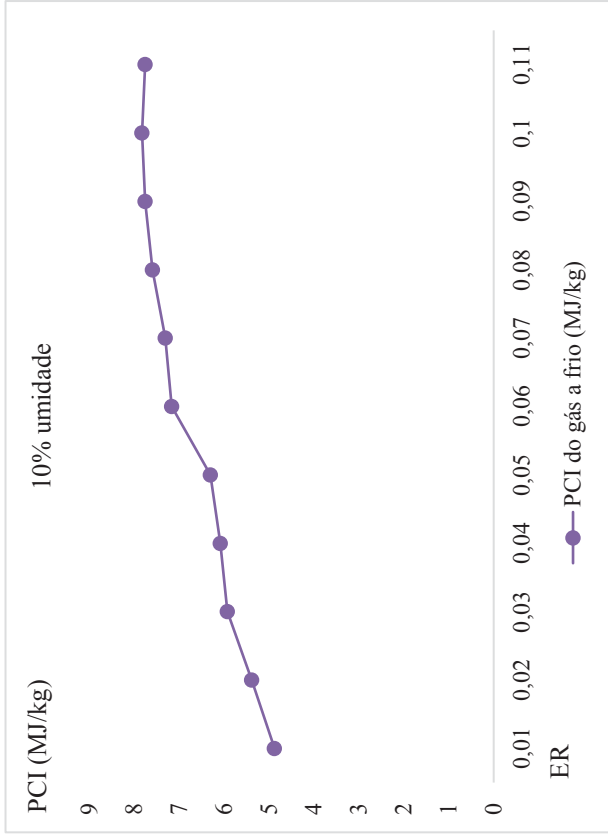


Figura 8 - Variação do PCI do gás à frio para ER variando de 0 a 0,11, umidade da biomassa de eucalipto variando em 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de oxigênio.

Os gases que são componentes do gás de síntese também sofrem significativas mudanças com a troca do agente gaseificador. A Figura 9 apresenta a variação dos gases analisados, CO , CO_2 , H_2 e CH_4 . Percebe-se um incremento significativo de H_2 em comparação com a alimentação de ar. Para razão de equivalência de 0,05 tem-se uma concentração de hidrogênio em base molar de aproximadamente 30% em todas as configurações de umidade da biomassa, enquanto que para a configuração com alimentação a ar, o gás apresentou concentração de 12%. A concentração de CO também apresentou aumento de 22% para aproximadamente 45%, ar como agente gaseificador e oxigênio puro respectivamente com um ER de 0,05. Um dos gases de interesse para processos de conversão energética movidos a gás é o CH_4 , que também apresentou incremento quando o agente da gaseificação é o oxigênio puro, para a razão de equivalência de 0,05, observou-se uma concentração de aproximadamente 7,5% e para processos com o ar nas mesmas configurações observou-se uma concentração de aproximadamente 4,3%. Este aumento pode ser explicado em partes pelo aumento de oxigênio na reação o que implica em maiores taxas de reação de gaseificação completa.

Em todas as configurações testadas, percebe-se que ao aumentar ER a concentração de CO_2 também aumenta, o que significa que o processo reacional está apresentando um volume maior de oxidação, combustão completa, aumenta-se também as reações de gaseificação, logo a produção de gás de síntese é maior. Para reações alimentadas com ar, o gás apresenta também uma diminuição de seu PCI, e para reações alimentadas com oxigênio percebe-se um aumento do PCI. Os incrementos de CO_2 e CO podem ser explicados pelo deslocamento da reação água-gás e as reações de reforma a vapor, equações 3 e 4 da Tabela 3.

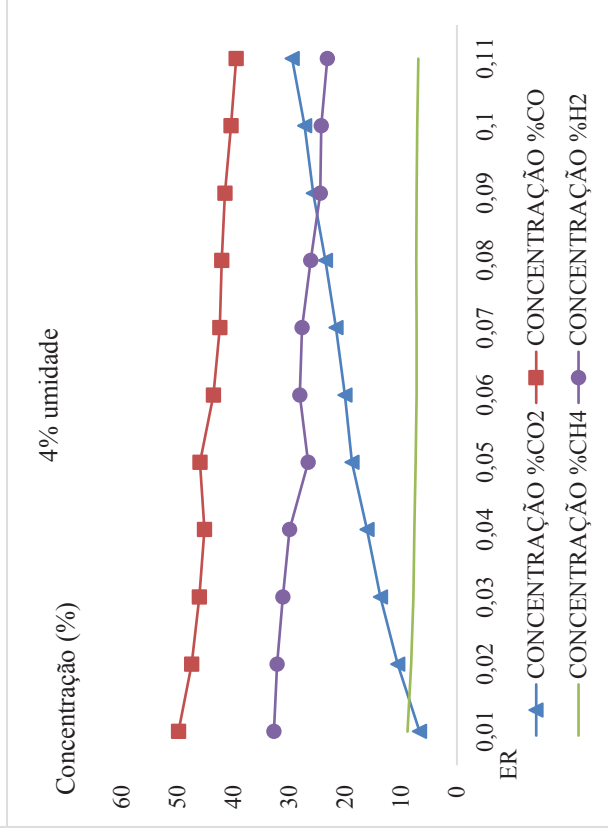
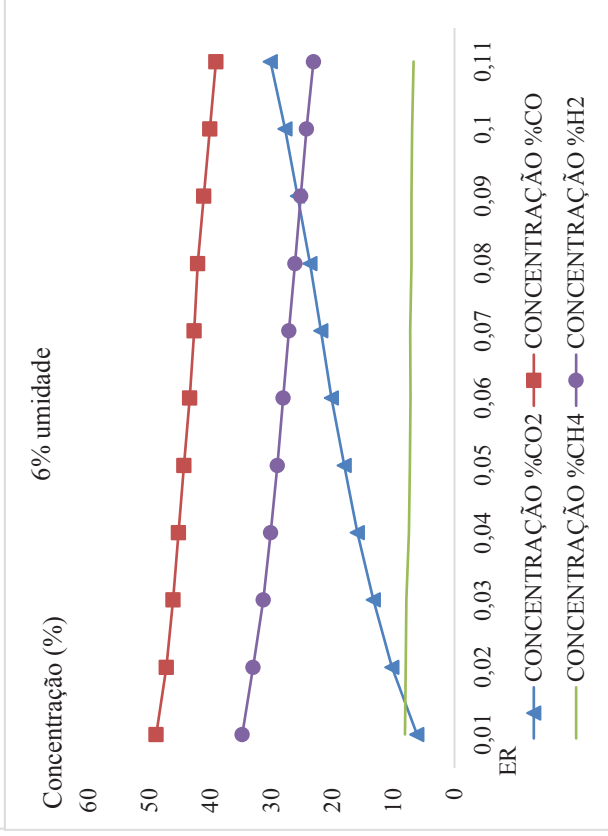
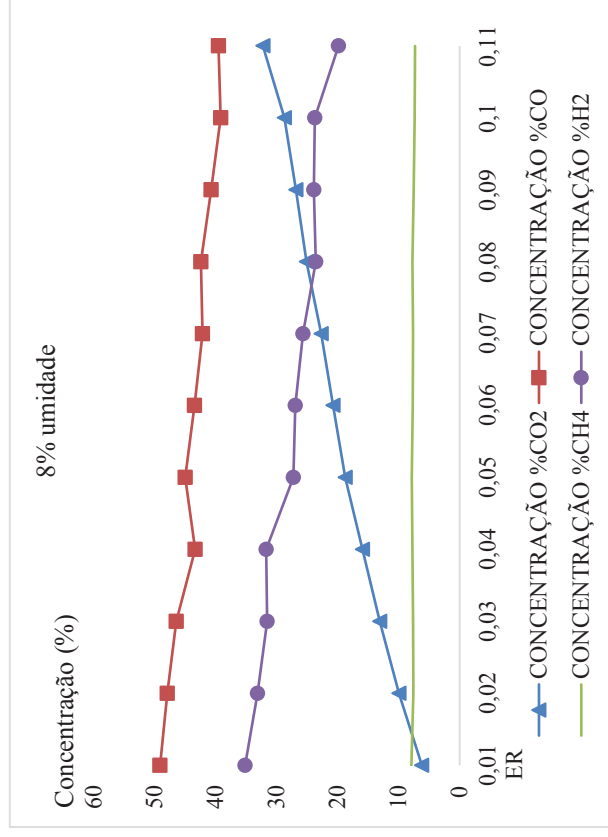
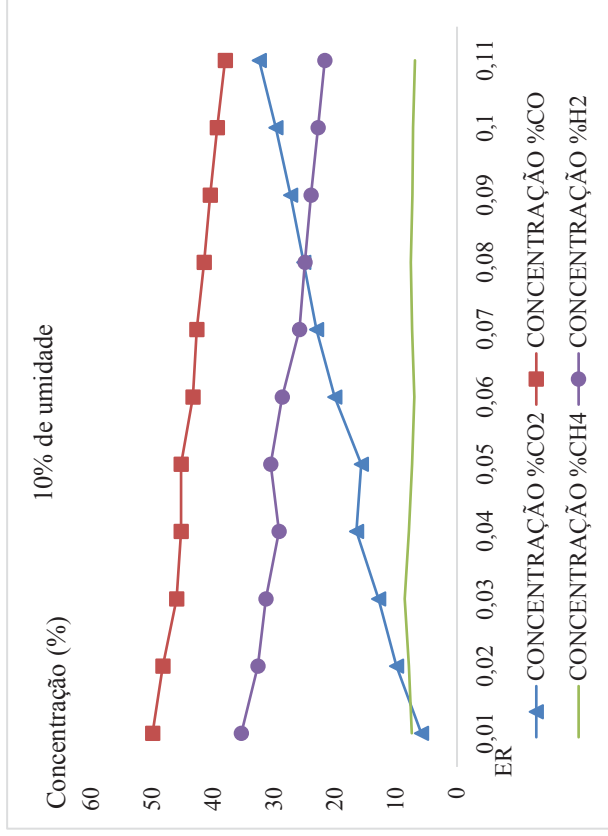


Figura 9 - Variação das concentrações de CO, CO₂, H₂ e CH₄ em base molar para ER variando de 0 a 0,11, umidade da biomassa de eucalipto de 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de oxigênio.

4.3 Variação de parâmetros no modelo para biomassa de capim elefante

4.3.1 Respostas do modelo utilizando ar como agente gaseificador

Os gases analisados foram CO_2 , CO , CH_4 e H_2 , como é relatado amplamente na literatura especializada. A razão de equivalência utilizada para a simulação do processo com biomassa de capim elefante foi de 0 a 0,1. Adotou-se valores padronizados de umidade em torno de 10, 8, 6 e 4%. A biomassa de capim elefante *in natura* possui elevadíssimos índices de umidade, acima dos 60%, o que as tornaria inviáveis para diversas rotas energéticas. Logo, é necessário propor rotas que coloquem a biomassa com baixos índices de umidade. Com a umidade em torno de 10% e os elevados índices de lignina e celulose (fatores que são positivos em processos termoquímicos), percebe-se de maneira geral um PCI do gás gerado bem próximo aos valores encontrados para a biomassa de eucalipto. Para otimizar o processo testou-se duas possibilidades de alimentação, com ar e com oxigênio para diferentes razões de equivalência.

Para a alimentação do processo com ar, encontrou-se maiores valores de PCI com razões de equivalência inferiores a 0,05. Os valores, PCI sofrem variações com a mudança da umidade da biomassa. A Figura 10 apresenta a variação do PCI para diferentes ER e umidade da biomassa. O PCI apresentou maiores valores para a biomassa de eucalipto, de 3,54 a 3,25 $MJ kg^{-1}$ com a umidade variando de 10 a 4% com ER de 0,01. O PCI do gás gerado com a biomassa de capim elefante apresentou valores entre 2,4 e 1,35 $MJ kg^{-1}$ para umidade de 10%, 2,52 a 1,42 $MJ kg^{-1}$ para umidade de 8%, 2,68 a 1,44 $MJ kg^{-1}$ para umidade de 6% e entre 2,72 e 1,39 para umidade de 4%, em todos os casos o ER variou de 0 a 0,1. Os valores são inferiores aos valores encontrados para a biomassa de eucalipto.

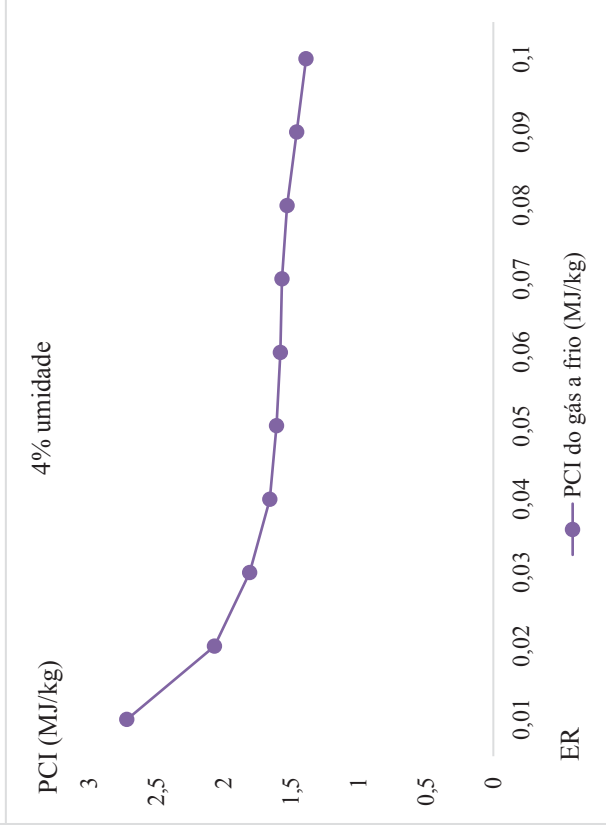
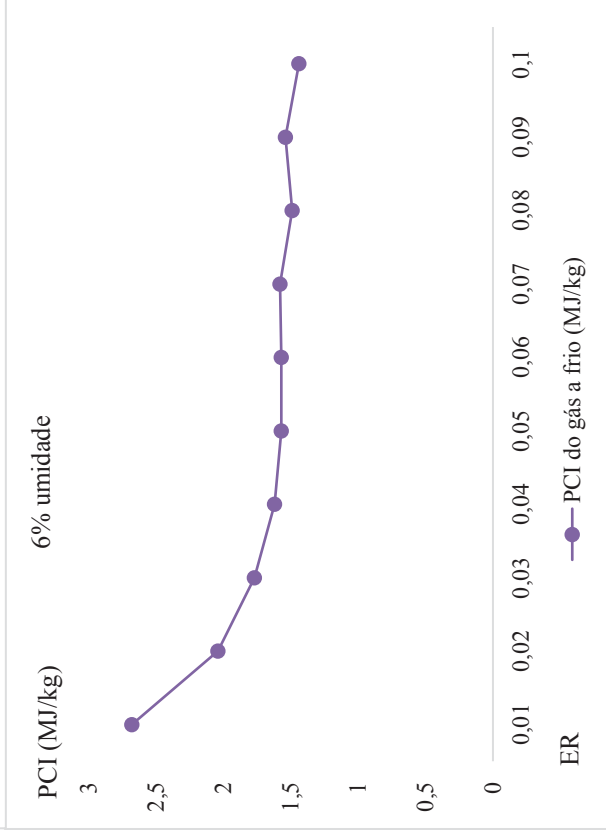
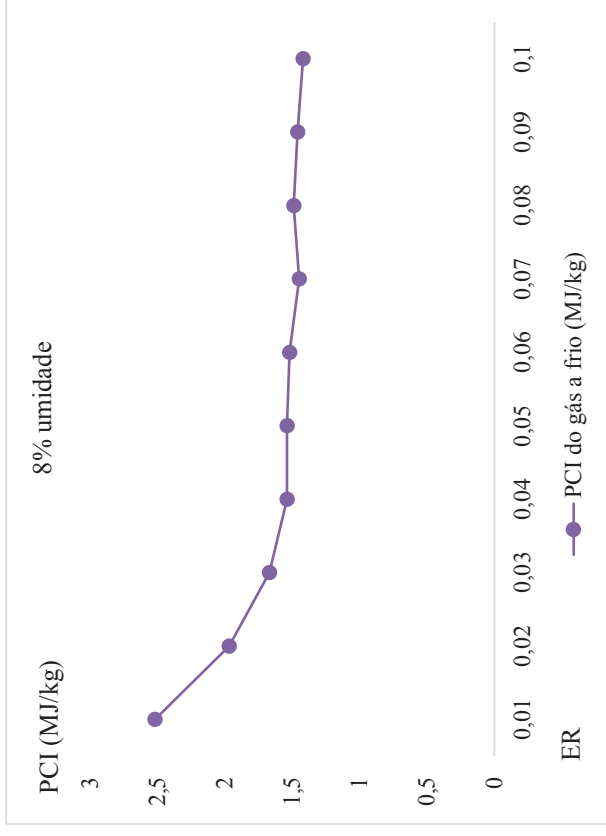
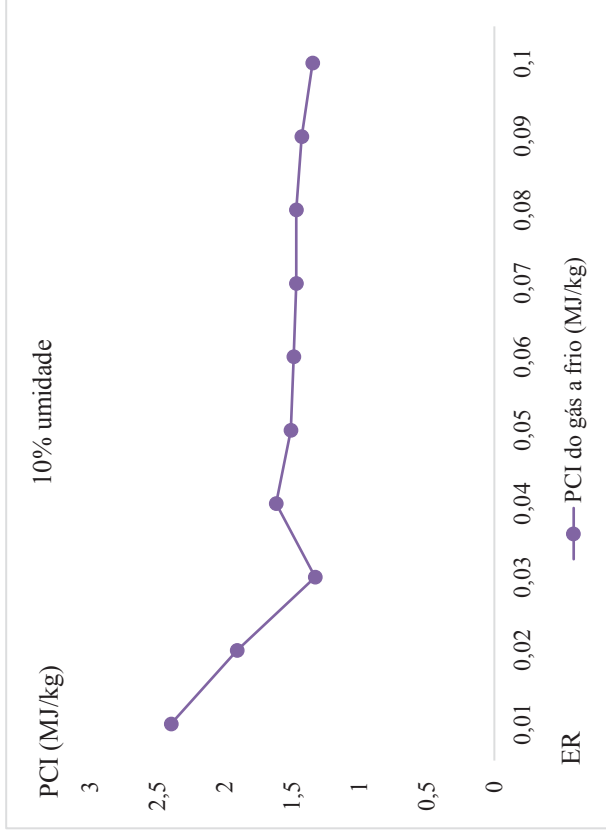


Figura 10- Variação do PCI do gás à frio para ER variando de 0 a 0,10, umidade da biomassa de capim elefante variando em 10%, 8%, 6%, e 4% com injeção de ar

As concentrações dos gases analisados também sofrem variações devido a alteração dos parâmetros. A similaridade com o processo de gaseificação de madeira está no fato das concentrações de CO_2 aumentarem à medida que o ER aumenta, indicando maior ocorrência de combustão e possíveis deslocamentos nas reações de reforma a vapor. A Figura 11 apresenta a variação da concentração dos gases analisados para diferentes configurações reacionais.

Para valores de ER entre 0 e 0,05 percebe-se alta concentração de CO , o que é justificado devido a reação de gaseificação incompleta, que apesar de proporcionar um gás com PCI mais alto produz um volume menor de gás.

As concentrações de CH_4 possuem valores próximos se comparados com a biomassa de eucalipto, porém, para o capim elefante se mostraram mais sensíveis à variação da razão de equivalência, apresentando no melhor caso uma concentração de 6,11% em base molar para uma umidade de 4% com ER de 0,01.

As concentrações de H_2 apresentam também valores próximos para as mesmas condições reacionais quando a biomassa foi o eucalipto. Para uma razão de equivalência de 0,1 e umidade de 4% a concentração do gás foi de 3,78% para o capim elefante e de 4,95% para o eucalipto. A Figura 11 detalha as variações da concentração em função da umidade e da razão de equivalência.

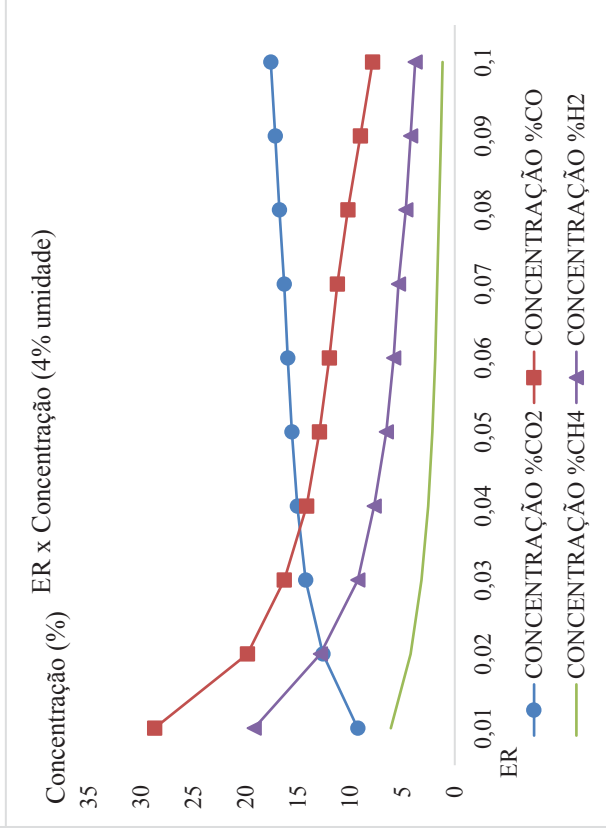
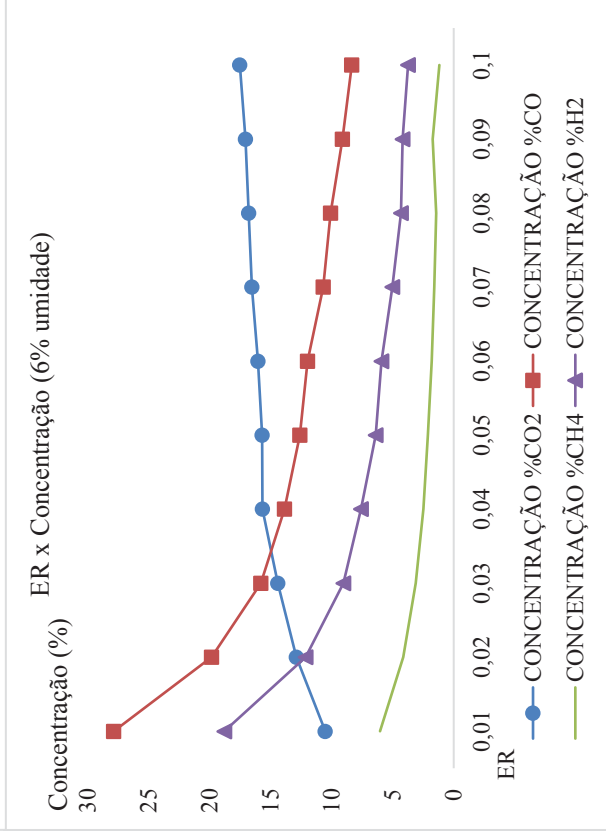
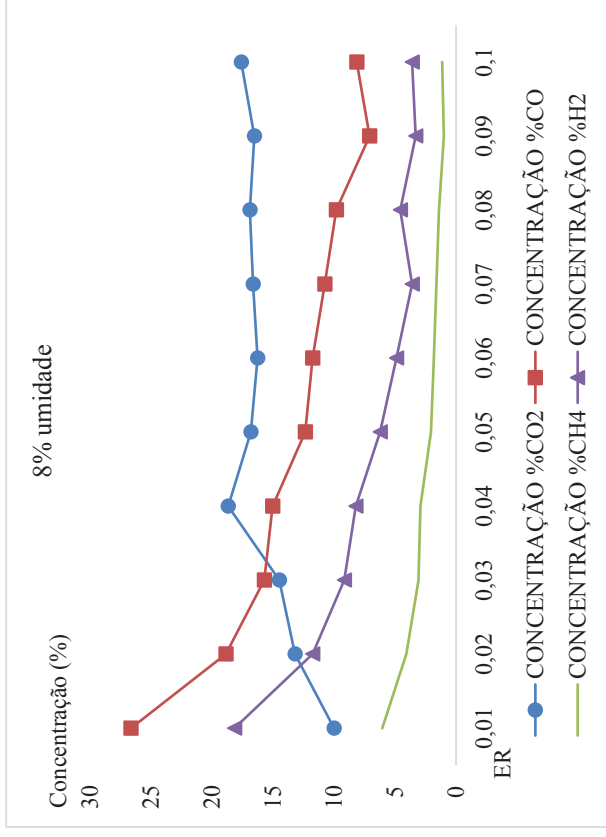
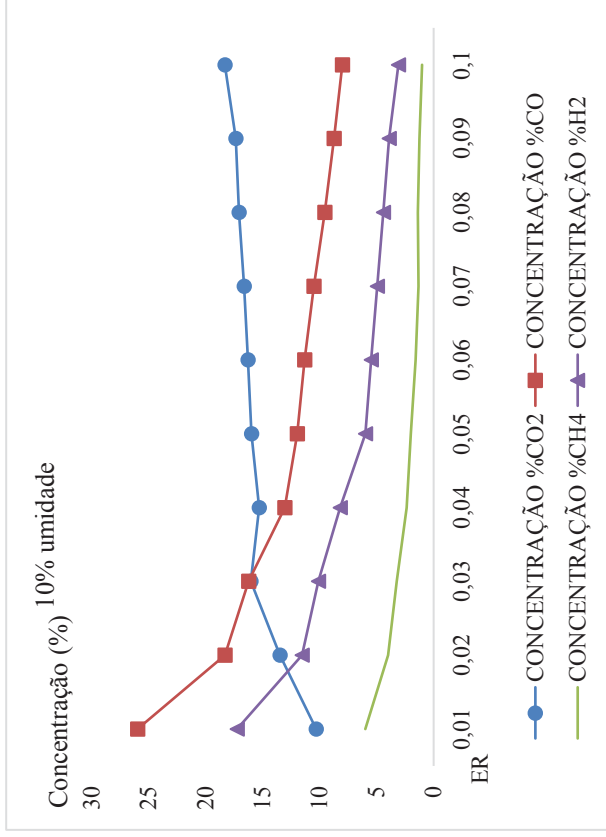


Figura 11 - Variação das concentrações de CO₂, CO₂, H₂ e CH₄ em base molar para ER variando de 0 a 0,11, umidade da biomassa de capim elefante de 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de ar

4.3.2 Respostas do modelo utilizando oxigênio como agente gaseificador

Com a injeção de oxigênio puro, percebeu-se um aumento significativo do PCI, por conta de alguns fatores, entre eles, o aumento da taxa de reação completa de gaseificação e o aumento da concentração de alguns gases no gás de síntese. A Figura 12 apresenta a variação do PCI para as diferentes configurações do modelo.

Para um ER de 0,01 e umidade de 10 a 4%, o PCI variou de 4,13 a 4,73 para um ER de 0,01. À medida que a razão de equivalência aumentou o PCI sofreu alterações. Para um ER de 0,1 e umidade de 10%, 8%, 6% e 4% o PCI apresentou os seguintes valores: 1,35, 1,42, 1,44, 1,39 $MJ\ kg^{-1}$. Esta pequena variação evidencia que a variação da umidade para valores inferiores a 10% não provocou mudanças significativas no modelo.

Percebeu-se significativo aumento nas concentrações de CO_2 à medida que o ER aumentou. As concentrações de H_2 aumentaram muito em relação ao processo feito apenas com ar, para um ER de 0,10 e umidade de 8% tem-se uma concentração de 3,6% para alimentação com ar, e uma concentração de 17,10% para o processo nas mesmas condições com injeção de oxigênio puro, esse aumento se repete para todas as variações testadas. Como mencionado anteriormente, os incrementos podem ser parcialmente justificados pelo aumento da taxa reacional de gaseificação completa, alguns estudos relatam o aumento da temperatura na zona de gaseificação em processos utilizando oxigênio, porém, o estudo da temperatura não foi objetivo deste trabalho.

O CH_4 também apresentou um aumento se comparado ao processo que foi alimentado apenas com ar. Para uma umidade de 10% do capim elefante e uma razão de equivalência de 0,05 a concentração de metano foi de 2,00% na alimentação com ar, já o processo alimentado com oxigênio apresentou concentração de 5,28%. As Figura 12 e 13 apresentam as variações

de PCI e concentração dos gases à medida que os parâmetros foram variados. O maior PCI foi de $5,39 \text{ MJ kg}^{-1}$ encontrado quando a biomassa apresentou 6% de umidade e ER de 0,05.

Para os arranjos testados no modelo proposto por este trabalho percebeu-se que o agente escolhido para o processo de gaseificação exerce forte influência na concentração do gás gerado e na composição do mesmo. O agente escolhido proporciona maior ou menor taxa de reação completa da gaseificação, parâmetro que pode ser medido através da concentração de algumas espécies, como CO_2 e CO . A utilização de oxigênio mostrou resultados interessantes neste estudo, porém, para a aplicabilidade de processos alimentados com este gás estudos sobre a viabilidade técnica e econômica devem ser realizados.

A razão de equivalência também exerce influência interessante no processo. As biomassas testadas no estudo mostraram que com o aumento de ER o PCI diminui para alimentação com ar e aumentava para alimentação com oxigênio. A razão de equivalência também influencia na geração de alcatrão e particulado pelo processo, variáveis que não foram mensuradas neste estudo, mas que impactam negativamente o processo.

A umidade da biomassa para valores inferiores a 10% não afetou de maneira significativa as respostas, o que indica não ser interessante concentrar esforços no pré-tratamento de biomassa para atingir índices baixos de umidade.

Biomassa de eucalipto apresentou respostas mais interessantes que a biomassa de capim elefante com maior PCI, maior concentração dos gases de interesse (CO , CO_2 e H_2) e maior volume de gás produzido. As melhores respostas para o processo, independentemente da biomassa utilizada foram observadas utilizando oxigênio como agente gaseificador e razões de equivalência inferiores a 0,1.

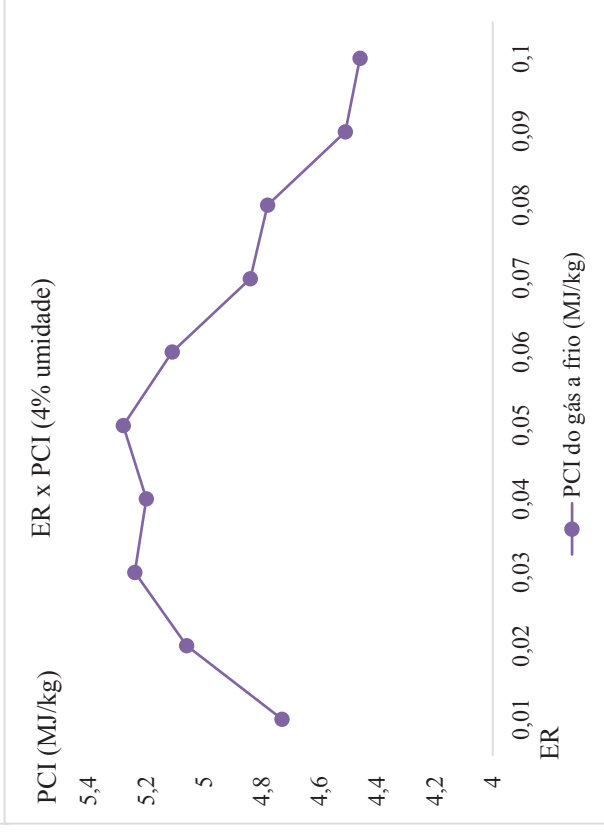
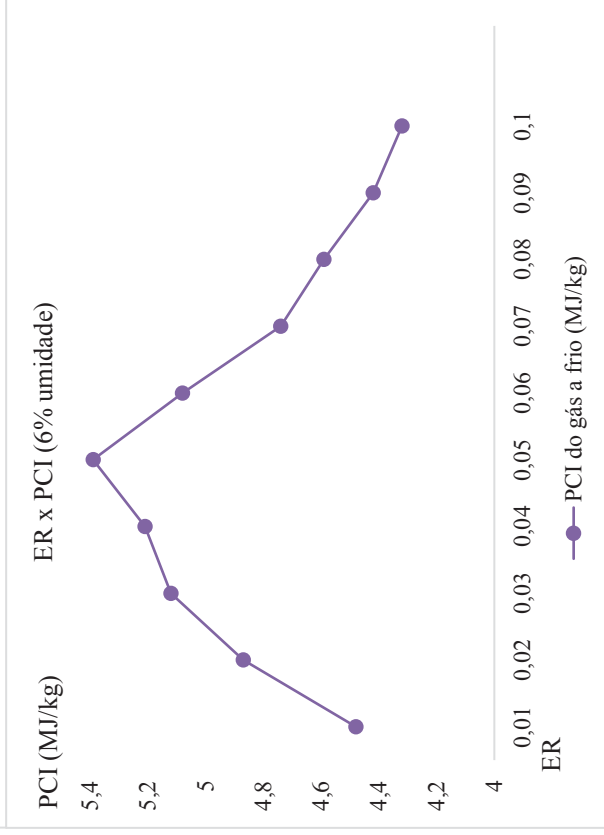
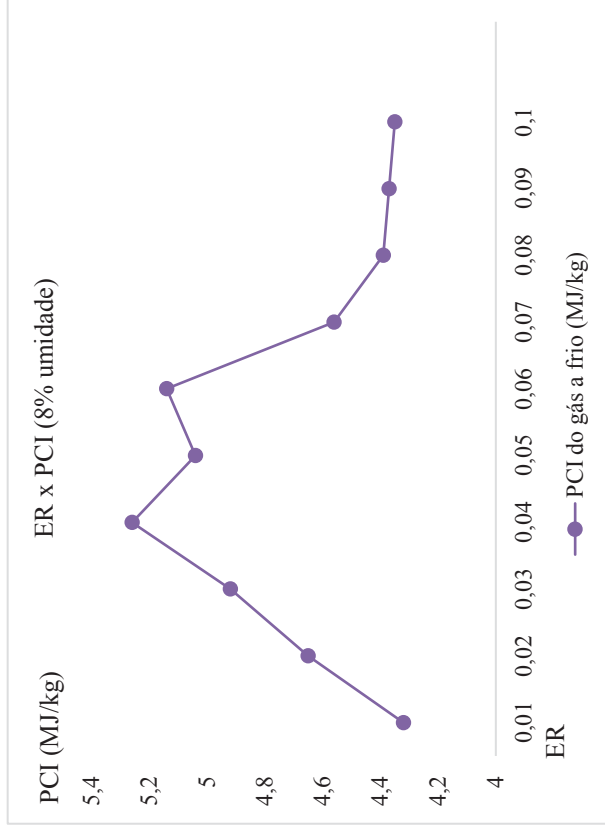
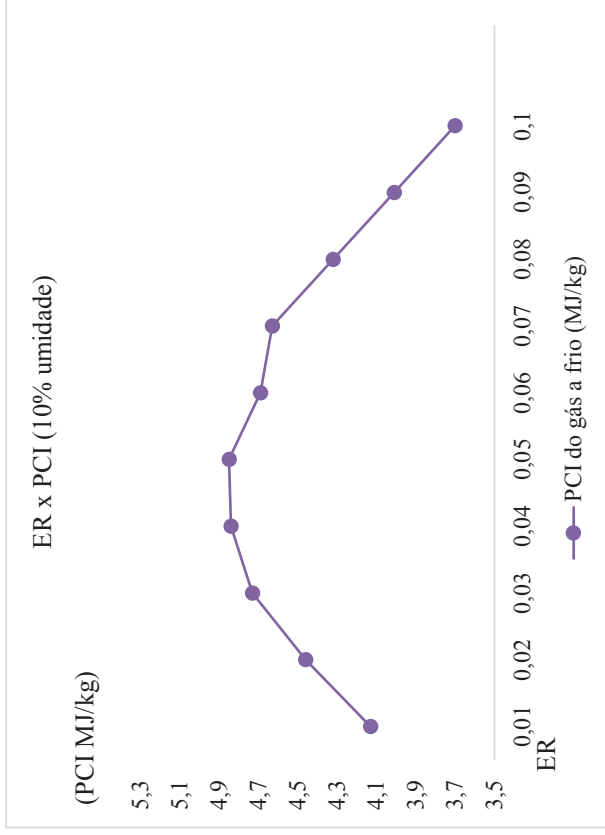


Figura 12 - Variação do PCI do gás à frio para ER variando de 0 a 0,10, umidade da biomassa de capim elefante variando em 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de oxigênio

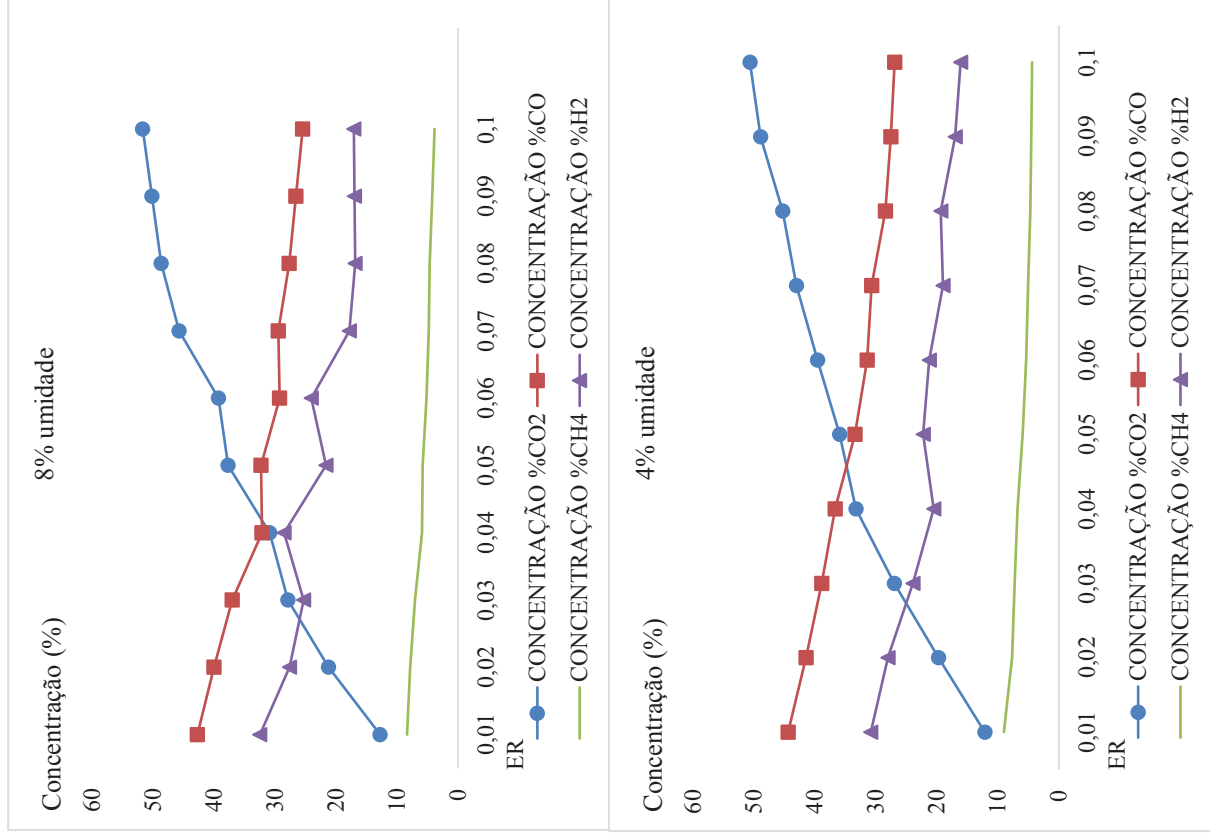
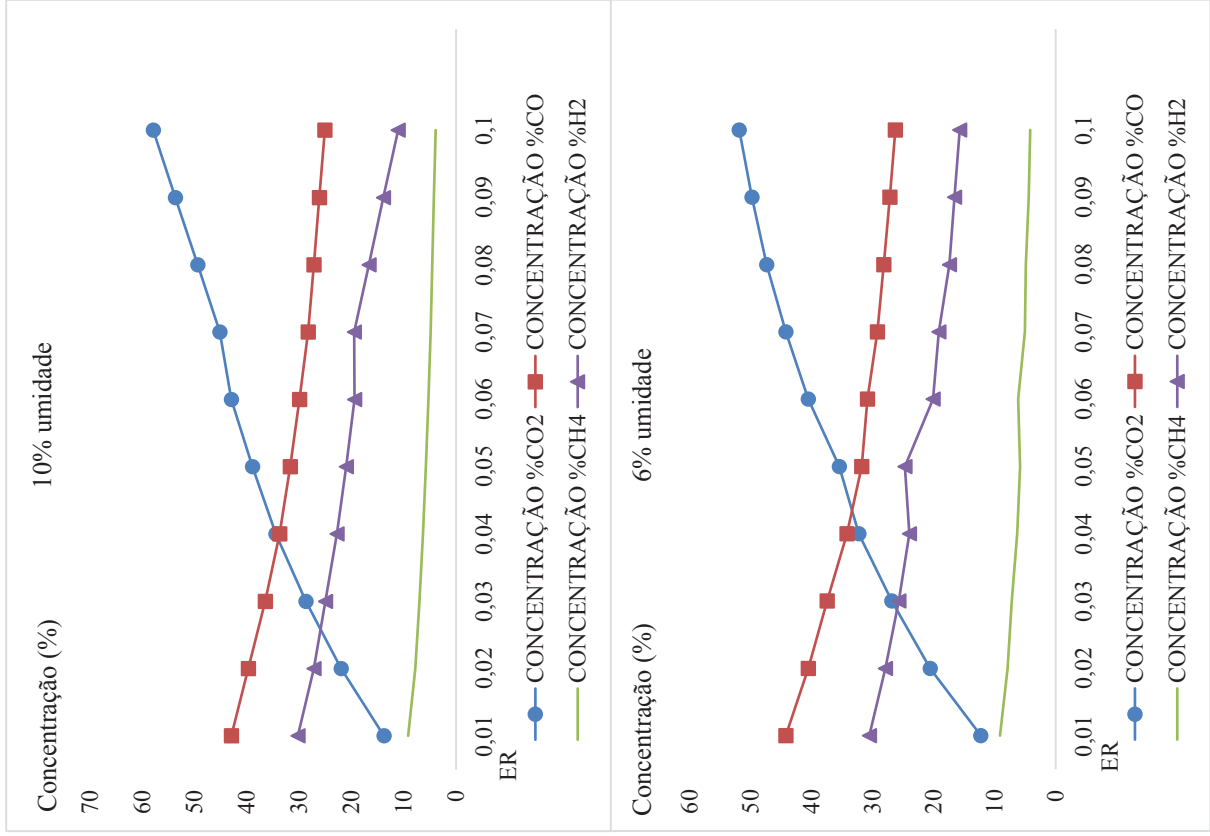


Figura 13 - Variação das concentrações de CO_2 , H_2 e CH_4 , em base molar para ER variando de 0 a 0,11, umidade da biomassa de capim elefante de 10%, 8%, 6% e 4% com injeção de oxigênio

4.4 Potencial energético teórico e alocação das usinas de geração

A Tabela 7 traz os melhores resultados obtidos para o Eucalipto e para o capim elefante. Escolheu-se uma configuração onde o PCI do gás era alto e seu volume de produção também era alto, essa condição foi atendida para o eucalipto como combustível a uma umidade de 6% e injeção de oxigênio no reator. A produção foi de $2,34 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ com um fluxo de alimentação de 1 kg h^{-1} e o PCI do gás de $8,08 \text{ MJ kg}^{-1}$ enquanto que para o capim elefante a produção foi de $1,10 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ com um fluxo de alimentação de 1 kg h^{-1} e PCI de $4,35 \text{ MJ kg}^{-1}$

Tabela 7 – Melhores resultados para gaseificação de biomassa lignocelulósica

Biomassa	ER	Umidade da biomassa (%)	PCI (MJ kg^{-1})	CO (%)	CO ₂ (%)	H ₂ (%)	CH ₄ (%)
Eucalipto	0,11	6%	8,08	39,11	30,17	23,12	6,71
Capim Elefante	0,10	8%	4,35	25,47	51,70	17,10	3,85

O estudo levou em consideração o resíduo gerado pelas três formas de extração que são encontradas para este tipo de biomassa, a produção de lenha, tora para indústria de papel e celulose e madeira para processamento. A biomassa extraída para uso como lenha e para a indústria de papel e celulose considerou-se que o resíduo gerado é apenas o resíduo deixado na floresta no ato da colheita, em torno de 20% (galhos e árvores finas, folhas, entre outros), e para a madeira de processamento foi considerado uma geração de 50% de resíduo (cavaco, serragem, aparas, casca), ambos os termos com base no volume de madeira extraída.

O estado de Minas Gerais se destacou como o maior produtor de eucalipto no Brasil no ano de 2019. O estado possui 853 municípios, destes, 593 apresentaram potencial para utilização no estudo. A madeira de eucalipto se divide em 3 possíveis aplicações: utilização

como lenha, na indústria de papel e celulose e para processamento (serrarias) (HENRIQUES et al., 2009). Levou-se em consideração a produção de madeira em todo o estado de Minas Gerais com o uso da base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, (IBGE, 2019). Municípios que não apresentaram nenhuma produção foram excluídos da análise.

O estado de Minas Gerais possuiu um volume anual de produção de resíduo de mais de 5 milhões de m^3 de biomassa no ano de 2019. Aplicando a metodologia proposta pelo trabalho é possível encontrar um potencial energético de $3.488,65 \text{ GWh ano}^{-1}$. O potencial foi estimado com base em usinas de potência instalada inferiores a 5 MW, funcionando 300 dias por ano, 10 horas por dia e com uma eficiência combinada de 28%. Ao todo foram alocadas 91 usinas no estado. A Figura 14 apresenta a distribuição das unidades geradoras, os pontos de mesma coloração apresentam a união de municípios para se atingir a potência estipulada entre 4,5 e 5MW.

Segundo dados da ANEEL (2019) os consumidores cativos do estado de Minas Gerais consumiram no ano de 2019 27.362 GWh de energia elétrica, logo, a geração de energia com resíduos da cadeia produtiva de eucalipto seria capaz de sustentar pouco mais de 12% deste consumo. É possível ver uma concentração maior das unidades geradoras nas regiões Sul, Sudeste, Oeste, Zona da Mata e Campo das Vertentes, regiões que fazem fronteira com os estados de São Paulo e Rio de Janeiro. As regiões possuem a maior concentração industrial, o que demanda o uso deste tipo da biomassa para utilização em processos produtivos.

Um fato relevante é que a grande maioria dos municípios do estado de Minas Gerais são pequenos e se concentram em sua extensa zona rural. Os indicadores de descontinuidade e falha de fornecimento de energia elétrica das concessionárias de energia, apresentam maiores eventos em zonas rurais do que em zonas urbanas, logo, a energia elétrica gerada pelo sistema proposto poderia proporcionar um aumento da segurança energética para essa parcela de municípios, que em sua maioria também possuem as maiores produções de biomassa.

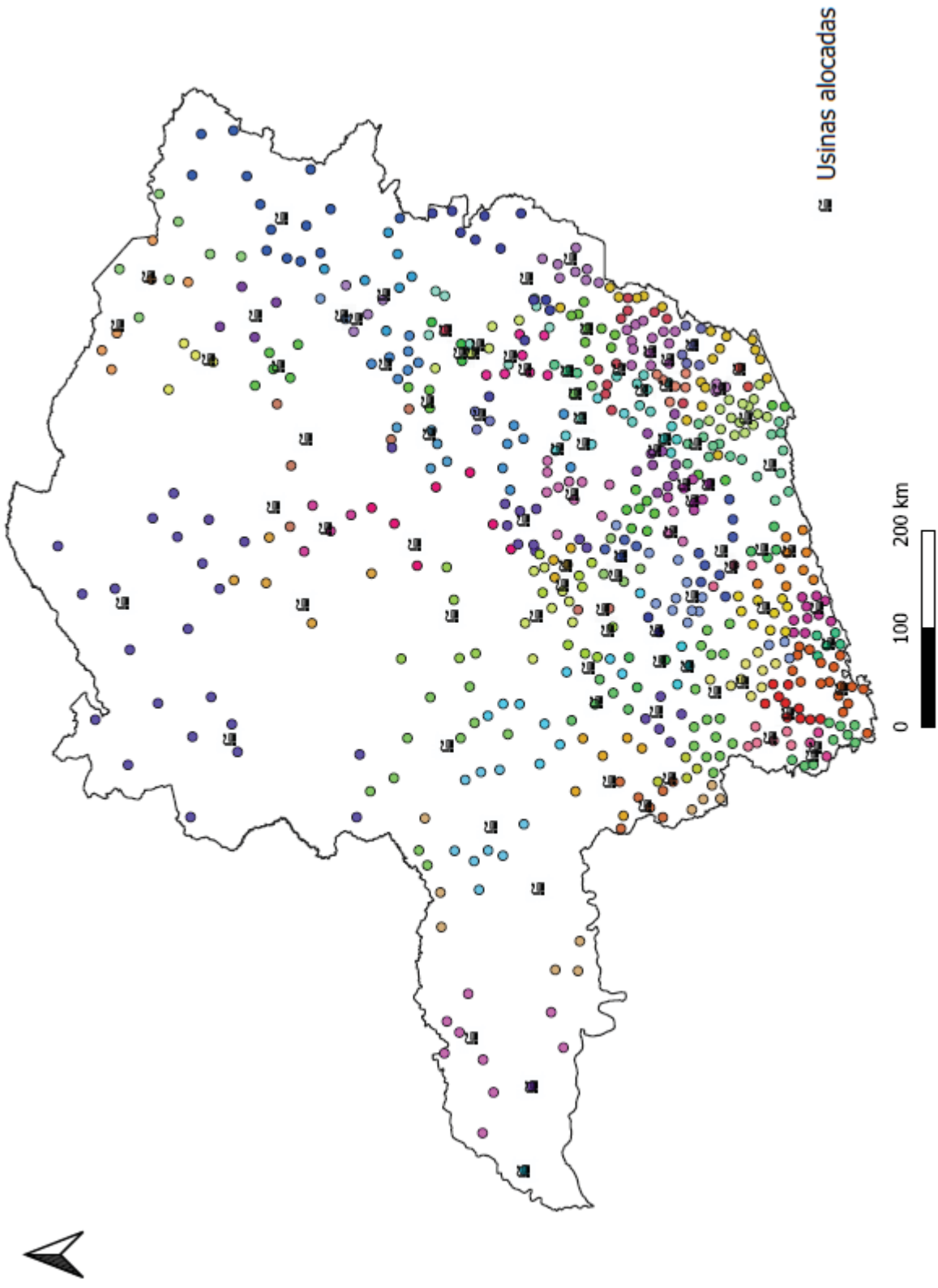


Figura 14 – Usinas de geração de energia elétrica movidas a gaseificação de biomassa

5 CONCLUSÃO

O modelo virtual criado, apresentou resultados concordantes com o experimento prático reportado por RESENDE (2016). No processo de simulação, percebeu-se que o aumento da ER resultou na diminuição do PCI quando o reator era alimentado com ar, diferente da alimentação com oxigênio onde o aumento da ER gerou maior PCI e promoveu aumento na concentração dos gases H_2 e CH_4 no gás de síntese.

A variação da umidade da biomassa, provocou pequenas variações no gás de saída, o que indica que valores inferiores a 10% de umidade não são capazes de provocar grandes alterações no gás de síntese. Alimentando o sistema com biomassa de eucalipto, por exemplo, a uma umidade de 10% e uma ER de 0,11 o PCI foi de $7,76 MJ kg^{-1}$, enquanto que para uma umidade de 4% e uma mesma ER o PCI foi de $8,14 MJ kg^{-1}$. O cenário se repete quando a biomassa alimentada é o capim elefante.

Os valores de umidade utilizado neste estudo foram inferiores a 10%, difíceis de serem encontrados na biomassa in natura, mesmo após secagem simples. Umidades inferiores a 6% são relatadas em matérias carbonizados o que demandaria um pré-tratamento da biomassa antes da gaseificação. Necessário também aprofundar o estudo quanto a alimentação do processo com oxigênio.

Do ponto de vista da produtividade, o capim elefante pode ser muito mais produtivo do que outras fontes comuns de biomassa e se credencia como potencial substituto de biomassas tradicionais, como o Eucalipto. Para as configurações aplicadas neste estudo, o eucalipto se mostrou um pouco mais interessante para geração de gás de síntese e posterior uso em motores adaptados, pois apresentou maior volume de gás produzido com maior PCI. Independente da biomassa escolhida, dois fatores são fundamentais para que o processo tenha respostas mais

otimizadas: escolha do agente de gaseificação e monitoramento da razão de equivalência, estes dois parâmetros são essenciais para o processo.

O modelo proposto para geração de energia mostra o grande potencial do resíduo da cadeia produtiva de eucalipto no estado de Minas Gerais. O uso destes resíduos para geração de energia pode representar pouco mais de 10% de toda energia consumida no estado anualmente, além disso, contribui para a diversificação da matriz elétrica. Porém, processos de gaseificação são complexos de serem controlados e os dados aqui levantados necessitam de estudos mais aprofundados com relação a aspectos técnicos e econômicos de implantação de usinas de geração de energia elétrica movidas a gaseificação.

Além da rota de geração de energia, outras rotas podem ser estudadas para utilização do gás de síntese gerado, como processos de síntese química e geração de calor.

5.1 Contribuições do trabalho

As principais contribuições do trabalho consistiram na criação de um modelo virtual validado através de dados práticos, na comparação dos resultados da gaseificação para dois tipos de biomassa em condições especificadas, na variação de parâmetros importantes para a reação encontrando rotas para uma possível otimização do processo, proposição de possível aplicação desta rota de transformação para recuperação energética de resíduos de eucalipto da cadeia produtiva do estado de Minas Gerais, o maior produtor desta espécie no Brasil, de maneira otimizada.

REFERÊNCIAS

- ABDOLI, S.; PAMULAPATI, M.; KARA, S. An investigation into the role of PV industry in meeting the growing energy demand towards absolute sustainability. v. 90, p. 383–387, 2020.
- ADENIYI, A. G.; IGHALO, J. O.; ONIFADE, D. V. Production of biochar from elephant grass (*Pennisetum purpureum*) using an updraft biomass gasifier with retort heating. **Biofuels**, v. 0, n. 0, p. 1–8, 2019.
- ANEEL, (NATIONAL ELECTRIC ENERGY AGENCY). **Normative Resolution nº 482, of April 17, 2012**, 2012.
- AYDIN, E. S.; YUCEL, O.; SADIKOGLU, H. Numerical and experimental investigation of hydrogen-rich syngas production via biomass gasification. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 2, p. 1105–1115, 2018.
- BENINCA, W. DE A. Estudo da Influência do Nível de Pressão em Unidade de Geração Termelétrica Baseada em Gaseificação de Biomassa. 2016.
- BHATTACHARYA, S. C.; MIZANUR RAHMAN SIDDIQUE, A. H. M.; PHAM, H. L. A study on wood gasification for low-tar gas production. **Energy**, v. 24, n. 4, p. 285–296, 1999.
- BRIDGWATER, A. V. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. **Fuel**, v. 74, n. 5, p. 631–653, 1995.
- BRYNDA, J. et al. Wood chips gasification in a fixed-bed multi-stage gasifier for decentralized high-efficiency CHP and biochar production : Long-term commercial operation. **Fuel**, v. 281, n. July, p. 118637, 2020.
- CADAVEZ, C. C.; DE SOUZA-SANTOS, M. L. Efficiency of a power generation alternative regarding the composition of feeding biomass-glycerol slurry; theoretical assessment. **Energy**, v. 214, p. 118967, 2021.
- CARDOSO, M. T. **DA ILUMINAÇÃO DAS CIDADES NO SÉCULO XIX ÀS BIORREFINARIAS MODERNAS: HISTÓRIA TÉCNICA E ECONÔMICA DA GASEIFICAÇÃO**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2014.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2013.
- CERIBELI, K. B.; SOUZA-SANTOS, M. L. DE. Effect of dry-solid content level in feeding slurry of municipal solid waste consumed by FSIG / GT power generation process ; a theoretical study. **Fuel**, v. 254, n. April, p. 115727, 2019.
- CORTEZ, L. A. B. ;GOME. E. O. . L. E. E. S. **Biomassa Para Energia**. 1. ed. [s.l: s.n.].
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. 1. ed. Campinas: Editora UNICAMP, 2008.
- DAHER, R. F. et al. Use of elephant grass for energy production in Campos dos Goytacazes-

- RJ, Brazil. **Genetics and Molecular Research**, v. 13, n. 4, p. 10898–10908, 2014.
- DE OLIVEIRA, J. L. et al. Characterization and mapping of waste from coffee and eucalyptus production in Brazil for thermochemical conversion of energy via gasification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 52–58, 2013.
- DE OLIVEIRA, J. L. et al. Gasification of waste from coffee and eucalyptus production as an alternative source of bioenergy in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 27, n. May 2017, p. 159–166, 2018.
- DE SOUZA-SANTOS, M. L. **Solid Fuels Combustion and Gasification**. [s.l.] CRC Press, 2010.
- DÍAZ GONZÁLEZ, C. A.; PACHECO SANDOVAL, L. Sustainability aspects of biomass gasification systems for small power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, n. July, 2020.
- DIMPL, E. Small-scale Electricity Generation from Biomass Part I - Biomass Gasification. **Biomass Gasification**, 2011.
- DYAKOV, I. V. et al. EXPERIMENTAL MEASUREMENTS AND MODELING USING CESFAMB™ SOFTWARE OF THE PRODUCT GAS COMPONENTS ON THE 2MW_{TH} GASIFIER PLANT. **Energy Research Journal**, v. 5, n. 1, p. 26–32, 2014.
- ENGELBRECHT, A. D. et al. **Fluidized-bed gasification of high-ash South African coals : An experimental and modelling study**. Johannesburg, South Africa: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.saimm.co.za/Conferences/IFSA2011/145-Engelbrecht.pdf>>.
- EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica, 2017, ano base 2016: capacidade instalada por região e UF no Brasil em 2016 (MW). **Empresa De Pesquisa Energética**, p. 230, 2017.
- EPE. **Balço Energético Nacional**. 1. ed. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2019a.
- EPE. **Anuário Estatístico de Energia de 2019 - ano base 2018**. 1. ed. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2019b.
- FERREIRA, L. R. A. et al. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, n. April 2017, p. 440–455, out. 2018.
- FERREIRA, S. D. et al. Steam gasification of biochar derived from elephant grass pyrolysis in a screw reactor. **Energy Conversion and Management**, v. 153, n. September, p. 163–174, 2017.
- FLORES, R. A. **Produção de Capim Elefante (Pennisetum purpureum Schum.) para Fins Energéticos no Cerrado: Resposta a Adubação Nitrogenada e Idade de Corte**. [s.l.] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2009.
- FONTOURA, C. F.; BRANDÃO, L. E.; GOMES, L. L. Elephant grass biorefineries: Towards a cleaner Brazilian energy matrix? **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 85–93, 2015.

FREITAS, F. F. et al. **The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019.

GALINDO, A. L. et al. Biomass gasification in a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of operating conditions on gas quality. *Biomass and Bioenergy*, v. 61, p. 236–244, fev. 2014.

GUPTA, S. et al. Large eddy simulation of biomass gasification in a bubbling fluidized bed based on the multiphase particle-in-cell method. *Renewable Energy*, v. 163, p. 1455–1466, jan. 2021.

HENRIQUES, R. M. et al. **POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL COM RESÍDUOS DE BIOMASSA ATRAVÉS DA GASEIFICAÇÃO**, 2009.

HOFFERT, M. I. et al. Advanced Technology Paths to Global Climate Stability : Energy for a Greenhouse Planet. v. 981, n. 2002, 2008.

IBGE. Produção da extração vegetal e da silvicultura 2015. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**, v. 30, p. 48, 2016.

IBGE. a G R O P E C U Á R I O. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.**, v. 7, n. 01036157, p. 1–180, 2017.

IBGE. Produção da extração vegetal e da silvicultura 2019. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**, v. 30, p. 48, 2019.

INDRAWAN, N. et al. Distributed power generation via gasification of biomass and municipal solid waste: A review. *Journal of the Energy Institute*, 2020.

JAHROMI, R. et al. Biomass gasification in a downdraft fixed-bed gasifier: Optimization of operating conditions. *Chemical Engineering Science*, v. 231, p. 116249, fev. 2021.

JANAJREH, I. et al. A review of recent developments and future prospects in gasification systems and their modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. February, p. 110505, 2020.

JAOJARUEK, K. et al. Experimental study of wood downdraft gasification for an improved producer gas quality through an innovative two-stage air and premixed air/gas supply approach. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 7, p. 4834–4840, 2011.

JARUNGTHAMMACHOTE, S.; DUTTA, A. Experimental investigation of a multi-stage air-steam gasification process for hydrogen enriched gas production. *International Journal of Energy Research*, v. 36, n. 3, p. 335–345, 10 mar. 2012.

JAYAH, T. H. et al. Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. *Biomass and Bioenergy*, v. 25, n. 4, p. 459–469, out. 2003.

JUNGINGER, M. et al. Developments in international bioenergy trade. *Biomass and Bioenergy*, v. 32, n. 8, p. 717–729, ago. 2008.

KALLIS, K. X.; SUSINI, G. A. P.; OAKEY, J. E. A comparison between Miscanthus and

bioethanol waste pellets and their performance in a downdraft gasifier. **Applied Energy**, v. 101, p. 333–340, 2013.

KHAN, A. Economic Feasibility of Biomass Gasification for Electricity Generation in Pakistan. v. 15, n. 1, 2015.

KHOSHGOFTAR MANESH, M. H.; REZAZADEH, A.; KABIRI, S. A feasibility study on the potential, economic, and environmental advantages of biogas production from poultry manure in Iran. **Renewable Energy**, 2020.

LENIS, Y. A.; PÉREZ, J. F.; MELGAR, A. Fixed bed gasification of Jacaranda Copaia wood: Effect of packing factor and oxygen enriched air. **Industrial Crops and Products**, v. 84, p. 166–175, 2016.

LIMA, M. A. et al. Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: Reaching the goals of the Paris agreement in Brazil. **Environmental Development**, v. 33, p. 100504, mar. 2020.

LUZ, F. C. **Avaliação Técnico-Econômica de Plantas de Gaseificação do Lixo Urbano para Geração Distribuída de Eletricidade**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2013.

MA, Z. et al. Design and experimental investigation of a 190 kW biomass fixed bed gasification and polygeneration pilot plant using a double air stage downdraft approach. **EGY**, v. 46, n. 1, p. 140–147, 2012.

MANERA, C. et al. CO₂ gasification of elephant grass: Effect of Ni/mayenite catalyst on dry reforming of tar. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, n. October, p. 105829, 2020.

MARAFON, A. C. et al. Potencial Produtivo e Qualidade da Biomassa de Capim-elefante para fins Energéticos. n. Dezembro, 2014.

MARAFON, A. C. et al. Poder Calorífico do Capim- Elefante para a Poder Calorífico do. **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, p. 29, 2016.

MARAFON, A. C. et al. Chemical composition and calorific value of elephant grass varieties and other feedstocks intended for direct combustion. **Grassland Science**, v. 67, n. 3, p. 241–249, 28 jul. 2021.

MARTÍNEZ, J. D.; LORA, E. . Evaluación teórico experimental de un sistema avanzado gasificador de biomasa/motor reciprocante para la geración de eletricidad. **Tecnología Química**, v. XXXI, p. 53–63, 2011.

MARTÍNEZ, J. D. et al. Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 8, p. 3465–3480, ago. 2011.

MOHAMMED, I. Y. et al. Comprehensive characterization of Napier grass as a feedstock for thermochemical conversion. **Energies**, v. 8, n. 5, p. 3403–3417, 2015.

MURARO, W. **AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE MOTOR ICE COM GÁS DE BAIXO PODER CALORÍFICO PROVENIENTE DA GASEIFICAÇÃO DE CASCA DE ARROZ**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2006.

NIU, M. et al. Simulation of a new biomass integrated gasification combined cycle (BIGCC) power generation system using Aspen Plus: Performance analysis and energetic assessment. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 43, p. 22356–22367, 2021.

NIU, Y. et al. Experimental study on steam gasification of pine particles for hydrogen-rich gas. **Journal of the Energy Institute**, n. 7, p. 1–10, 2016.

OLIVEIRA, A. C. L. DE et al. Evaluation and optimization of electricity generation through manure obtained from animal production chains in two Brazilian mesoregions. **Journal of Cleaner Production**, v. 316, n. June, p. 128270, set. 2021a.

OLIVEIRA, A. C. L. DE et al. Modeling for estimating and optimizing the energy potential of animal manure and sewage in small and medium-sized farms. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, n. January, p. 128562, out. 2021b.

PANDEY, B.; PRAJAPATI, Y. K.; SHETH, P. N. Recent progress in thermochemical techniques to produce hydrogen gas from biomass: A state of the art review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 47, p. 25384–25415, out. 2019.

PANG, S. Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals. **Biotechnology Advances**, v. 37, n. 4, p. 589–597, jul. 2019.

PATRA, T. K.; SHETH, P. N. Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 583–593, 2015.

PEREIRA, E. G. et al. Sustainable energy: A review of gasification technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 4753–4762, 2012.

RAMAN, P.; RAM, N. K.; GUPTA, R. A dual fixed downdraft gasifier system to produce cleaner gas for power generation : Design , development and performance analysis. **Energy**, v. 54, p. 302–314, 2013.

REED, T. B. Principles and Technology of Biomass Gasification. In: **Advances in Solar Energy**. Boston, MA: Springer US, 1985. p. 125–174.

REIS, R. J. DOS; REIS, L. S. DOS. **Atlas of Biomass of Minas Gerais**. Belo Horizonte: Rona Gráfica e Editora, 2017.

RESENDE, M. DE O. **SISTEMA AUTOMÁTICO DE ALIMENTAÇÃO DE BIOMASSA EM UM GASEIFICADOR DE FLUXO CONCORRENTE**. Viçosa - Minas Gerais / Brasil: [s.n.].

REZENDE, O. L. T. Uso da Lógica Fuzzy no Controle das Temperaturas de um Conjunto Gaseificador/Combustor de Biomassa. **Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola**, p. 126, 2012.

ROCHA, J. R. DO A. S. DE C. et al. Bioenergetic potential and genetic diversity of elephantgrass via morpho-agronomic and biomass quality traits. **Industrial Crops and Products**, v. 95, p. 485–492, 2017.

SAFARIAN, S.; UNNÞÓRSSON, R.; RICHTER, C. A review of biomass gasification modelling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 110, n. May, p. 378–391, 2019.

- SAID, M. S. M. et al. Prediction and optimisation of syngas production from air gasification of Napier grass via stoichiometric equilibrium model. **Energy Conversion and Management: X**, p. 100057, 2020.
- SAIDUR, R. et al. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2262–2289, 2011.
- SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Campinas: 2010, 2010.
- SANSANIWAL, S. K. et al. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, n. December 2016, p. 363–384, 2017.
- SHAFIE, S. M. et al. A review on electricity generation based on biomass residue in Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 5879–5889, 2012.
- SHAHABUDDIN, M. et al. A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification of biomass and residual wastes. **Bioresource Technology**, v. 312, n. March, p. 123596, 2020.
- SHAHABUDDIN, M.; BHATTACHARYA, S. Process modelling for the production of hydrogen-rich gas from gasification of coal using oxygen, CO₂ and steam reactants. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 47, p. 24051–24059, jul. 2021.
- SILVA OLIVEIRA, É. DA et al. Variation of Morpho-Agronomic and Biomass Quality Traits in Elephant Grass for Energy Purposes According to Nitrogen Levels. **American Journal of Plant Sciences**, v. 06, n. 11, p. 1685–1696, 2015.
- SNF. **SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO FLORESTAL**. 1. ed. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2017.
- SOUZA-SANTOS, M. L. DE. **Comprehensive Simulator of Fluidized and Moving Bed Equipment Prepared by**. [s.l.: s.n.]. v. 40
- SOUZA-SANTOS, M. L. DE. Proposals for power generation based on processes consuming biomass-glycerol slurries. **Energy**, 2016.
- SOUZA-SANTOS, M. L. DE; CERIBELI, K. Technical evaluation of a power generation process consuming municipal solid waste. **Fuel**, v. 108, p. 578–585, 2013.
- SWAAIJ, V. A. N. GASIFICATION - THE PROCESS AND THE TECHNOLOGY. **Resources and Conservation**, v. 7, p. 337–349, 1981.
- USMANI, S. et al. Simulation model of the characteristics of syngas from hardwood biomass for thermally integrated gasification using unisim design tool. **Energy**, v. 211, p. 118658, 2020.
- WANDER, P. R.; ALTAFINI, C. R.; BARRETO, R. M. Assessment of a small sawdust gasification unit. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 5, p. 467–476, 2004.
- WEI, L. et al. Co-gasification of hardwood chips and crude glycerol in a pilot scale downdraft gasifier. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 10, p. 6266–6272, 2011.

YANG, Q. et al. Hybrid life-cycle assessment for energy consumption and greenhouse gas emissions of a typical biomass gasification power plant in China. 2018.

YUCEL, O.; HASTAOGLU, M. A. Kinetic modeling and simulation of throated downdraft gasifier. **Fuel Processing Technology**, v. 144, p. 145–154, 2016.

ZAINAL, Z. A. et al. Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. **Biomass and Bioenergy**, v. 23, n. 4, p. 283–289, 2002.

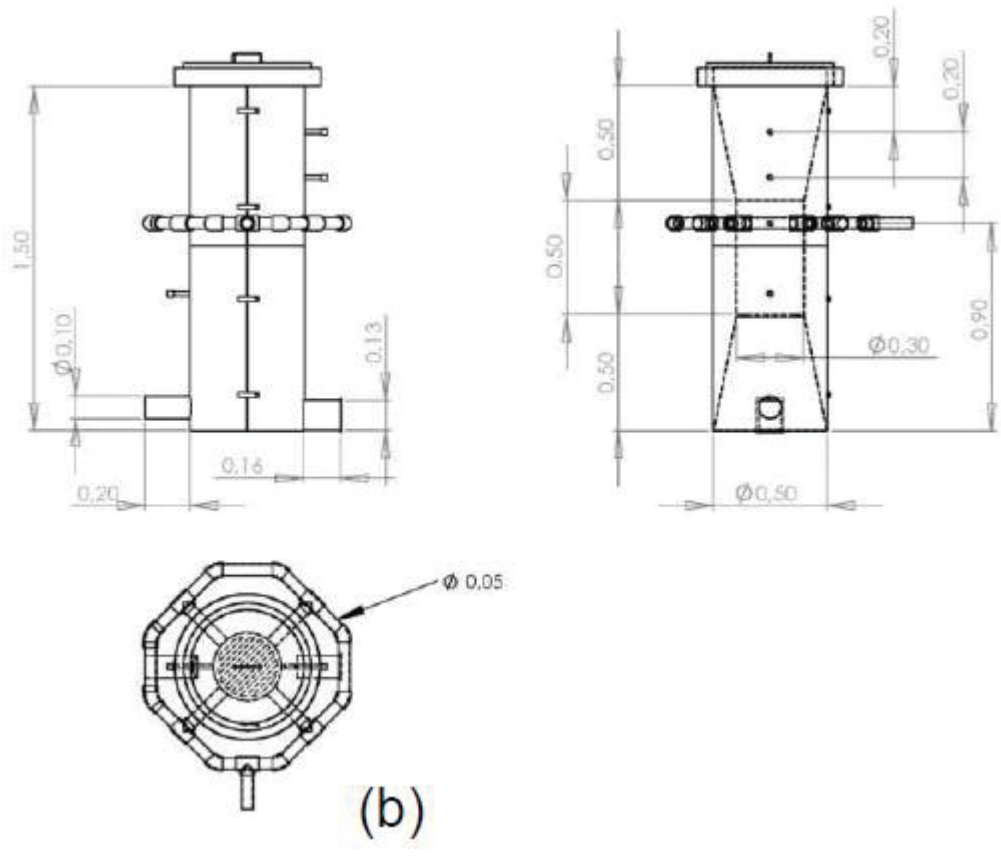
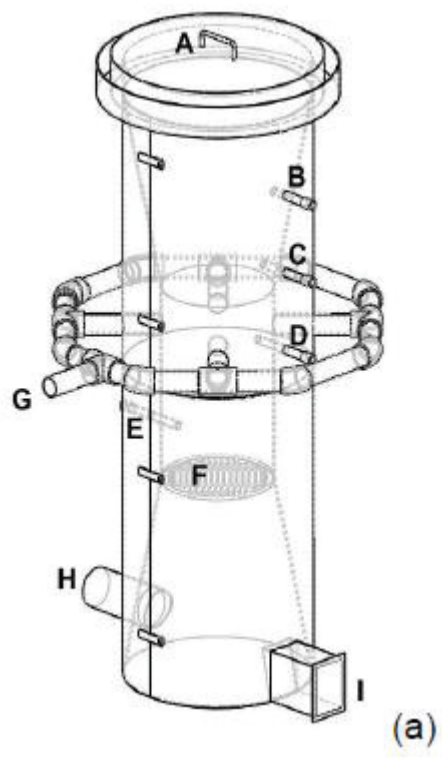
ZANATTA, F. L. Desenvolvimento e avaliação de um gaseificador de biomassa e estudo do potencial de produção de biogás com resíduos agrícolas e da avicultura. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**, p. 98, 2011.

ZENG-HUI, L.; HONG-BO, S. Comments: Main developments and trends of international energy plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 530–534, 2010.

ZHAI, M. et al. Gasification characteristics of sawdust char at a high-temperature steam atmosphere. **Energy**, v. 128, p. 509–518, 2017.

ANEXO A – DETALHES E CONFIGURAÇÕES DO EXPERIMENTO

O gaseificador utilizado nos procedimentos práticos realizados por REZENDE (2012) é classificado como leito fixo e fluxo concorrente, onde o combustível é introduzido pela parte superior do reator. A biomassa entra pela parte superior do reator (Região A) e passa pelas zonas de oxidação (combustão) (Região D) e redução (Região E). A região B é o acesso para o sensor de temperatura medir a temperatura da região de secagem. As regiões C e D são acessos aos sensores de temperatura (termopares) para medição da temperatura nas zonas de pirólise e combustão, respectivamente. O ar primário entra pela região G e é introduzido no reator por 4 entradas dispostas ao redor do gaseificador. A grelha está localizada na região F. O gás é retirado pela saída H e a saída I é usada para remoção de cinzas. A Figura 1 (a) mostra o projeto do gaseificador, e os cortes com as respectivas medidas são mostrados na Figura 1 (b). Basicamente, o gaseificador é a junção de dois troncos cônicos simétricos unidos por uma seção cilíndrica. O reator foi construído em aço inoxidável refratário 310 com espessura de 3 mm. Os tubos para alimentação de ar primário são de aço inoxidável 304 com diâmetro de 50 mm. O reator foi revestido com manta térmica do tipo lã de rocha e com chapa de aço galvanizado com 2 mm de espessura para isolamento térmico. A tampa e a base do gaseificador também foram construídas com aço refratário 310 com 3mm de espessura (REZENDE, 2012).



O Poder Calorífico Superior do combustível foi definido através de bomba calorimétrica (D-2015) de acordo com a NBR 11956. A bomba foi utilizada para medir o calor liberado através da combustão na presença de oxigênio puro. Todas as amostras passaram por peneira de malha 60 e foram queimadas a uma pressão de 3.000 kPa. Para a definição do Poder Calorífico Inferior, foram utilizados métodos analíticos. A Equação 1 demonstra os parâmetros necessários para este fim.

$$PCI = PCS - \frac{2.508 * (U_B + 9 * H_2)}{1 + U_b}$$

Onde:

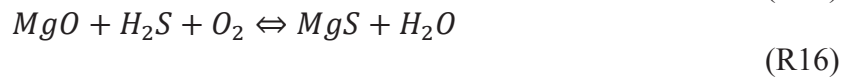
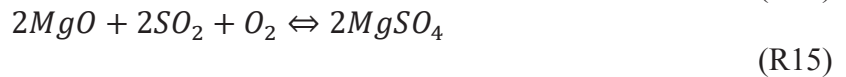
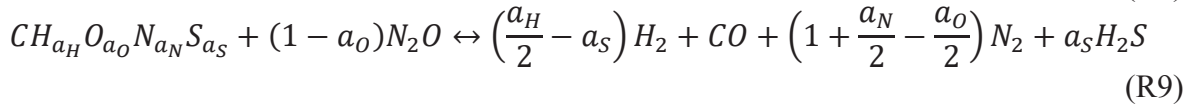
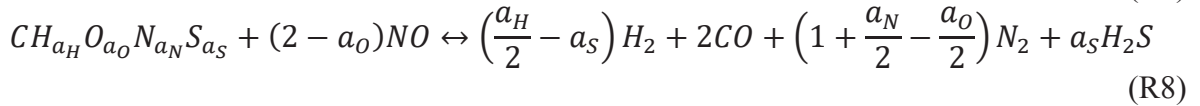
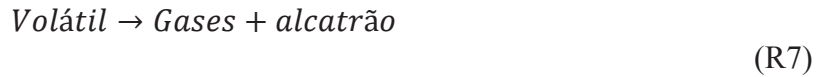
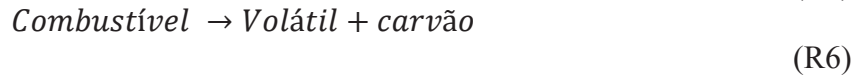
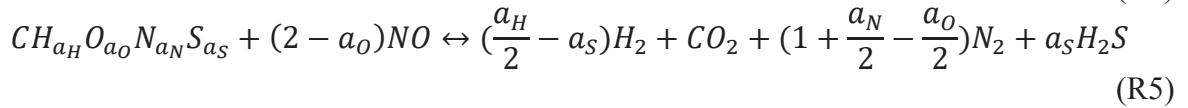
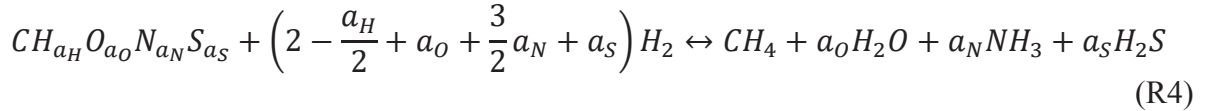
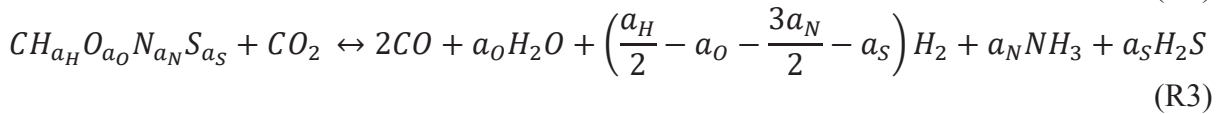
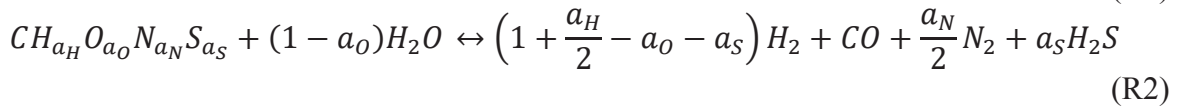
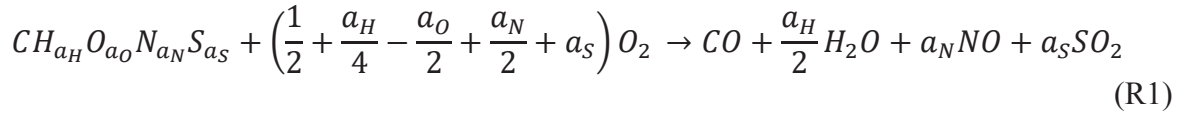
- i) PCS: Poder Calorífico superior ($kJ kg^{-1}$);
- ii) PCI: Poder Calorífico Inferior ($kJ kg^{-1}$);
- iii) U_B : Teor de água da biomassa, em decimal, base seca;
- iv) H_2 : Fração de Hidrogênio no combustível ($kg kg^{-1}$);
- v) 2.508: Entalpia de Vaporização da água ($kJ kg^{-1}$).

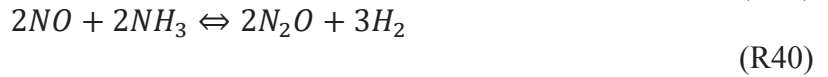
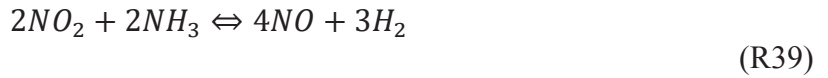
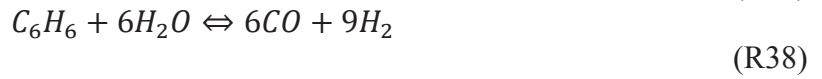
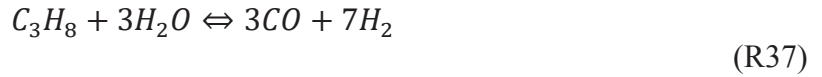
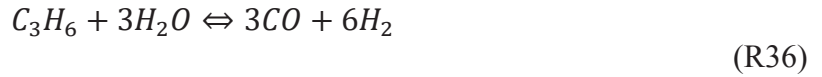
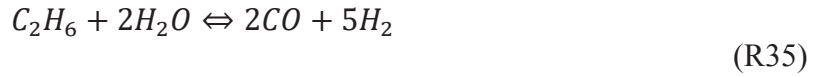
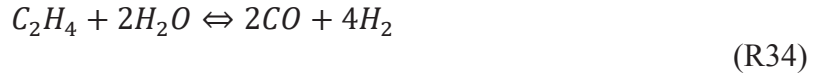
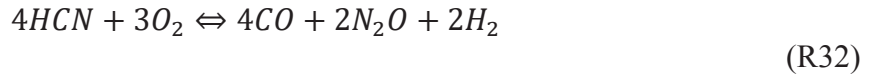
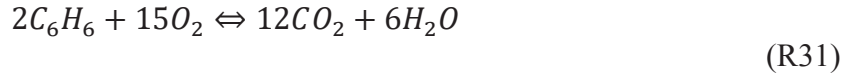
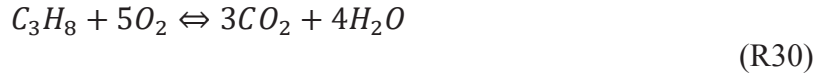
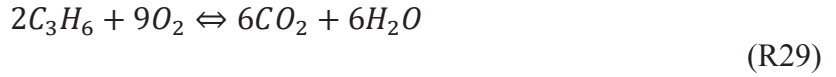
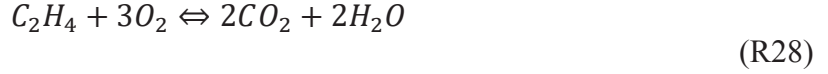
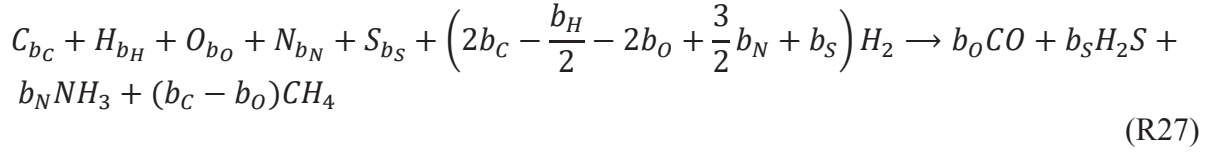
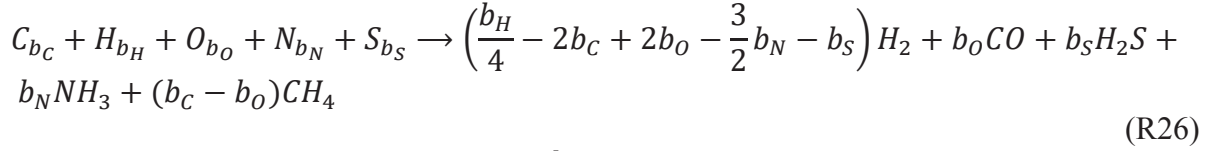
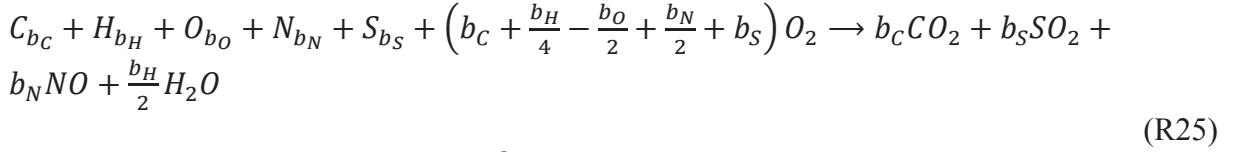
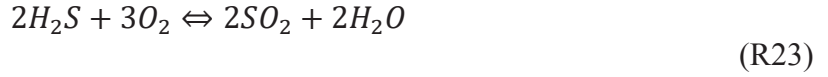
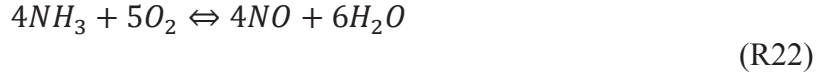
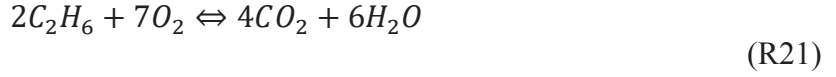
A umidade foi medida através da diferença de massa antes e depois do processo de secagem em estufa conforme norma NBR 14.929. Primeiramente pesou-se as amostras em balança eletrônica de precisão com resolução de 0,01%, depois as amostras foram colocadas em estufa para a secagem, em temperatura entre 104 e 110 °C até que não ocorresse mais variação de peso, o tempo de secagem utilizado foi de 48 horas. Depois da secagem as amostras foram novamente pesadas, e de posse do novo peso foi possível calcular o teor de umidade em base seca.

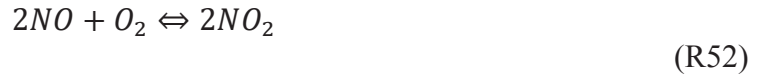
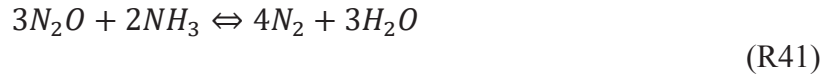
O teor de cinzas foi definido conforme norma ASTM D-3.174, onde a temperatura das amostras é elevada a 750 °C por duas horas em forno mufla. Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Energia da Madeira e Painéis do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa.

ANEXO B – PRINCIPAIS REAÇÕES CONSIDERADAS PELO MODELO

- As seguintes reações químicas são consideradas:







- Balanço de massa na região de emulsão de gás:

$$\frac{dF_{GE,j}}{dz} = \sum_{m=1}^3 (R_{het,SE,m,j\gamma m,E} S_E) + R_{hom,GE,j^E} S_E + G_{MGEGB,jYB} S, \text{ onde } 1 \leq j \leq 500 \quad (A1)$$

- Balanço de massa na região fase de bolha:

$$\frac{dF_{GE,j}}{dz} = R_{hom,GE,j^E} S - G_{MGEGB,jYB} S, \text{ onde } 1 \leq j \leq 500 \quad (A2)$$

Onde:

j menor que 501 refere-se a componentes gasosos, enquanto igual ou acima de 500 a componentes de fase sólida.

- Conversão de sólidos na seção do leito:

$$A_{D,j} = 1 - \frac{F_{LD,j}}{F_{ID,j}}, \quad 501 \leq j \leq 100 \quad (A3)$$

Dado a devida simplificação "F", o fluxo de massa ($F_{LD,j}$) do componente "j" saindo do leito é dado por uma média calculada ao longo de todo o leito, ou pode ser calculada por:

$$F_{LD,j} = F_{ID,j} - \sum_{m=1}^3 \int_{Z=0}^{Z_D} R_{het,SE,m,j} \gamma_{m,E} S_E dz, 501 \leq j \leq 1000 \quad (A4)$$

- Balanço de energia na região de emulsão de gás:

$$F_{GE} c_{GE} \frac{dT_{GE}}{dz} = \varepsilon_E S_E \left[-R_{QGE} + \sum_{m=1}^3 (R_{CSEGE,m} + R_{hSEGE,m}) + (R_{CGBGE} + R_{MGBGE}) \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_E} - R_{CGETD} - R_{GEWD} \right] \quad (A5)$$

Sendo:

$$F_{GE} = \sum_{j=1}^{500} F_{GE,j} \quad (A6)$$

- Balanço de energia para fase de bolha:

$$F_{GB} c_{GB} \frac{dT_{GB}}{dz} = \varepsilon_B S [-R_{QGB} - R_{CGBGE} - R_{hGBGE} - R_{CGBTD}] \quad (A7)$$

Sendo:

$$F_{GB} = \sum_{j=1}^{500} F_{GB,j} \quad (A8)$$

- Balanço de energia para fase sólida no leito:

$$F_{H,m} c_{SE,m} \frac{dT_{SE}}{dz} = \gamma_{m,E} S_E \left[-R_{QSE,m} - (R_{CSEGE,m} + R_{hSEGE,m}) \frac{\varepsilon_E}{1 - \varepsilon_E} - R_{RSETD,m} - \sum_{n=1}^3 (R_{RSESE,m,n} + R_{CSESE,m,n}) \right] 1 \leq m \leq 3 \quad (A9)$$

Sendo: “m” indicador da fase sólida (1 = carbonosa; 2 = calcário ou qualquer absorvente de enxofre; 3 = inerte) presente no leito.

- Balanços de massa para os componentes na borda livre (freeboard):

$$\frac{dF_{F,j}}{dz} = \sum_{m=1}^3 \left(R_{het,SF,m,j} \frac{dA_{PF,m}}{dz} \right) + R_{hom,GF,j} \frac{dV_{GF}}{dz}, 1 \leq j \leq 1000 \quad (A10)$$

- Balanços de energia para os gases na borda livre (freeboard):

$$F_{GF}C_{GF}\frac{dT_{GF}}{dz} = \frac{dV_{GF}}{dz} \left[-R_{QGF} + \sum_{m=1}^3 (R_{CSFGF,m} + R_{hSFGF,m}) - R_{CGFTF} - R_{GFWF} \right] \quad (A11)$$

Sendo:

$$F_{GF} = \sum_{j=1}^{500} F_{F,j} \quad (A12)$$

- Balanços de energia para os sólidos na borda livre (freeboard):

$$F_{SF,m}C_{SF,m}\frac{dT_{SF}}{dz} = \frac{dV_{SF}}{dz} \left[-R_{QSF} - (R_{CSFGF} + (R_{hSFGF,m})\frac{dV_{GF}/dz}{dV_{SF,m}/dz}) - \sum_{n=1}^3 (R_{RSFSF,m,n}) \right], 1 \leq m \leq 3 \quad (A13)$$

Sendo:

$$F_{SF,m} = \sum_{j=m \text{ comp.}} F_{F,j} \quad (A14)$$

- Fluxo de massa de cada espécie química "j" entre as bolhas e a emulsão:

$$G_{MGEB,j} = \psi_{BE}\dot{\rho}_G M_j (x_{GB,j} - x_{GE,j}) \frac{A_B}{V_B} \quad (A15)$$

- Coeficiente de transferência de massa entre a fase formada por partículas do tipo "m" e o gás de emulsão:

$$\psi_{SEGE,m} = N_{Sh,m} \frac{D_G \dot{\rho}_{GE}}{d_m} \quad (A16)$$

- Transferência de calor entre bolhas e emulsão:

$$R_{CGBGE} = \alpha_{CGBGE} (T_{GB} - T_{GE}) (x_{GB,j} - x_{GE,j}) \frac{dA_B}{dV_B} \quad (A17)$$

- Transferência de calor por convecção entre a partícula sólida "m" e o gás na emulsão:

$$R_{CSEGE,m} = \alpha_{CSEGE,m} (T_{SE,m} - T_{GE}) \frac{dA_{PE,m}}{dV_{GE}} \quad (A18)$$

- A transferência de calor radiativo entre partículas aplica-se ao método de dois fluxos

$$R_{RSESE,m,n} = \frac{\sigma(T_{PE,m}^4 - T_{PE,n}^4)}{\frac{1-\varepsilon'_m}{\varepsilon'_m} + \frac{1-\varepsilon'_n}{\varepsilon'_n} \frac{f_m''}{f_n''} + \frac{1}{f_n''}} \frac{dA_{PE,m}}{dV_{SE,m}} \quad (A19)$$

- Transferência de calor por convecção entre partículas:

$$R_{CSESE,m,n} = \alpha_{SESE,m,n} f_n'' (T_{PE,m} - T_{PE,n}) \frac{dA_{PE,m}/dz}{dV_{SE,m}/dz} \quad (A20)$$

Sendo a relação entre a área disponível e os volumes de partículas “m”:

$$\frac{dA_{PE,m}}{dz} = \frac{6}{d_m} f_m'' (1 - \varepsilon_E)(1 - \varepsilon_B) S \quad (A21)$$

$$\frac{dV_{PE,m}}{dz} = f_m'' (1 - \varepsilon_E)(1 - \varepsilon_B) S \quad (A22)$$

- Taxas de circulação de partículas no leito

$$\left(\frac{1}{r}\right) \left[\frac{\partial(ru_{G,r})}{\partial r}\right] + \left(\frac{\partial u_{G,z}}{\partial z}\right) = 0 \quad (A23)$$

$$\left(\frac{1}{r}\right) \left[\frac{\partial(ru_{p,r})}{\partial r}\right] + \left(\frac{\partial u_{p,z}}{\partial z}\right) = 0 \quad (A24)$$

$$0 = \rho_p \alpha_p (u_{G,z} - u_{p,z}) + \mu_p \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_{p,z}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_{p,z}}{\partial z^2} \right] - \rho_p g \quad (A25)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_p \alpha_p u_{G,z,z} = 0 - (\rho_p + \rho_G) g \quad (A26)$$

- Taxa de captura

$$F_{Y,m,l} = F_{X,m,l} + (F_{Y,m,l,z=z_D} - F_{X,m,l}) \exp[-a_Y(z - z_D)] \quad (A27)$$

- Taxa de elutrição é dada por:

$$F_{X,m,l} = w_{m,l} \rho_m (1 - \varepsilon_{F,m,l}) (U_G - u_{T,m,l}) \exp[-a_Y(z - z_D)] \quad (A28)$$

- Taxa de arrastamento no topo do leito:

$$F_{Y,m,l,z=z_D} = 3,07 \times 10^{-9} S^2 d_{B,z=z_D} \rho_G^{3,5} g^{0,5} + \frac{(U_G - U_{G,mf})_{z=z_D}^{2,5}}{\mu_G^{2,5}} f_m w_{m,l} \quad (A29)$$

- As taxas de reações heterogêneas (gás-sólido):

$$\tilde{r}_i = \frac{2}{d_{p,l}} \frac{\tilde{\rho}_{j,\infty} - \tilde{\rho}_{j,eq}}{\sum_{k=1}^3 U_{U,k}} \quad (\text{A30})$$

Sendo as resistências a transferência de massa imposta pelas cinzas, dadas por:

$$U_{U,1} = \frac{1}{N_{Sh} D_{j,G}} \quad (\text{A31})$$

$$U_{U,2} = \frac{1-a}{a D_{j,A}} \quad (\text{A32})$$

$$U_{U,3} = \frac{1}{a D_{j,N} [a\phi \coth(a\phi) - 1]} \quad (\text{A33})$$

- Taxa para o modelo de núcleo exposto são:

$$\tilde{r}_i = \frac{2}{d_{p,l}} \frac{\tilde{\rho}_{j,\infty} - \tilde{\rho}_{j,eq}}{\sum_{k=1}^3 U_{X,k}} \quad (\text{A34})$$

- Sendo as resistências a transferência de massa imposta pelas cinzas, dadas por:

$$U_{X,1} = \frac{1}{N_{Sh} D_{j,G}} = U_{U,1} \quad (\text{A35})$$

$$U_{X,2} = 0 \quad (\text{A36})$$

$$U_{X,3} = \frac{a}{D_{j,N} [a\phi \coth(a\phi) - 1]} = a^2 U_{U,3} \quad (\text{A37})$$

- Em todas as relações acima, o módulo de Thiele é definido como:

$$\phi = r_A \left[\frac{k_i}{D_{j,N}} \right]^{1/2} \quad (\text{A38})$$

- Média de volume de superfície da partícula de biomassa

$$d_{p,av} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{d_{pi}}} \quad (\text{39})$$

Eficiência do equipamento

$$\eta = \frac{F_G * h_G}{F_S * h_S}$$

(40)

Nomeclatura

a_j	coeficiente para a fórmula representativa de char. Os subscritos indicam o elemento químico
A	área (m^2) ou cinza (em reações químicas)
b_j	coeficientes para a fórmula representativa do alcatrão
c	calor específico a pressão constante ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
d	diâmetro (m)
D_j	difusividade do componente "j" na fase ou meio indicado posteriormente (m^2s^{-1})
f	fator ou fração
F	fluxo de massa ($kg s^{-1}$)
g	aceleração de gravidade (ms^{-2})
G	fluxo de massa ($kgm^{-2}s^{-1}$)
h	entalpia (Jkg^{-1})
H	comprimento (m)
M	massa(kg)
M_j	massa molecular do componente j ($kmol kg^{-1}$)
N_{Sh}	Número de Sherwood (adimensional)
p	índice para a geometria da partícula (0 = planar, 1 = cilíndrico, 3 = esfera)
p_j	pressão parcial do componente j (Pa)
P	Pressão (Pa)
r	coordenada radial (m)
r_i	taxa de reação "i" (para reações homogêneas: $kgm^{-3}s^{-1}$; para reações heterogêneas: $kgm^{-2}s^{-1}$)
R	taxa de produção de massa ou energia (+) ou consume (-).As unidades dependem do uso. Por exemplo $kg s^{-1}m^{-2}$ se reações homogêneas e $kg s^{-1}m^{-3}$. Para os parâmetros relacionados à energia, a unidade é Wm^{-3}
S	área da seção transversal (m^2). Se não houver índice, indica área da seção transversal do reator (m^2)
t	tempo (s)
T	temperature (K)
u	velocidade ($m s^{-1}$)
U	velocidade superficial do gás ($m s^{-1}$) ou resistência a transferência de massa ($s m^{-2}$)
V	volume (m^3)
x	coordenadas ou distância (m)
x_j	fração molar do componente "j"
X	parâmetro de elutriação ($kg s^{-1}$)
y	coordenadas (m)
w_j	fração mássica do componente "j"
z	coordenadas verticais (m)
z_D	altura do leito ou região densa (m, medido a partir da superfície do distribuidor)

z_F altura da borda livre ou região magra (m, medido a partir da superfície do distribuidor)

Letras gregas

α coeficiente de transferência de calor por convecção
 ε fração de vazio
 ε' emissividade
 γ área de partículas por volume de reator ou volume da fase indicada como índice (m^2/m^3)
 \emptyset módulo de Thiele
 λ condutividade térmica ($Wm^{-1}K^{-1}$)
 μ viscosidade ($kg\ m^{-1}s^{-1}$)
 v_{ij} coeficiente estequiométrico do componente "j" na reação "i"
 ρ densidade ou concentração ($kg\ m^{-3}$)
 ρ_p densidade aparente de partícula ($kg\ m^{-3}$)
 ρ_j concentração de base de massa do componente "j" ($kg\ m^{-3}$) (em algumas situações, o componente "j" pode ser indicado por sua fórmula)
 σ constante de Stefan-Boltzman ($W\ m^{-2}K^{-4}$)
 σ coeficiente de transferência de massa (s^{-1} : se entre duas fases de gás; $kmolm^{-2}s^{-1}$: se entre gás e sólido)

Subscritos

a parâmetro geral ou na interface núcleo-casca externa
A casca ou camada residual
B bolha
C contribuição da convecção. Em algumas situações óbvias, representaria o carbono
cond contribuição de condução
d relacionado à secagem ou base seca
D no leito, do leito ou da região densa
E emulsão
eq condição de equilíbrio
F na borda livre ou região magra
G fase de gás
h transferência de energia devido à transferência de massa
H relacionadas à circulação de partículas em um leito fluidizado. Em algumas situações óbvias, representaria o hidrogênio
hom relacionadas a reações homogêneas (ou gás-gás)
het relacionadas a reações heterogêneas (ou gás-sólido)
i reação "i"
I ponto de alimentação
j componente químico
l nível dentro da distribuição de tamanho de partícula
L no ponto de saída ou condição
m fase física (sólido carbonáceo, m = 1; calcário ou dolomita, m = 2; sólido inerte, m = 3; gás, m = 4)
M geração ou transferência em massa

min	condições mínimas
mf	condições mínimas de fluidização
N	núcleo. Em algumas situações representa o nitrogênio
O	em ou referido a superfície externa ou externa. Em algumas situações óbvias, representaria oxigênio
P	partícula. Se nenhuma outra indicação, a propriedade da partícula está relacionada ao valor aparente
P	a pressão constante
Q	related to chemical reactions
R	relacionado à transferência de calor radiativo
S	fase sólida ou partículas. Se indicado para uma propriedade, como densidade, significa densidade aparente de partícula. Em algumas situações óbvias, representaria o Enxofre
tar	alcatrão
U	modelo de núcleo não reagido
V	relacionado a desvolatilização
V	volátil
W	parede
X	modelo de núcleo exposto ou relacionado à elutriação
Y	relacionado ao arrastamento de partículas
z	relacionado à direção axial ou vertical
∞	na fase gasosa longe da superfície da partícula

Sobrescritos

~	em base molar
‘	fração numérica
“	fração de area
““	fração de volume

ANEXO C – DETALHES DO ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE USINAS

A função objetivo está sujeita a restrições quanto à conexão à rede de distribuição impostas pela resolução normativa brasileira 482 (ANEEL, 2012) e à distância máxima. As formulações matemáticas nas Equações (1), (2) e (3) são as seguintes:

$$\min \sum_i DMOP_i \quad (1)$$

$$DMOP_i \leq D_{max} \quad (2)$$

$$4,5 - A \leq \sum_i P_i \quad (3)$$

Onde: i é o índice de representação do município; $DMOP_i$ é a distância dos municípios ao ponto ótimo; P_i é o potencial de geração dos municípios; D_{max} é a Distância máxima entre o município e o ponto ótimo de instalação da usina e A – Configuração variável da faixa de potência ideal para as centrais de geração.

O processo de otimização proposto ocorreu em várias etapas, que vão desde a seleção e leitura dos dados até a disposição da potência e localização das usinas e sguem o seguinte passo a passo:

- (i) A região e a concessionária são selecionadas para que os dados sejam filtrados e apenas os municípios da mesma região e concessionária permaneçam. Municípios de diferentes concessionárias podem não fazer parte da mesma cooperativa por conta de indenizações ao consumidor e ganhos na forma de créditos. Seleciona-se

sempre 1 neste item, pois, adotou-se que todos os municípios de Minas Gerais são atendidos pela mesma concessionária de energia elétrica;

- (ii) Os dados são lidos e um vetor M de uns é criado. Por meio do M é feito o controle dos municípios selecionados. Em cada seleção é atribuído o zero para a posição correspondente em M ;
- (iii) O município com maior potencial é sempre o primeiro a ser selecionado para compor a cooperativa. Após a seleção sua potência é armazenada na variável potência total TP e é atribuído zero a posição correspondente ao município no vetor potência P , o que impede sua seleção na implantação de outra usina;
- (iv) Ao ponto ótimo OP de instalação da usina, inicialmente são atribuídos os dados geográficos, GD , do primeiro município selecionado. Calculam-se as distâncias dos demais municípios até este ponto e seleciona-se o mais próximo que ao implantar a potência total TP da cooperativa não viole o limite de 5 MW. A restrição de distância máxima também deve ser atendida;
- (v) A distância máxima D_{max} , é a distância média NM dos municípios ao centro de energia da área de estudo. Este centro de potência é a média dos dados geográficos (latitude e longitude) ponderados pela potência. Ressalta-se que os dados geográficos dos municípios estão relacionados à área centróide de cada um deles;
- (vi) Cada município adicionado é recalculado OP por GD ponderando P e implementando TP até que esteja na faixa de 4,5 a 5 MW. Uma planta TP e OP são armazenadas nos vetores PP e $PPOP$, respectivamente. O processo é reiniciado e ocorre até que todos os municípios sejam alocados, ou seja, até $Mnull$.

Alguns casos particulares foram implementados no algoritmo de forma que não haja problemas de convergência em certas situações:

- (i) Quando um determinado município é selecionado por ser o mais próximo do atual OP, mas já alocado em alguma cooperativa, é atribuída uma distância de 10.000 km à posição que lhe corresponde no vetor. O DMOP evita que esse município sempre seja detectado e que o algoritmo não converta para a seleção de outro. O critério de parada é implementado nesta fase e o processo termina quando todas as posições DMOP forem iguais a 10.000 km.
- (ii) Se o município foi selecionado por ser o mais próximo, mas quando implementado na cooperativa, TP é maior que 5 MW ou $DMOP$ é maior que D_{max} é atribuído zero no vetor M e um no vetor S . Isso impede que o município seja selecionado para a planta em construção, mas a informação de que ainda não foi alocada está em S e retorna para as seguintes M etapas.
- (iii) Caso não existam municípios que atendam às restrições e que façam a potência da usina ficar entre 4,5 e 5 MW é feito o autoajuste na faixa até A .

O fluxograma segue todas as etapas do processo de otimização descrito, executado no Python 3.7

