



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

MIGUEL QUEIROZ VIVEIROS GOMES

Análise termodinâmica de sistema de gaseificação com água supercrítica para geração combinada de eletricidade, calor e bio-óleo a partir do bagaço da cana-de-açúcar

Guaratinguetá
2023

Miguel Queiroz Viveiros Gomes

Análise termodinâmica de sistema de gaseificação com água supercrítica para geração combinada de eletricidade, calor e bio-óleo a partir do bagaço da cana-de-açúcar

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Averaldo
Bimestre

Guaratinguetá
2023

G633a	Gomes, Miguel Queiroz Viveiros Análise termodinâmica de sistema de gaseificação com água supercrítica para geração combinada de eletricidade, calor e bio-óleo a partir do bagaço da cana-de-açúcar / Miguel Queiroz Viveiros Gomes - Guaratinguetá, 2023. 46 f : il. Bibliografia: f. 43-46 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Thiago Averaldo Bimestre 1. Gaseificação de biomassa. 2. Biomassa vegetal. 3. Biocombustíveis. I. Título. CDU 620.91
-------	--

MIGUEL QUEIROZ VIVEIROS GOMES

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador

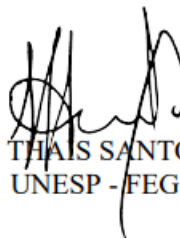
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. THIAGO AVERALDO BIMESTRE
Orientador/UNESP-FEG



Prof.ª) Dra. ELIANA VIEIRA CANETTIERI
UNESP-FEG



Prof.ª) Dra. THAÍS SANTOS CASTRO
UNESP - FEG

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela graça da vida e as constantes bençãos que têm me acompanhado em minha jornada.

À minha família pelo constante apoio e presença durante todas as etapas de minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Averaldo Bimestre, pela orientação e auxílio durante a realização deste trabalho.

À Unesp pelo acolhimento e oportunidade de desenvolvimento profissional.

“Porque o Senhor dá a sabedoria: da sua boca vem o conhecimento e o entendimento”;

Provérbios 2:6

RESUMO

O processo de gaseificação de biomassa empregando água no estado supercrítico apresenta diversas vantagens. Dentre elas, destaca-se a não necessidade da realização de um processo preliminar de secagem, o que reduz o consumo de energia. Além disso, durante o processo ocorre a decomposição total da matéria orgânica, evitando a formação de carvão e alcatrão, contaminantes que podem causar o entupimento das linhas de operação em uma planta termodinâmica. As vantagens citadas decorrem das características intermediárias entre as fases líquida e gasosa apresentadas pela água no estado supercrítico, o que proporciona uma melhoria substancial da dissolução da matéria orgânica. No presente estudo, uma planta termodinâmica foi modelada no software de processos termoquímicos DWSim, o qual é baseado em processos sequenciais modulares de código aberto. O objetivo do trabalho é analisar termodinamicamente a trigeração de energia elétrica, calor e bio-óleo a partir da gaseificação do bagaço de cana-de-açúcar empregando água supercrítica como agente gaseificante. Foi analisada a influência da vazão de biomassa nos rendimentos do sistema de trigeração, mantendo-se a vazão mássica, pressão e temperatura da água supercrítica constantes em, respectivamente, 5000 kg/h, 251 bar e 450 °C. Os resultados indicam que menores vazões de biomassa beneficiam a formação de gás de síntese, proporcionando uma maior geração de trabalho mecânico e energia térmica, contudo, uma menor produção de bio-óleo é obtida. Além disso, foi investigada a existência de um limite mínimo para a vazão de biomassa, uma vez que um valor extremamente baixo pode reduzir, de forma significativa, a produção de bio-produtos. Com relação ao excesso de oxigênio a combustão do gás de síntese, benefícios para a geração das potências mecânica e térmica foram aferidos. Isso é consequência de uma maior vazão de gases de combustão devido à maior quantidade de oxigênio, possibilitando maior geração de trabalho na turbina. Já outro efeito da combustão em excesso é uma pequena diminuição da condutividade térmica dos gases expelidos pela turbina, fato que pode explicar o ligeiro aumento de calor produzido pelo sistema. Dessa forma, dentre os cenários simulados, o que apresentou melhor e mais balanceado comportamento foi o com vazão de 2000 kg/h de biomassa e excesso de 50% de oxigênio na combustão, apresentando um rendimento energético de 68%.

PALAVRAS-CHAVE: gaseificação por água supercrítica; DWSim; biomassa lignocelulósica; trigeração.

ABSTRACT

The biomass gasification process employing water in the supercritical state offers several advantages. Among them, the non-necessity of carrying out a preliminary drying process stands out, which reduces energy consumption. Furthermore, during the process, there is complete decomposition of organic matter, avoiding the formation of charcoal and tar, contaminants that can cause clogging of operation lines in a thermodynamic plant. The mentioned advantages come from the intermediate characteristics between the liquid and gaseous phases exhibited by water in the supercritical state, which substantially improves the dissolution of organic matter. In the present study, a thermodynamic plant was modeled using the thermochemical process software DWSim, which is based on open-source modular sequential processes. The aim of the work is to thermodynamically analyze the trigeneration of electricity, heat, and bio-oil from the gasification of sugarcane bagasse employing supercritical water as the gasifying agent. The influence of biomass flow rate on the trigeneration system yields was analyzed, while maintaining the mass flow rate, pressure, and temperature of supercritical water constant at 5000 kg/h, 251 bar, and 450 °C, respectively. The results indicate that lower biomass flow rates benefit the synthesis gas formation, providing greater mechanical work and thermal energy generation; however, a lower production of bio-oil is obtained. Additionally, the existence of a minimum limit for the biomass flow rate was investigated since an extremely low value can significantly reduce the production of bio-products. Regarding the excess oxygen in the synthesis gas combustion, benefits for mechanical and thermal power generation were assessed. This is a consequence of a higher flow rate of combustion gases due to the higher oxygen content, allowing greater work generation in the turbine. Another effect of excessive combustion is a slight decrease in the thermal conductivity of the gases expelled by the turbine, a fact that can explain the slight increase in heat produced by the system. Thus, among the simulated scenarios, the one that presented the best and most balanced behavior was with a biomass flow rate of 2000 kg/h and a 50% excess of oxygen in combustion, resulting in an energy efficiency of 68%.

KEYWORDS: gasification by supercritical water; DWSim; lignocellulosic biomass; trigeneration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição da biomassa lignocelulósica.....	14
Figura 2 – Perspectivas tecnológicas ligadas à biomassa.....	17
Figura 3 – Planta termodinâmica modelada no DWSim.....	20
Figura 4 – Planta termodinâmica para determinação do poder calorífico dos combustíveis.....	26
Figura 5 – Fração das fases líquida e vapor no fluido supercrítico.....	27
Figura 6 – Composição mássica da fase de vapor do fluido supercrítico.....	28
Figura 7 – Composição mássica da fase líquida do fluido supercrítico.....	28
Figura 8 – Caracterização do gás de síntese.....	29
Figura 9 – Caracterização do bio-óleo.....	30
Figura 10 – Potência fornecida pela turbina.....	32
Figura 11 – Potência fornecida ao compressor.....	32
Figura 12 – Potência mecânica útil do sistema.....	33
Figura 13 – Potência suplementar necessária.....	34
Figura 14 – Potência térmica gerada pelo vapor.....	36
Figura 15 – Poder calorífico do bio-óleo.....	37
Figura 16 – Potência gerada e consumida pelo sistema em kW.....	38
Figura 17 – Eficiência energética do sistema.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição da biomassa.....	19
Tabela 2 – Composição da biomassa modelada no DWSim.....	20
Tabela 3 – Características da turbina, compressor e bomba.....	22
Tabela 4 – Características dos trocadores de energia térmica.....	22
Tabela 5 – Vazão molar de oxigênio em kmol/h.....	31
Tabela 6 – Vazão molar de metano para queima suplementar em kmol/h.....	35
Tabela 7 – Vazão mássica de vapor em kg/h.....	35
Tabela 8 – Temperatura do vapor em °C.....	35
Tabela 9 – Poderes caloríficos de alguns combustíveis.....	37
Tabela 10 – Energia Gerada pela biomassa e pelo bio-óleo por unidade de tempo (kJ/s)....	38
Tabela 11 – Vazão de biomassa e excesso de oxigênio para a maior geração de energia....	39
Tabela 12 – Parâmetros de fluxos para a condição ótima.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASC	Água Supercrítica
BL	Biomassa Lignocelulósica
FSD	Fluído Supercrítico
GASC	Gaseificação por Água Supercrítica
RGAS	Reator de Gaseificação
ROX	Reator de Oxidação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1	BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA.....	13
2.2	BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	14
2.3	GASEIFICAÇÃO POR ÁGUA SUPERCRÍTICA.....	15
2.4	PERSPECTIVAS PARA O BRASIL.....	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1	MATERIAIS.....	19
3.1.1	<i>Software</i> de Modelagem Termoquímica.....	19
3.1.2	Bagaço da Cana-de-Açúcar.....	19
3.2	DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....	20
3.2.1	Planta Termodinâmica.....	20
3.2.2	Reações Químicas.....	22
3.3	MÉTODOS.....	23
3.3.1	Parâmetros da Simulação.....	23
3.3.2	Parâmetros analisados.....	24
3.3.3	Cálculo dos Poderes Caloríficos.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1	INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE BIOMASSA NA PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE E BIO-ÓLEO.....	27
4.2	COMBUSTÃO DO GÁS DE SÍNTESE.....	30
4.3	GERAÇÃO E CONSUMO DE POTÊNCIA MECÂNICA NO SISTEMA.....	31
4.4	ENERGIA SUPLEMENTAR.....	34
4.5	ENERGIA TÉRMICA GERADA PELO SISTEMA.....	35
4.6	PODERES CALORÍFICOS.....	37
4.7	ANÁLISE ENERGÉTICA.....	38
5	CONCLUSÃO.....	41
	REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

É inequívoco afirmar que as ações humanas têm contribuído para o aquecimento da atmosfera, oceano e superfície terrestre, principalmente através da emissão de gases do efeito estufa, que continuaram a crescer na última década devido, entre outras causas, ao uso não sustentável da energia (IPCC, 2023). Nesse cenário, ações governamentais para promoção e adoção de tecnologias sustentáveis são cruciais, como políticas de incentivo e impostos que encorajam a transição energética (YÜREK et al, 2023).

Por conseguinte, vivemos em uma época promissora para a pesquisa intensiva e produção de novas técnicas capazes de gerar energia com um menor impacto ambiental. Dentre as formas de gerar energia limpa a partir de recursos renováveis neutros em carbono, a utilização de biomassa apresenta vantagens devido a sua disponibilidade e sustentabilidade para suplantiar necessidades energéticas de calor, eletricidade e biocombustíveis (TEZER et al., 2022).

Nesse contexto, a gaseificação é um ótimo caminho para a utilização de biomassa, sendo um importante processo de aproveitamento de resíduos, com alta eficiência e recuperação energética (TEZER et al., 2022). A gaseificação é um processo termoquímico que converte materiais carbonáceos sólidos em uma mistura de gases denominada gás de síntese, cinzas, carvão e alcatrão na presença de um agente gaseificante à alta temperatura (TEZER et al., 2022). Porém, como em outras abordagens de conversão de energia, um dos principais obstáculos para a industrialização de processos de conversão da biomassa é a necessidade de uma grande entrada de energia para o processo, principalmente quando a biomassa requer uma etapa de secagem (HU et al. 2020). Quanto à utilização de água supercrítica como agente gaseificante, não é necessária uma pré-secagem da matéria orgânica, podendo a biomassa ser utilizada diretamente (HU et al., 2020), além de sua utilização apresentar outras vantagens, como a decomposição completa da matéria orgânica, sem a formação dos contaminantes convencionais. (WANG et al., 2023).

Quanto à biomassa escolhida para estudo, foi selecionado o bagaço da cana de açúcar. A cana de açúcar é uma das principais commodities produzidas no Brasil. Para ser ter uma ideia, de acordo com estimativas da CONAB (2023), haverá um aumento de, aproximadamente, 4,4% na produção de cana-de-açúcar no período 2023/24, em relação ao período anterior. Tal aumento corresponde a um total de 637,1 milhões de toneladas produzidas. Essa alta impulsionará a produção de derivados como o etanol, que deve crescer 5,9%. Diante desse cenário, a utilização inteligente dos resíduos da indústria

sucroalcooleira, como o bagaço de cana-de-açúcar, se apresenta como uma grande oportunidade econômica.

Em linha com o contexto apresentando anteriormente, considerando a necessidade de transição da matriz energética brasileira e mundial para uma forma mais sustentável de geração e consumo de energia e levando em conta, também, a grande disponibilidade de biomassa residual da indústria sucroalcooleira, esse trabalho tem como objetivo propor e analisar o desempenho de um modelo de planta termodinâmica que promove a gaseificação do bagaço de cana-de-açúcar empregando água no estado supercrítico como agente gaseificante, além de produzir energia térmica, energia elétrica e bio-óleo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

A biomassa lignocelulósica (BL) é uma matéria vegetal abundante, renovável e de baixo valor agregado, como, por exemplo, resíduos agrícolas. O desenvolvimento de tecnologias que reaproveitem a BL residual agrícola para a geração de energia é uma alternativa para reduzir as emissões de CO₂ e minimizar o aquecimento global (SHRESTHA et al., 2021).

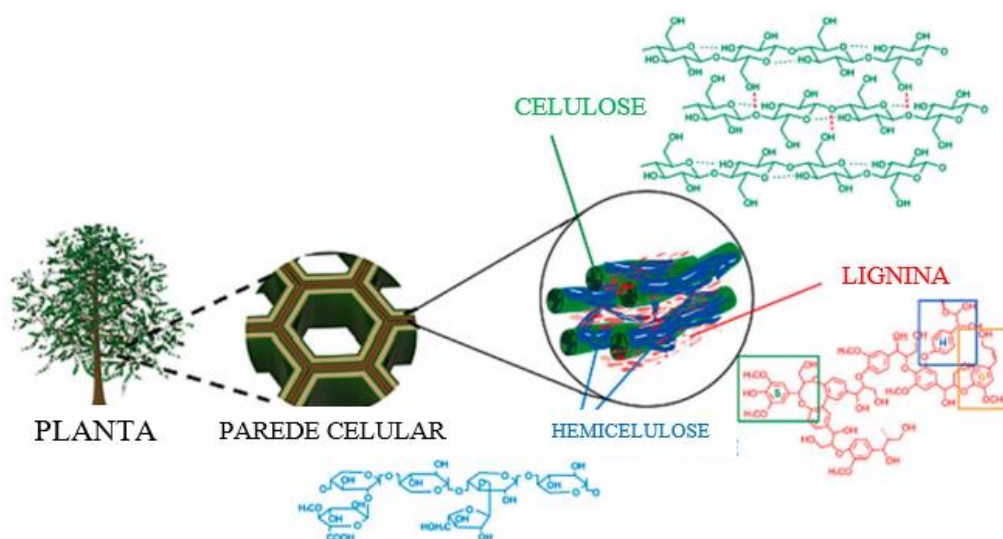
A biomassa lignocelulósica é composta, majoritariamente, de celulose, hemicelulose e lignina (Figura 1), principais componentes da parede celular das plantas (SHRESTHA et al., 2021). Especificamente, a celulose é um polímero cujas unidades monoméricas são moléculas de glicose, sendo considerada o recurso orgânico renovável mais abundante do planeta. Quanto às suas características, é uma substância fibrosa, cujas moléculas se mantêm unidas devido à fortes ligações de hidrogênio, permitindo que as paredes celulares das plantas mantenham sua estrutura (OKOLIE et al., 2020).

A hemicelulose é um biopolímero que consiste em uma mistura de polissacarídeos, e, quando comparada à celulose, a hemicelulose pode ser facilmente degradada em meios ácidos à alta temperatura devido ao seu baixo nível de polimerização e estrutura amorfa (OKOLIE et al., 2020). Já a lignina é naturalmente um polímero fenólico amorfo que se encontra ramificada com a celulose e a hemicelulose (YU et al., 2020), formando parte da parede celular secundária das plantas, o que permite às mesmas manterem sua integridade estrutural (CALVO FLORES et al., 2010).

Esses componentes também influenciam outras propriedades da BL, como é o caso de sua resistência à degradação e dureza, que ocorrem devido à cristalinidade da celulose e à propriedade hidrofóbica da lignina (SHRESTHA et al., 2021).

Outros compostos também estão presentes na BL, porém em menores proporções, como é o caso de minerais, grupos acetil, substituintes fenólicos e cinzas (SHRESTHA et al., 2021).

Figura 1 – Composição da biomassa lignocelulósica



Fonte: Norfarhana (2024).

2.2 BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

O bagaço da cana-de-açúcar é o subproduto mais gerado na indústria sucroalcooleira. Devido à sua abundante disponibilidade, o bagaço pode ser utilizado em diferentes processos, servindo desde substrato para processos microbianos até para a conversão de energia via combustão ou gaseificação para a produção de biocombustíveis e produtos de valor agregado (AHMED et al., 2012).

No cenário nacional, o bagaço da cana-de-açúcar vem sendo amplamente utilizado nas indústrias para a produção de energia renovável. Para se ter uma ideia, analisando a oferta interna de energia elétrica no Brasil no ano de 2022 se verifica que o bagaço de cana-de-açúcar teve uma participação de 4,7% no total ofertado de energia elétrica em território nacional. Essa participação cresce para 15,4% ao se considerar a oferta interna de energia total, contudo, ainda continua sendo inferior à dos derivados de petróleo, que apresentaram uma participação de 35,7% (EPE, 2023).

Além de sua atual importância econômica, a indústria sucroalcooleira continua a crescer no Brasil. De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a produção de cana-de-açúcar no ano civil de 2022 apresentou um aumento de 2,2% em relação ao ano anterior, alcançando 595,3 milhões de toneladas (EPE, 2023). Tal fator influencia diretamente na geração do bagaço. Estima-se que uma tonelada de cana-de-açúcar origine em torno de 250 kg de bagaço, dentre os quais 140 kg correspondem à massa seca (SAMAMAD, 2011).

Quanto a sua composição, o bagaço de cana-de-açúcar apresenta uma concentração em massa variando na faixa de 32,0 a 44,0% de celulose, 27,0 a 32,0% de hemicelulose e 19,0 a 24,0% de lignina. A composição pode variar devido a fatores como idade, estágio e condições de crescimento da planta (SHRESTHA et al., 2021). No que se refere à capacidade energética do bagaço, esse apresenta um poder calorífico superior e inferior de, respectivamente, 2.257 e 2.130 kcal/kg (EPE, 2023).

2.3 GASEIFICAÇÃO POR ÁGUA SUPERCRÍTICA

A água se encontra no estado supercrítico quando sua temperatura e pressão estão com valores acima de 374,3 °C e 22,1 MPa, respectivamente. A água supercrítica é uma substância de fase única que possui características tanto de gás como de líquido, apresentando massa específica suficiente para provocar uma dissolução satisfatória de matéria orgânica, difusidade maior que de líquidos e baixa viscosidade para efetivar o transporte de massa (GUO et al., 2015).

No processo de gaseificação por água supercrítica (GASC), a água é o próprio meio de reação, e, como no estado supercrítico a água é muito menos polar, ela se torna um bom solvente para compostos e gases não polares. Além do mais, a importância de um único meio de reação se deve ao fato de não haver limitação de transferência de massa entre fases, resultando em um menor tempo de residência e em reatores de menor volume (LETELLIER et al., 2010).

Diversos estudos vêm analisando as vantagens da GASC e a influência de parâmetros operacionais em diferentes tipos de BL. Para o caso da utilização da vinhaça (uma mistura de água e sólidos orgânicos e inorgânicos), Marias (2011) descreveu a GASC da biomassa com um modelo baseado em balanços de energia, assumindo equilíbrio termodinâmico e usando a equação de estado de Peng-Robinson para prever a fugacidade e a entalpia da massa dos componentes presentes no meio reagente. O estudo mostrou que a melhor temperatura para uma gaseificação eficiente é de 600 °C, proporcionando uma eficiência de 85%. Também, do ponto de vista teórico, foi mostrado que a biomassa deve estar com a maior concentração de matéria orgânica possível.

Utilizando-se de outra biomassa, Cao (2018) realizou um estudo experimental da GASC do bagaço da cana-de-açúcar em um reator autoclave para a produção de hidrogênio. Os resultados mostraram que a produção de hidrogênio e as eficiências de gaseificação do carbono, do hidrogênio e a total foram positivamente afetadas com o aumento de

temperatura da reação, menor concentração do bagaço e maior tempo de residência. Sem a presença de catalisadores, o bagaço foi quase completamente gaseificado a 750 °C, atingindo uma eficiência de gaseificação do carbono de aproximadamente 96,28%. Com a adição de um catalisador, a reatividade do bagaço na gaseificação aumentou significativamente, sendo que a maior produção de hidrogênio foi alcançada a 650 °C com carbonato de sódio como catalisador.

Zhang (2024) conduziu experimentos de gaseificação de palha de milho empregando água supercrítica em um reator de batelada, e obteve conclusões semelhantes às anteriores. Os produtos da reação foram analisados de diferentes maneiras, e parâmetros como rendimento de gás (RG), eficiência de gaseificação do carbono (EGC) e seletividade de hidrogênio (SH) foram examinados. Chegou-se à conclusão de que a temperatura, a qual foi variada na faixa de 400 a 600 °C, é a variável que mais impacta na gaseificação por água supercrítica da palha de milho. A variação de temperatura não afetou significativamente a produção de CO₂; por outro lado, a produção de H₂ e CH₄ sofreram aumento, o que se deve ao fato de que altas temperaturas auxiliam nas reações de reforma a vapor e metanação. Ainda segundo o estudo, o aumento na concentração da palha de milho provoca uma redução nos parâmetros EGC, SH e RG, sendo o hidrogênio o que experimentou a maior queda de rendimento dentre os produtos gasosos.

Para o caso da gaseificação por água supercrítica utilizando como biomassa pinho e palha de trigo, Nanda (2016) lista as vantagens desse tipo de gaseificação aliada à utilização de dopagem da matéria orgânica com nanopartículas de níquel. No estudo foram analisadas a produção de hidrogênio, produção total de gás e eficiência de gaseificação do carbono, estes apresentando aumento de, respectivamente, 59%, 40% e 34% para a gaseificação do pinho quando comparada à GASC sem a dopagem. Para o caso da gaseificação da palha de trigo, os aumentos dos parâmetros analisados foram acima de 30%. Dessa forma, a impregnação de biomassa por um catalisador é um conceito promissor para a produção de gás de síntese rico em hidrogênio a partir da gaseificação de matéria orgânica com água supercrítica.

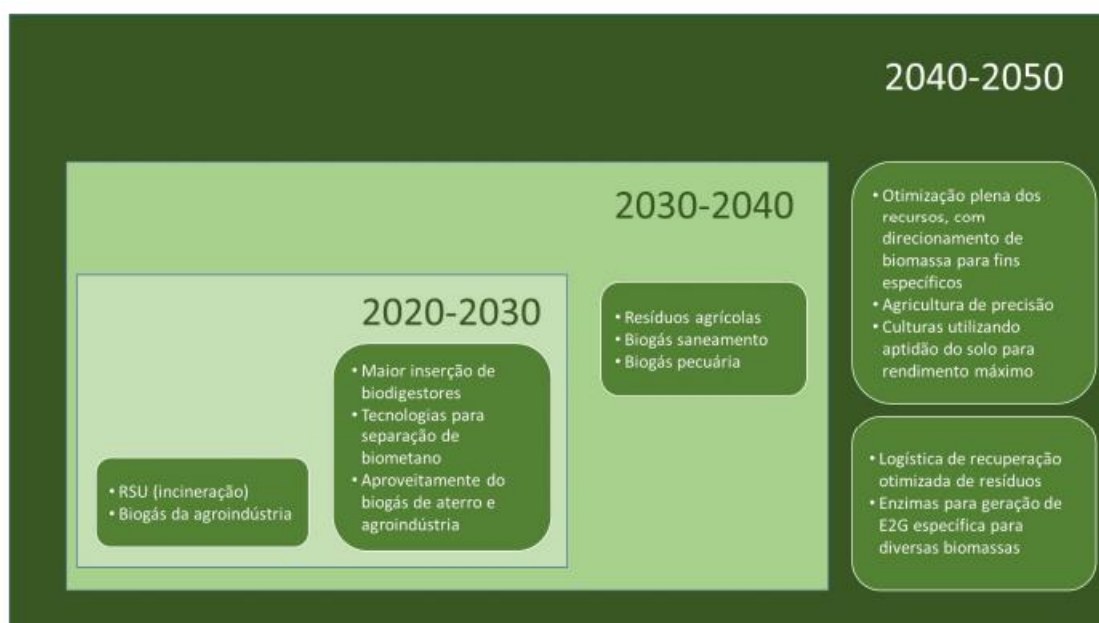
Voltado para a trigeração de bio-óleo, potência e calor utilizando como biomassa casca de palmiste, Yan (2021) propõe uma planta termodinâmica composta por quatro grandes unidades, sendo essas: unidade para a geração combinada de calor e energia elétrica, unidade de liquefação em água supercrítica, unidade de extração e separação de produtos e unidade de reciclagem de líquido residual. Nesse sistema, gás natural comprimido é utilizado para satisfazer o consumo de potência e calor de todo o sistema.

Novamente, o estudo demonstrou que o aumento da temperatura de operação do reator contribui para a eficiência energética e exergética do sistema, enquanto o aumento da pressão ocasiona o decréscimo da eficiência térmica. Em relação à concentração da biomassa, um aumento de 5% para 33,3% resulta em um aumento nas eficiências energética e exergética de 26,63% e 26,92%, respectivamente, de 58,53% e 50,65%. Porém, aumentando-se a concentração de biomassa acima de 33,3%, a tendência de aumento da eficiência térmica deixa de ocorrer, demonstrando que há um ponto ótimo para a concentração.

2.4 PERSPECTIVAS PARA O BRASIL

O Plano Nacional de Energia (PNE 2050) lista que o Brasil, tradicionalmente, aproveita a biomassa de forma direta, através da combustão, e, também, a partir da transformação em biocombustíveis. A Figura 2 exemplifica as perspectivas tecnológicas ligadas à biomassa no âmbito nacional.

Figura 2 – Perspectivas tecnológicas ligadas à biomassa



Fonte: PNE 2050.

Contudo, segundo Carvalho (2020), o Brasil não está preparado para enfrentar os proeminentes riscos que acompanham as mudanças climáticas, sendo essencial que o país invista para alcançar as metas climáticas estipuladas. Porém, uma vez que o Brasil é

responsável pela emissão de, aproximadamente, um terço dos gases do efeito estufa na região da América Latina e Caribe, existem oportunidades para que o Brasil adote uma economia mais sustentável, principalmente devido à sua contínua produção de biomassa agroindustrial, permitindo que o país possa, até mesmo, liderar o mercado mundial de bioenergia tanto na produção como na utilização de biocombustíveis.

Analisando especificamente o setor elétrico brasileiro, observa-se uma necessidade de maiores investimentos e estudos para aumentar a participação da biomassa na geração de energia elétrica. Pois, apesar da oferta interna de eletricidade ser composta, majoritariamente por fontes renováveis, correspondendo a 88% do total ofertado no Brasil, 64% dessa oferta provém da geração hidrelétrica (EPE, 2023). Tal cenário conduz à necessidade de geração de uma parcela de eletricidade a partir de plantas termoeletricas operadas com gás natural, carvão mineral e óleo combustível em tempos de seca (RIBEIRO, 2018).

Ainda segundo um estudo realizado pela EPE (2018), a composição do parque nacional de geração de energia elétrica tem se alterado gradativamente, com o aumento da participação das fontes eólica, solar e hidrelétricas de fio d'água. Contudo, são fontes não controláveis, e o maior uso de tecnologias que atendam aos critérios de energia, capacidade e flexibilidade deve ser explorado. Os processos térmicos de geração de energia preenchem esses requisitos, e entre as fontes possíveis para a expansão desse tipo de tecnologia, há um grande potencial para a utilização da biomassa.

O Plano Nacional de Energia (PNE 2050) prevê que o setor de transportes sofrerá um aumento na demanda por biocombustíveis, impulsionado pela Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), política que entrou em vigor no ano de 2020 com o intuito de auxiliar a regularidade de abastecimento e a competitividade dos biocombustíveis no mercado nacional. Para que a bioenergia se desenvolva no Brasil, é preciso superar desafios como: (1) Concentração da produção em poucos países, o que dificulta o comércio internacional; (2) Falta de diversificação das biomassas empregadas na fabricação de biocombustíveis e desenvolvimento de novos biocombustíveis; (3) Diversidade de atores estabelecendo políticas públicas para o setor de transporte, entre outros.

Referente à gaseificação com água supercrítica, essa é uma tecnologia que se mostra promissora na produção de biocombustíveis, permitindo que, a partir de biomassas residuais, se possa gerar mais valor à agroindústria, a partir de produtos de maior valor agregado e uma utilização energeticamente mais eficiente dos mesmos, seja para produção de eletricidade, calor ou potência mecânica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 *Software* de Modelagem Termoquímica

Nesse trabalho, a planta termodinâmica e as reações químicas foram modeladas no *software* DWSim, um simulador de processos químicos de código aberto que tem apresentado resultados congruentes com aqueles obtidos por *softwares* pagos, como tem sido verificado por alguns estudos, como Tangsriwong (2020) e Manji (2023). DWSim é um *software* de processos modulares sequenciais, ou seja, ao se modelar um sistema consistindo em blocos (fluxo de material, energia, mecanismos termodinâmicos, blocos lógicos, entre outros), é possível definir os parâmetros de cada bloco separadamente, inclusive as equações de estado que regem o sistema termodinâmico.

3.1.2 Bagaço da Cana-de-açúcar

Segundo análise elementar realizada por Castro (2009), o bagaço da cana-de-açúcar contém aproximadamente 6% de umidade. Considerando-se os valores máximos dados por Shrestha (2020) para a composição do bagaço da cana-de-açúcar (24% de lignina, 44% de celulose e 32% de hemicelulose), a composição do bagaço utilizado no estudo se encontra na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição da biomassa

Água	Lignina	Hemicelulose	Celulose
6%	23%	30%	41%

Fonte: Produção do próprio autor.

Como o *software* DWSim não apresentava esses compostos como opção para a modelagem, com exceção da água, compostos equivalentes àqueles apresentados na Tabela 1 foram escolhidos.

Como a celulose é um polímero de glicose, essa hexose foi escolhida para modelar o polímero. A hemicelulose é composta majoritariamente de pentoses e hexoses, sendo a xilose e a glicose escolhidas para representar esse composto, e, por simplificação, a fração

desses compostos na hemicelulose como sendo 50%. Por último, a lignina foi modelada como o fenol, sendo esse o composto mais simples capaz de reproduzir satisfatoriamente o comportamento da lignina. Na Tabela 2 encontra-se a composição final da biomassa inserida no *software* para modelagem.

Tabela 2 – Composição da biomassa modelada no DWSim

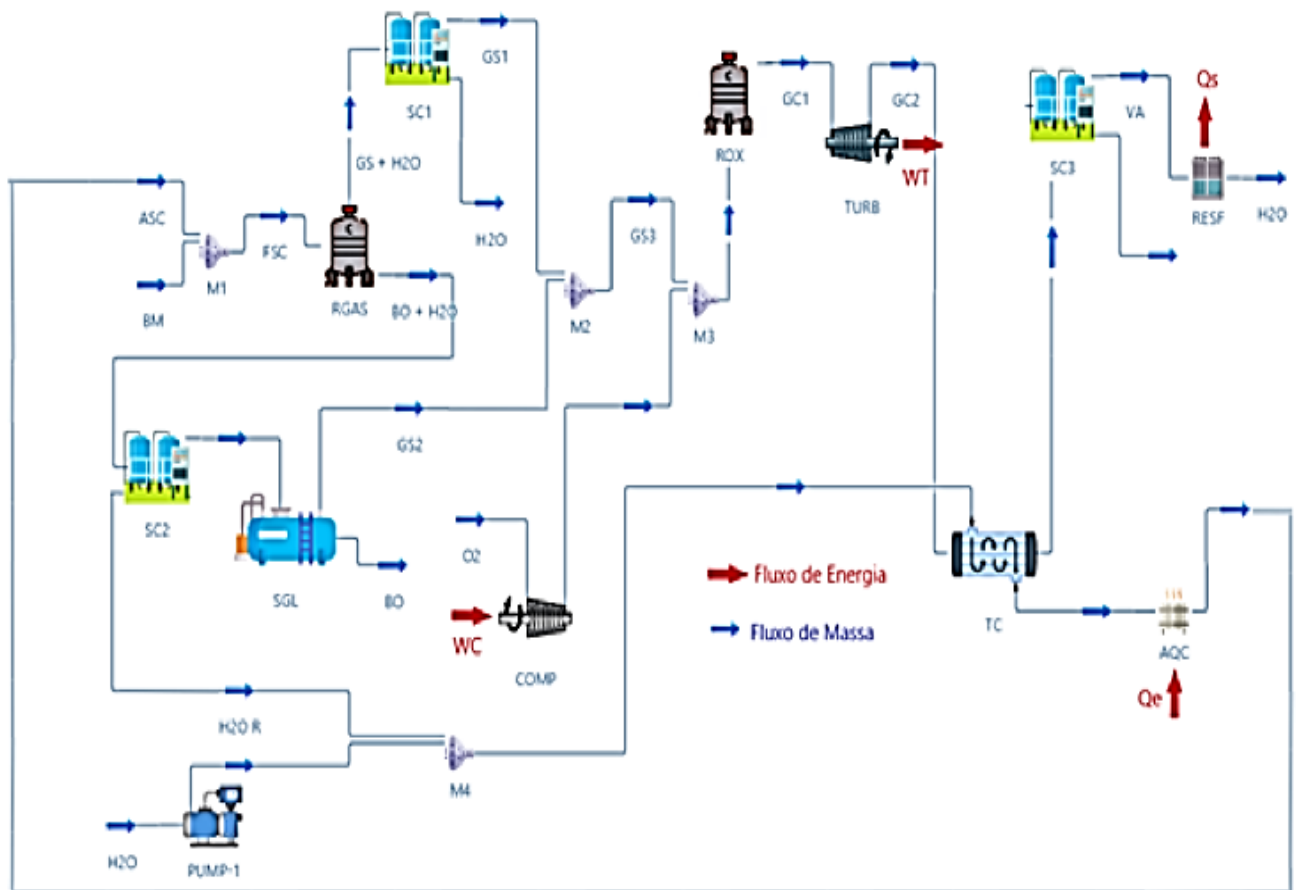
Água	Xilose	Fenol	Glicose
6,00%	15,04%	22,56%	56,40%

Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

3.2.1 Planta Termodinâmica

Figura 3 – Planta termodinâmica modelada no DWSim



Fonte: Autor.

A planta termodinâmica utilizada na modelagem é mostrada na Figura 3. Primeiramente, temos a entrada de água supercrítica (ASC) à temperatura de 450 °C e 251 bar de pressão e Biomassa (BM) em um misturador de fluxo (M1), resultando no fluxo denominado fluido supercrítico (FSC). O fluido supercrítico adentra o RGAS, reator de conversão responsável pelas reações de reforma a vapor, deslocamento gás/água e metanação. Como saída do RGAS, tem-se gás de síntese (GS) e bio-óleo (BO) misturados com água (H₂O).

Após separado da água, o gás de síntese GS1 é misturado com outro fluxo, contendo o gás de síntese GS2. Isso ocorre devido ao fato de que após modelar a separação do BO e da água, ocorre a formação de uma fase líquida e uma fase vapor. A fase vapor é gás de síntese (GS2), que é então separado do BO no separador gás-líquido (SGL). O GS2 é enviado ao M2 e o BO é retirado do sistema.

O fluxo de GS é misturado com oxigênio pressurizado a 250 bar e enviado a outro reator (ROX) para que ocorram as reações de combustão. Os gases de combustão resultantes (GC1) são então enviados a uma turbina (TURB), que reduz a pressão até a pressão atmosférica, gerando trabalho mecânico (WT), o qual tem por objetivo a produção conseguinte de energia elétrica. Os gases de combustão (GC2) passam através de um trocador de calor (TC), fornecendo energia térmica à água que será reutilizada no sistema (H₂O R), proveniente do separador de compostos SC2. Devido à utilização de água nas reações químicas, uma quantidade adicional do composto deve ser fornecida ao conjunto. Essa quantidade é proporcionada pela bomba PUMP-1, que também é responsável por manter a pressão de 250 bar na linha.

Contudo, a energia térmica obtida no trocador de calor não é suficiente para que a água em estado supercrítico chegue à temperatura de 450 °C requerida para que se feche o ciclo termodinâmico. Portanto, uma queima adicional de metano é realizada para fornecer a energia suplementar necessária (Q_e).

Para a geração de calor, vapor d'água (VA) é separado dos gases de combustão e então resfriado pela unidade RESF até a temperatura de 25 °C. A energia térmica retirada do vapor (Q_s) pode então ser utilizada para aquecimento de ambiente, produção de compostos químicos, entre outros fins.

As Tabelas 3 e 4 mostram as características dos principais equipamentos da planta termodinâmica.

Tabela 3 – Características da turbina, compressor e bomba

Parâmetros	Turbina	Compressor	Bomba
Processo termodinâmico	Adiabático	Adiabático	Adiabático
Pressão de entrada	251 bar	1,01 bar	1,01 bar
Pressão de saída	1,01 bar	250 bar	251 bar
Eficiência	75%	75%	75%

Fonte: Produção do próprio autor.

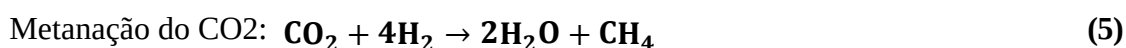
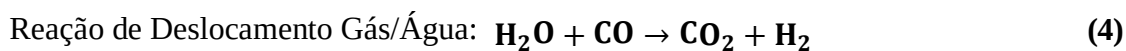
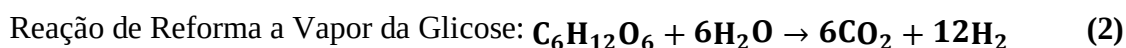
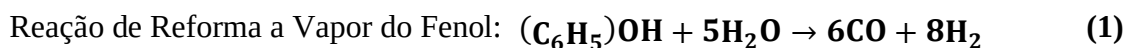
Tabela 4 – Características dos trocadores de energia térmica

Parâmetros	Trocador de calor	Aquecedor	Resfriador
Coeficiente de transf. global	2000 W/(m²K)	-	-
Área de troca	2 m²	-	-
Direção do fluxo	Contrafluxo	-	-
Temperatura de saída	-	450 °C	25 °C
Eficiência	-	100%	100%

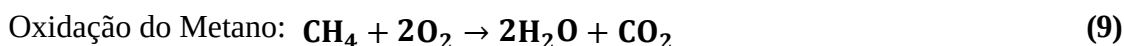
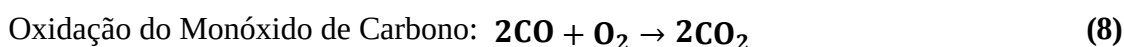
Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.2 Reações Químicas

Na planta termodinâmica, reações químicas ocorrem em dois reatores de conversão, sendo esses os reatores de gaseificação por água supercrítica (RGAS) e de oxidação (ROX). As reações que ocorrem no RGAS são indicadas pelas **equações (1) a (6)**:



Já no ROX, as reações que tomam lugar são indicadas pelas equações de (7) a (9):



3.3 MÉTODOS

3.3.1 Parâmetros da Simulação

Um dos aspectos importantes para a modelagem de um sistema termodinâmico é a escolha apropriada das Equações de Estado. As Equações de Estado permitem definir o estado de uma substância ou sistema termodinâmico a partir de poucas propriedades conhecidas. Segundo a literatura, a equação de estado de Peng-Robinson e algumas de suas variantes são capazes de simular o comportamento da água supercrítica de maneira satisfatória (YAN, 2021). Nesse estudo, foi utilizado como pacote de propriedades na simulação o Peng-Robinson (PR), devido ao fato de variantes mais precisas não estarem disponíveis no software DWSim.

Quanto à escolha do tipo de reator químico a ser utilizado na simulação, a opção pelo Reator de Conversão deve-se ao fato da simplificação não requerer uma descrição detalhada da cinética das reações, sendo necessário apenas, o fornecimento das equações estequiométricas pertinentes. Tanto para os reatores como para os equipamentos geradores de potência mecânica, foi escolhido o modelo de cálculo adiabático, ou seja, não foram consideradas perdas na forma de calor.

Outra idealização presente na modelagem é referente à desconsideração de perda de pressão nas linhas da planta. A queda ou aumento de pressão nos fluídos de trabalho ocorre apenas quando esses passam através de máquinas de fluxo.

Com relação à modelagem dos demais equipamentos da planta, informações podem ser encontradas nas Tabelas 3 e 4.

3.3.2 Parâmetros analisados

Foi verificado nesse estudo a influência de diferentes concentrações de biomassa na produção do gás de síntese e do bio-óleo. Essa análise foi realizada mediante inspeção da vazão desses compostos, como também de sua composição química. Para variar a concentração de biomassa, a vazão de água supercrítica no sistema foi mantida constante, enquanto a vazão mássica de biomassa foi variada entre valores de 5000 kg/h a 500 kg/h.

Outro parâmetro de grande importância analisado foi o excesso de oxigênio na combustão do gás de síntese. Primeiramente, foi considerada a combustão completa do gás de síntese para cada composição química deste, o que variou de acordo com a quantidade de biomassa adentrando no sistema por unidade de tempo. Após isso, foram consideradas as queimas com excesso de oxigênio, nos valores de 10% a 50%.

A partir da variação da vazão de biomassa e oxigênio, foi verificado o impacto dessas quantidades na produção de potência mecânica e térmica do sistema, assim como a produção de bio-óleo e a energia suplementar necessária para a manutenção do sistema termodinâmico. Vale ressaltar que, devido aos baixos valores apresentados com relação aos demais equipamentos, a potência consumida pela bomba foi desconsiderada.

Quanto à análise energética, um dos parâmetros verificados foi a eficiência energética, descrita pela **equação (10)**:

$$\eta = \frac{E_g}{E_f} \quad (10)$$

Onde E_f é a energia total fornecida ao sistema, E_g a energia útil gerada (ambas em Joule) e η a própria eficiência energética.

E_f corresponde à soma das energias químicas contidas na biomassa (E_{biom}) e no metano suplementar (E_{met}) e à energia mecânica requerida pelo compressor (E_c). E_g , por sua vez, é a soma das parcelas da energia proveniente da turbina (E_t), da energia retirada do resfriador (E_r) e da energia química contida no bio-óleo (E_{oleo}). Portanto, considerando estas definições se obtém as **equações (11) e (12)**:

$$E_f = E_{biom} + E_{met} + E_c \quad (11)$$

$$\mathbf{E_g = E_t + E_r + E_{oleo}} \quad (12)$$

Para a realização dos cálculos, as energias geradas e consumidas pelos equipamentos foram obtidas diretamente da simulação para cada caso analisado. Acerca das energias químicas da biomassa, bio-óleo e metano suplementar, o cálculo foi realizado como segue nas **equações (13) a (15)**:

$$\mathbf{E_{biom} = PC_{biom} \times M_{bio}} \quad (13)$$

$$\mathbf{E_{oleo} = PC_{oleo} \times M_{oleo}} \quad (14)$$

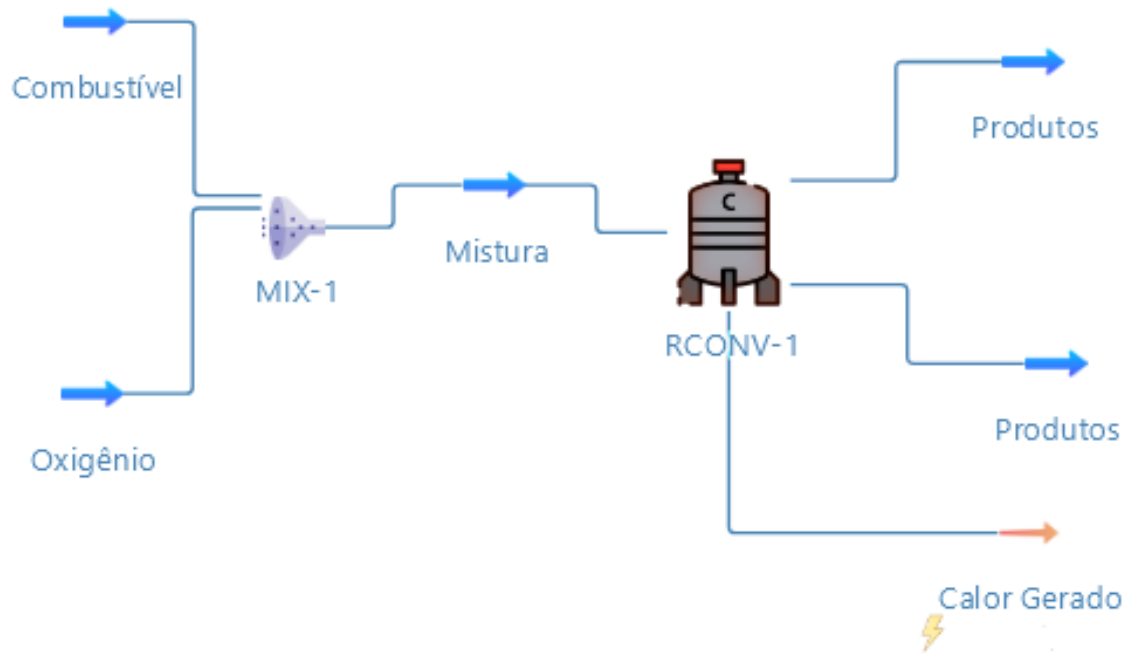
$$\mathbf{E_{met} = PC_{met} \times M_{met}} \quad (15)$$

Sendo PC_{biom}, PC_{oleo}, PC_{met}, M_{bio}, M_{oleo} e M_{met} os poderes caloríficos (J/kg) e as quantidades de massa (kg) que adentram o sistema por segundo, respectivamente, da biomassa, do bio-óleo e do metano suplementar.

3.3.3 Cálculo dos Poderes Caloríficos

Para o cálculo dos poderes caloríficos, esse foi obtido em sua forma simplificada, sendo a razão entre a energia térmica liberada na combustão da substância por unidade de massa. Portanto, foi necessário o conhecimento do calor liberado na combustão desses combustíveis. Para se obter esse valor, foi utilizada a planta apresentada na Figura 4, também modelada no DWSim, onde há um reator para a combustão da biomassa e do bio-óleo. O método de cálculo do reator foi isotérmico, de forma que o calor gerado na reação foi exportado para fora do sistema. O poder calorífico do metano, por sua vez, foi retirado da literatura.

Figura 4 – Planta termodinâmica para determinação do poder calorífico dos combustíveis



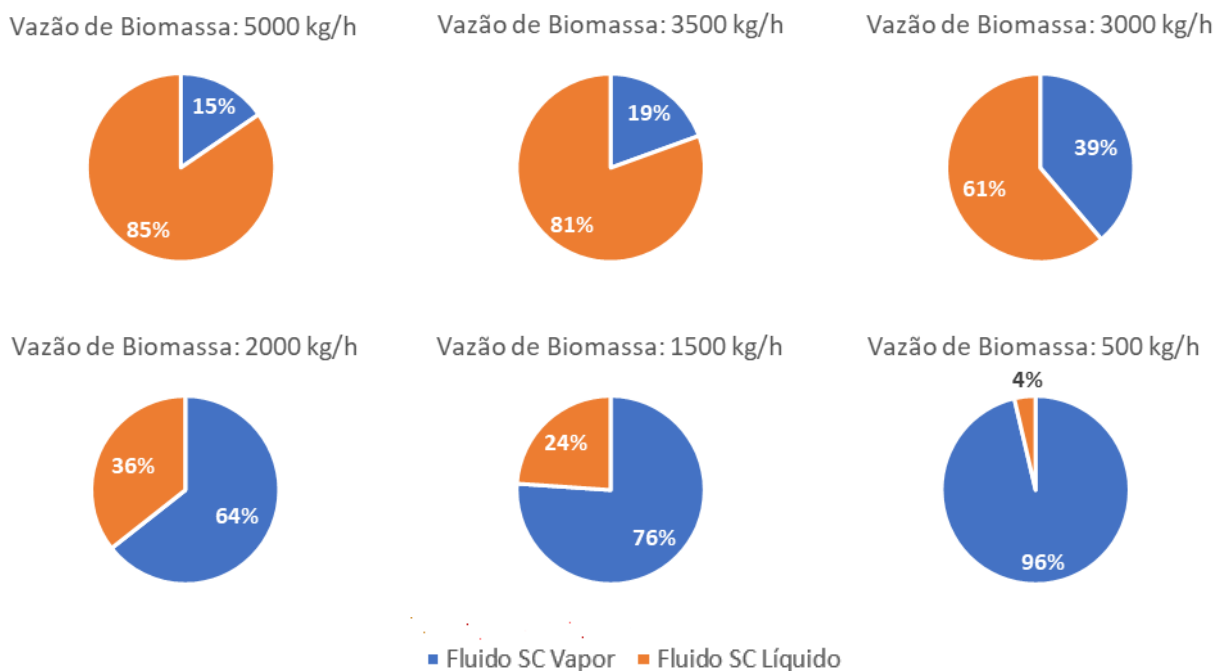
Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE BIOMASSA NA PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE E BIO-ÓLEO

No estudo, a vazão de água supercrítica (ASC) foi mantida constante, no valor de 5000 kg/h, enquanto a vazão de biomassa foi variada de 500, 1500, 2000, 3000, 3500 e 5000 kg/h, visando analisar a influência da concentração de biomassa na mistura supercrítica, tanto para a geração de potência como na produção de bio-óleo. O fluido supercrítico (FSC) é gerado da mistura dos fluxos de ASC e biomassa. O fluido adentra o RGAS e sofre as reações de reforma a vapor, deslocamento gás/água e metanação, produzindo o bio-óleo e o gás de síntese. O FSC apresenta duas fases, a líquida e a vapor. A Figura 5 apresenta a fração de cada uma dessas fases em função da vazão de biomassa inserida no sistema. As Figuras 6 e 7, por sua vez, apresentam a composição mássica de cada uma das fases do FSC.

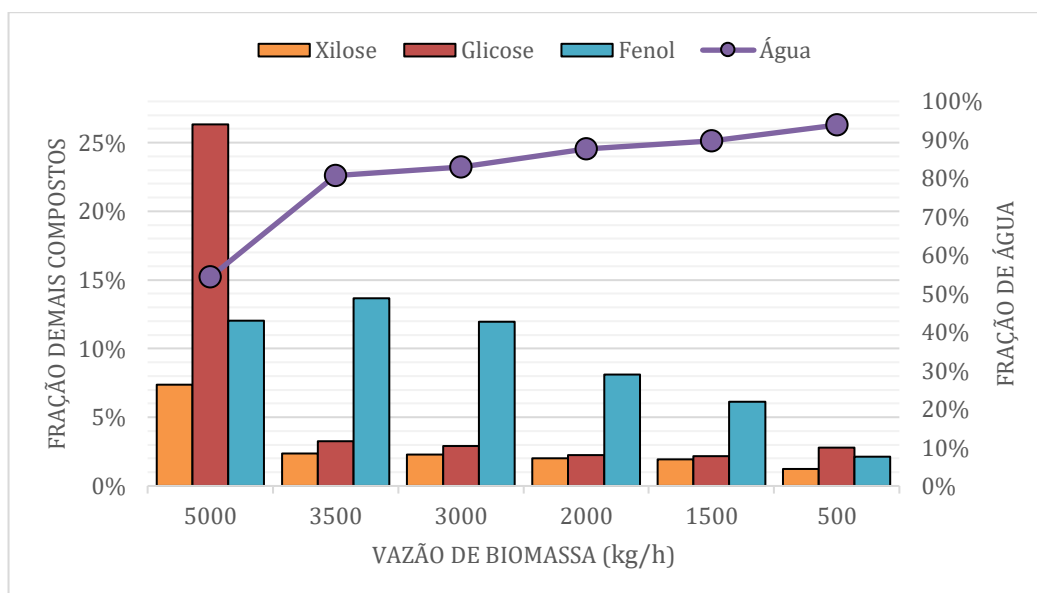
Figura 5 – Fração das fases líquida e vapor no fluido supercrítico



Fonte: Autor.

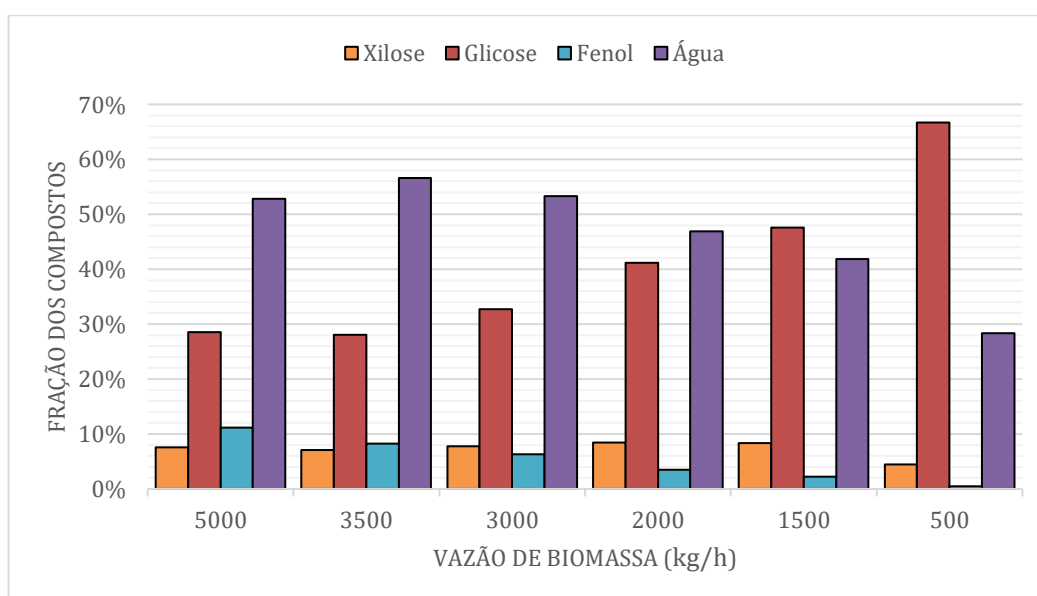
É observado, a partir da Figura 5, que uma diminuição da vazão de biomassa acarreta um fluido supercrítico com alto título. Porém, como pode ser observado pela Figura 6, conforme aumenta-se a razão entre as vazões de ASC e biomassa, a fase vapor vai se tornando predominantemente formada por água, enquanto na fase líquida a fração de água tende a diminuir.

Figura 6 – Composição mássica da fase de vapor do fluido supercrítico



Fonte: Autor.

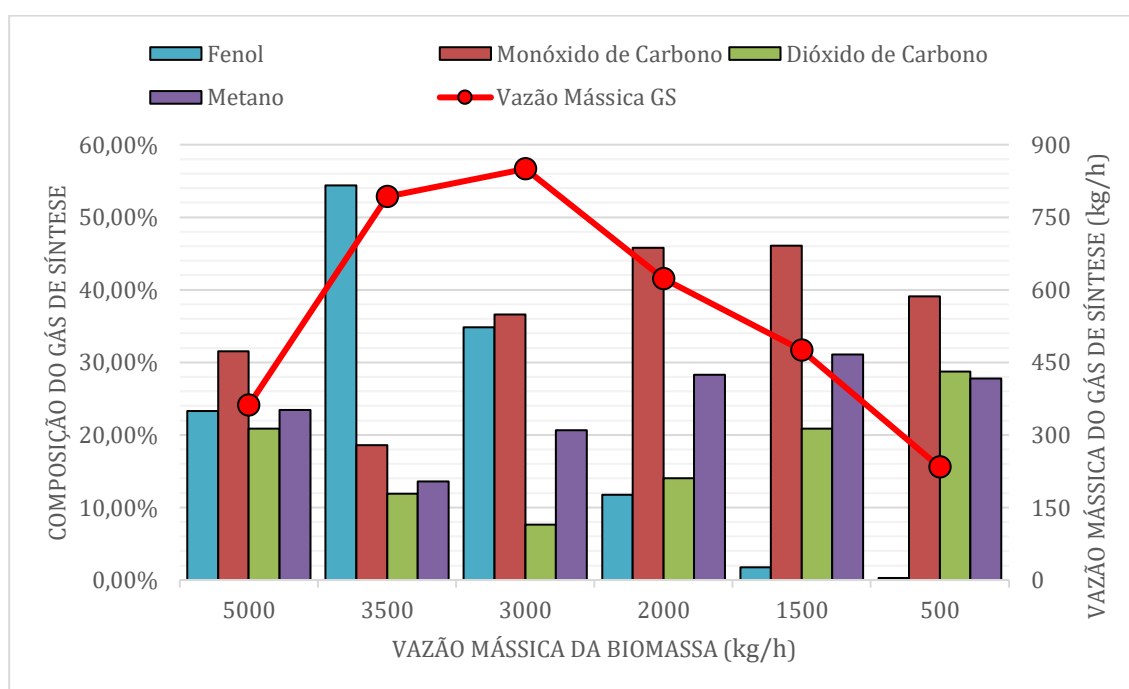
Figura 7 – Composição mássica da fase líquida do fluido supercrítico



Fonte: Autor.

As Figuras 8 e 9 apresentam a fração dos principais componentes e a vazão mássica dos produtos gás de síntese e bio-óleo, mostrando como esses parâmetros são influenciados pela quantidade de biomassa que adentra o sistema termodinâmico. Esses produtos são analisados após passarem pelo processo de separação da água que não reagiu no RGAS mais a água produzida durante o processo. O bio-óleo é um dos fins da trigeriação, enquanto o gás de síntese é utilizado dentro da própria planta termodinâmica. A água, por sua vez, é, em grande parte reutilizada no ciclo termodinâmico.

Figura 8 – Caracterização do gás de síntese

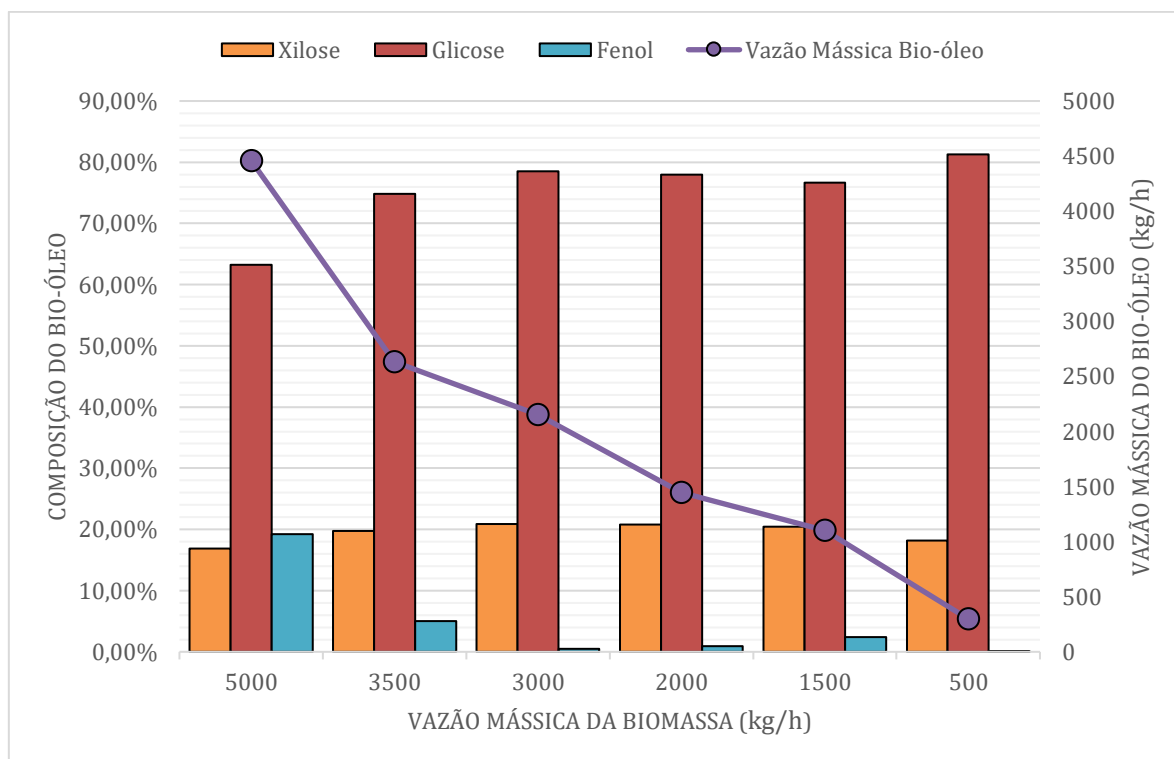


Fonte: Autor.

A produção do gás de síntese apresenta uma curva crescente até alcançar um pico em 3000 kg/h de vazão de biomassa, logo após este apresenta uma tendência decrescente conforme a vazão de biomassa diminui. Vale ressaltar que, nesse estudo, o gás de síntese foi oxidado para a geração de gases de combustão, sendo esses responsáveis pela geração de potência (mecânica) na turbina e, também, de energia térmica, a partir do aproveitamento do calor do vapor d'água contido neles. A combustão do gás de síntese modelada nesse trabalho é referente a combustão do monóxido de carbono, metano e hidrogênio (sendo este último presente em quantidades desprezíveis). A presença de metano e monóxido de carbono no gás de síntese é o fator predominante para a geração de energia térmica no ROX e, consequentemente, na produção de potência mecânica/elétrica e

térmica. Contudo, como a vazão de gás de síntese varia para os diferentes casos analisados, a escolha da melhor vazão de biomassa será realizada a partir de análise direta dos valores energéticos calculados pela simulação para os diferentes cenários.

Figura 9 – Caracterização do bio-óleo



Fonte: Autor.

Referente à produção do bio-óleo, esse apresenta uma composição química pouco variável em função da vazão de biomassa. Por outro lado, sua vazão é fortemente influenciada. Como pode ser observado, uma diminuição na vazão de biomassa ocorre em decréscimo na produção do bio-óleo.

4.2 COMBUSTÃO DO GÁS DE SÍNTESE

A partir das composições do gás de síntese, foi calculada a quantidade de oxigênio necessária para a combustão no ROX, principalmente do metano e do monóxido de carbono. Esse cálculo foi realizado a partir das equações estequiométricas de combustão, sendo, também, verificada a influência do oxigênio em excesso durante a reação. As vazões molares de oxigênio para cada caso são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Vazão molar de oxigênio em kmol/h

Excesso de O ₂	Vazão de biomassa (kg/h)					
	5000	3500	3000	2000	1500	500
0%	13,44	16,69	27,53	27,16	22,61	10,01
10%	14,79	18,35	30,28	29,87	24,87	11,01
20%	16,13	20,02	33,04	32,59	27,13	12,01
30%	17,48	21,69	35,79	35,30	29,39	13,01
40%	18,82	23,36	38,54	38,02	31,65	14,01
50%	20,16	25,03	41,30	40,74	33,92	15,01

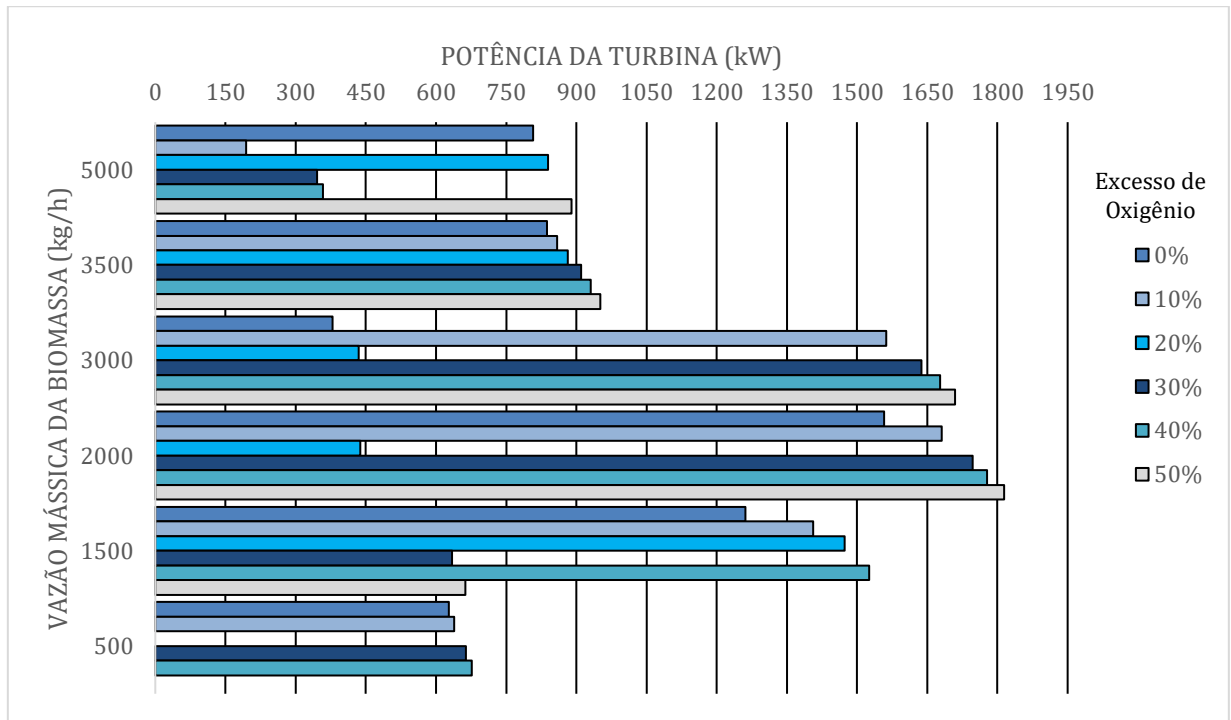
Fonte: Produção do próprio autor.

Para a combustão de 3000 e 2000 kg/h de biomassa, ocorre o maior consumo de oxigênio dentre os valores analisados. Como pode ser observado na Figura 8, com 3000 kg/h de biomassa é alcançada a maior vazão de gás de síntese. Por outro lado, considerando a vazão de 2000 kg/h de biomassa, por mais que seja produzida uma vazão menor de gás de síntese, esse é mais rico em metano e dióxido de carbono, acarretando uma necessidade maior de oxigênio para combustão.

4.3 GERAÇÃO E CONSUMO DE POTÊNCIA MECÂNICA NO SISTEMA

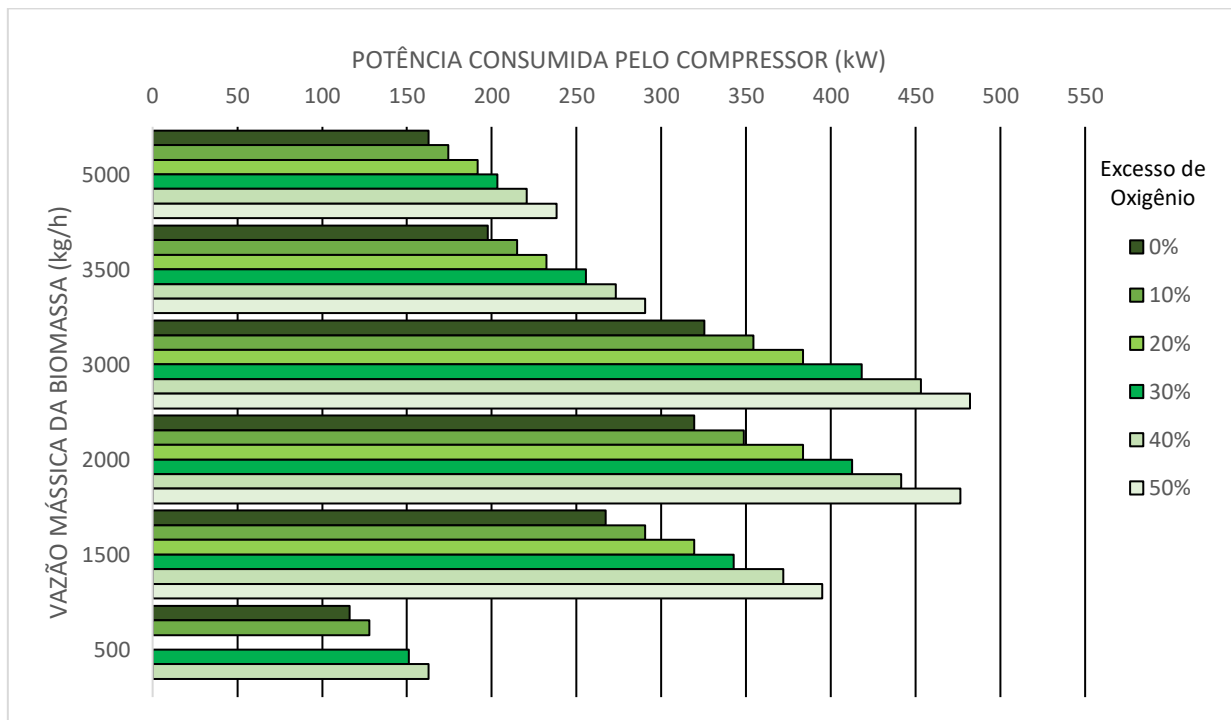
Na planta termodinâmica, a geração de potência mecânica ocorre na turbina, sendo essa acionada pelos gases de combustão provenientes do ROX. O consumo de potência ocorre, por sua vez, pelo compressor responsável pela injeção de oxigênio no ROX e pela bomba presente no sistema. Devido à baixa potência requerida pela bomba, essa foi desconsiderada na determinação da potência mecânica líquida útil. Nas Figuras 10 e 11 são observáveis as potências mecânicas em função da vazão de biomassa e da vazão de oxigênio.

Figura 10 – Potência fornecida pela turbina



Fonte: Autor.

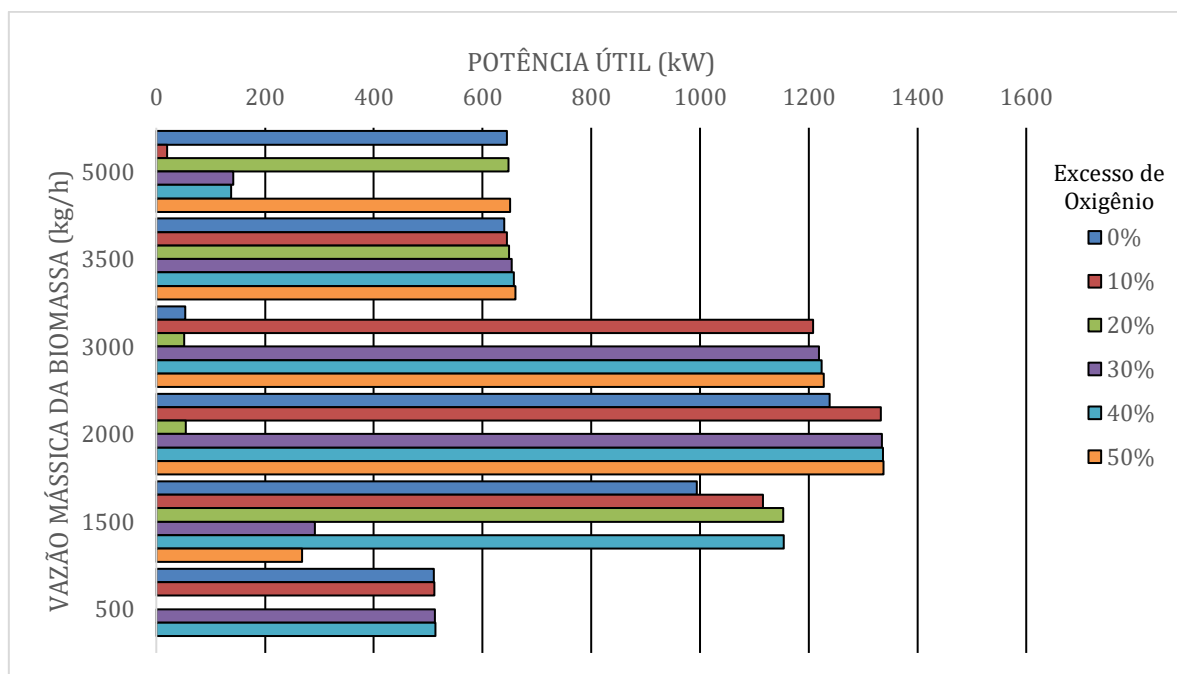
Figura 11 – Potência fornecida ao compressor



Fonte: Autor.

Para auxiliar as análises, foi gerada a Figura 12, que mostra a potência mecânica útil do sistema, sendo essa igual a potência mecânica gerada na turbina (Figura 10) descontada da potência mecânica consumida no compressor (Figura 11).

Figura 12 – Potência mecânica útil do sistema



Fonte: Autor.

Dentre os casos analisados, a maior potência atingida pela turbina ocorreu para a vazão de biomassa fixada em 2000 kg/h. De forma geral, para alcançar os maiores valores de potência mecânica útil do sistema, devem ser escolhidos os valores de vazão de biomassa de 3000 kg/h ou menores, pois geram um gás de síntese de melhor qualidade para combustão (ou seja, maiores concentrações de CO e CH₄), além de proporcionarem uma maior vazão mássica de gás de síntese, conforme pode ser observado na Figura 8. Contudo, abaixo de 1500 kg/h de biomassa, a quantidade de matéria orgânica fornecida à planta se torna insuficiente para alimentar o sistema de maneira adequada, gerando baixa potência, inclusive potência mecânica útil.

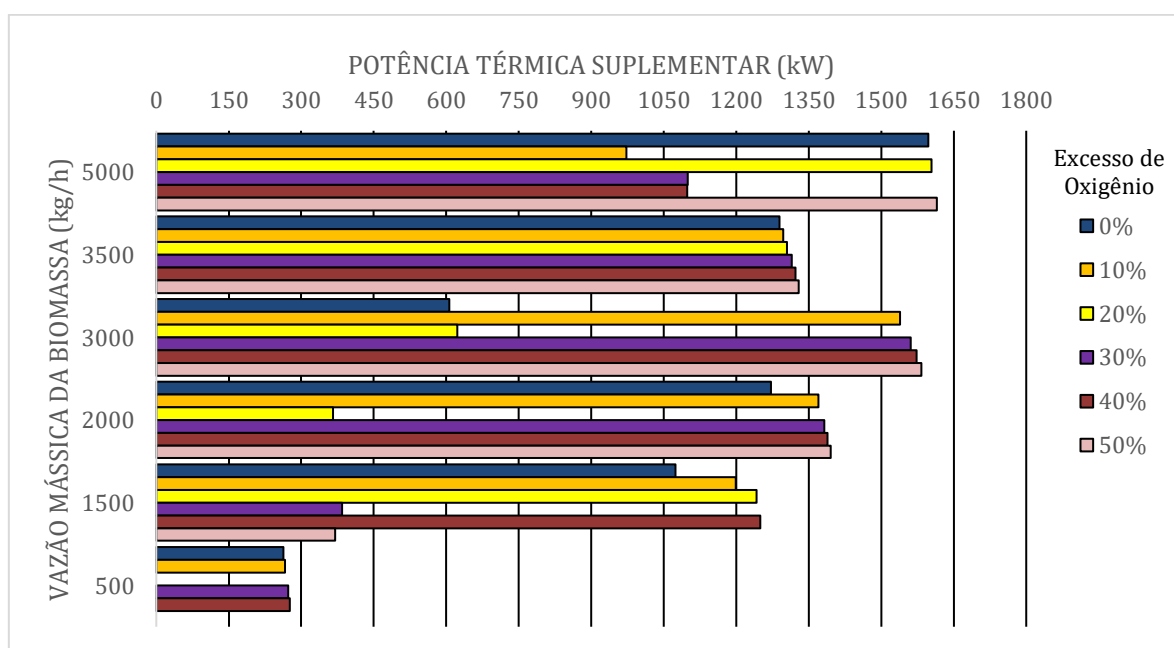
Em relação à vazão de oxigênio, de maneira geral, o excesso do gás permitiu melhores valores para a geração de potência na turbina, devido principalmente ao aumento da vazão dos gases de combustão no sistema.

Para 500 kg/h de biomassa com 30% e 50% de excesso de oxigênio, o *software* foi incapaz de simular o sistema, devido a falhas no cálculo das reações de combustão.

4.4 ENERGIA SUPLEMENTAR

Após saírem da turbina, os gases de exaustão passam por um trocador de calor para o aquecimento da água que será reutilizada no sistema. Porém, essa troca de energia térmica não é suficiente para a água alcançar a temperatura de 450 °C requerida pelo sistema. Portanto, é necessário que se realize a queima suplementar de um combustível. Foi escolhido o metano como fonte para a queima suplementar. A potência térmica suplementar necessária é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Potência suplementar necessária



Fonte: Autor.

A queima suplementar foi modelada como uma combustão estequiométrica, e a quantidade de metano necessária para que se produzam as energias suplementares para cada caso se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 – Vazão molar de metano para queima suplementar em kmol/h

Enriquecimento O ₂	Vazão de biomassa (kg/h)					
	5000	3500	3000	2000	1500	500
0%	6,45	5,21	2,45	5,14	4,34	1,06
10%	3,93	5,24	6,22	5,53	4,84	1,07
20%	6,48	5,27	2,52	1,48	5,01	0,00
30%	4,44	5,31	6,31	5,58	1,55	1,10
40%	4,44	5,34	6,35	5,61	5,05	1,12
50%	6,52	5,37	6,39	5,64	1,50	0,00

Fonte: Produção do próprio autor

4.5 ENERGIA TÉRMICA GERADA PELO SISTEMA

Para a geração de energia térmica, foi modelado um sistema de separação de compostos. O vapor d'água presente nos gases de combustão foi separado para que, a partir de seu resfriamento, fosse gerado calor para utilização em outro processo. As Tabelas 7 e 8 apresentam a fração mássica de vapor e sua temperatura, respectivamente, em função das diferentes configurações de planta.

Tabela 7 – Vazão mássica de vapor em kg/h

Vazão de biomassa (kg/h)					
5000	3500	3000	2000	1500	500
220,57	265,02	397,21	399,34	342,37	156,70

Fonte: Produção do próprio autor

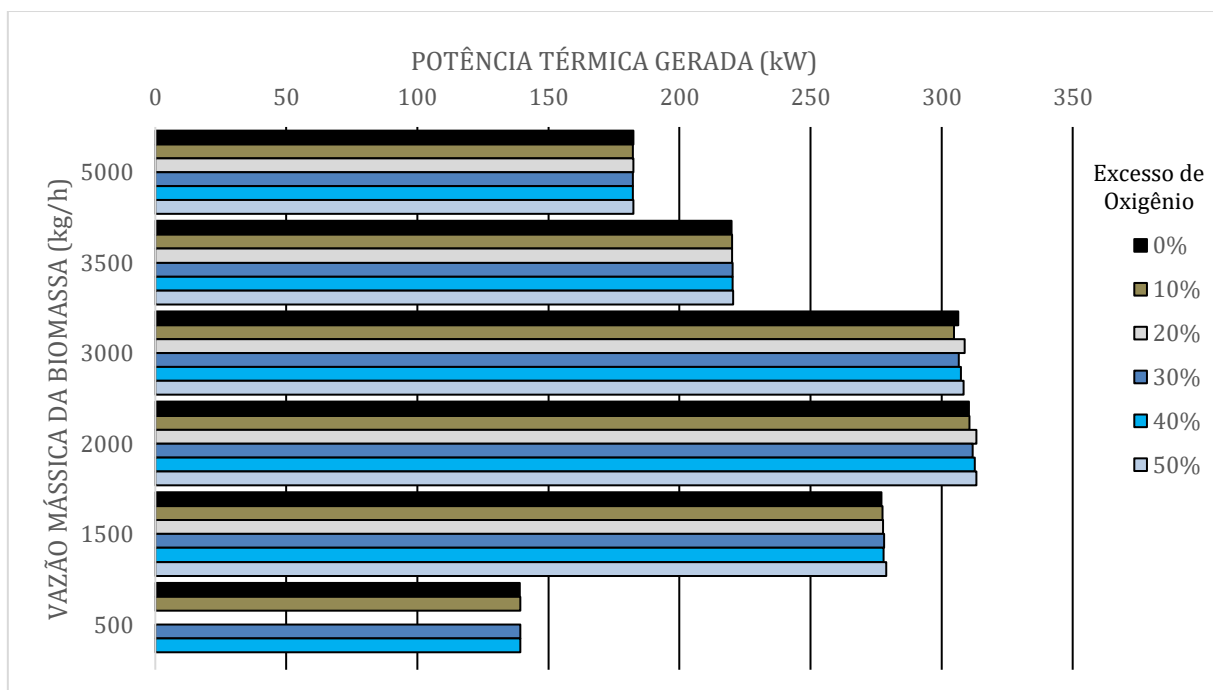
Tabela 8 – Temperatura do vapor em °C

Enriquecimento O ₂	Vazão de biomassa (kg/h)					
	5000	3500	3000	2000	1500	500
0%	256,03	261,52	153,90	164,64	224,47	366,31
10%	255,38	262,28	146,42	166,46	225,94	366,31
20%	256,08	262,70	165,26	178,68	226,83	-
30%	255,28	263,84	154,37	171,98	229,65	366,32
40%	255,39	264,71	158,76	175,40	228,16	366,33
50%	256,25	265,60	163,13	178,46	233,68	-

Fonte: Produção do próprio autor

Para a geração da energia térmica, o resfriador do vapor foi configurado para ejetar água à temperatura de 25 °C. Os valores de potências térmicas produzidas em função da vazão de biomassa e excesso de oxigênio são apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Potência térmica gerada pelo vapor



Fonte: Autor.

É verificado que a energia térmica gerada é influenciada quase que somente pela vazão de biomassa, novamente relacionando uma melhoria na geração energética com uma maior produção de gás de síntese rico em metano e monóxido de carbono. Todavia, um pequeno acréscimo na potência térmica produzida foi verificado com o excesso de 50% de oxigênio para a maioria dos casos. Uma possível explicação seria que, mesmo produzindo um gás de combustão com menor temperatura, a mistura com excesso de oxigênio apresentou valores de condutividade térmica menores, diminuindo um pouco a quantidade de calor trocado entre os gases de combustão e a água de recirculação do sistema, gerando na entrada do resfriador um vapor d'água com a temperatura levemente aumentada.

4.6 PODERES CALORÍFICOS

Os poderes caloríficos necessários para a realização da análise energética do sistema foram obtidos por meio da energia térmica liberada na combustão dos compostos por unidade de massa adentrando o sistema. Para validação da planta apresentada na Figura 4, foram realizadas as combustões do etanol, metanol e propano. Os valores obtidos foram comparados com os da literatura (QEPEQ, 2004). A Tabela 9 apresenta uma comparação entre os valores gerados pela simulação e aqueles da literatura.

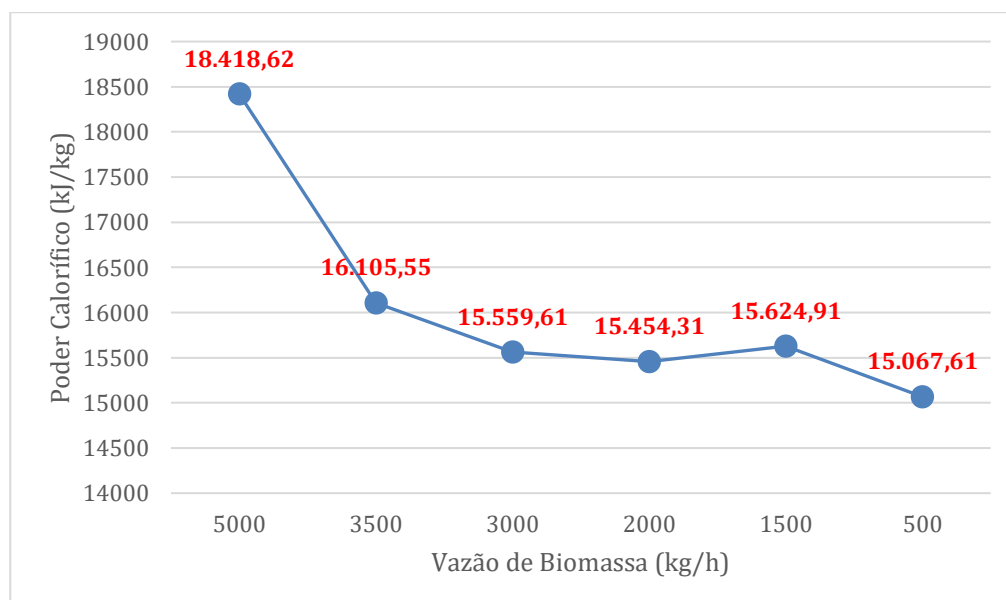
Tabela 9 – Poderes caloríficos de alguns combustíveis

Combustíveis	Simulação	Literatura	Desvio
Etanol	7134,44 kcal/kg	7090 kcal/kg	-0,62%
Metanol	5446,03 kcal/kg	5311 kcal/kg	-2,48%
Propano	12065,90 kcal/kg	11950 kcal/kg	-0,96%

Fonte: Produção do próprio autor

Como o valor de desvio obtido foi muito pequeno, optou-se por utilizar a planta termodinâmica da Figura 4 para estimar o poder calorífico do bio-óleo e do gás de síntese. O poder calorífico da biomassa foi estimado em 18563,14 kJ/kg, enquanto o poder calorífico do bio-óleo variou em função da vazão de biomassa no sistema, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Poder calorífico do bio-óleo



Fonte: Autor.

4.7 ANÁLISE ENERGÉTICA

Para a análise energética, foi considerado o parâmetro de eficiência energética, sendo simplesmente a razão entre a energia útil que se obtém do sistema e a energia que adentra o mesmo. Dessa forma, foram consideradas as potências mecânicas consumida e gerada pelo compressor e turbina, a energia térmica retirada do vapor d'água e as energias químicas da biomassa, do metano suplementar e do bio-óleo. A Tabela 10 apresenta as energias químicas da biomassa e do bio-óleo para os diferentes casos de análise da planta.

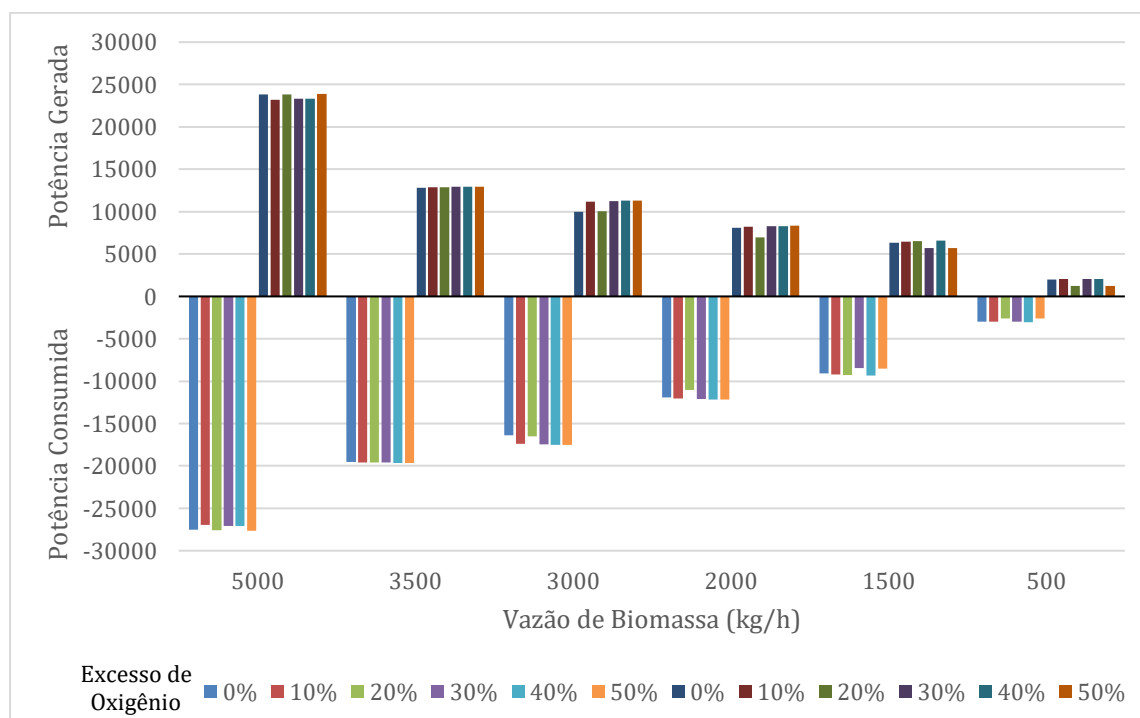
Tabela 10 – Energia gerada pela biomassa e pelo bio-óleo por unidade de tempo (kJ/s)

Bio-produto	Vazão de biomassa (kg/h)					
	5000	3500	3000	2000	1500	500
Biomassa	25782,14	18047,50	15469,29	10312,86	7734,64	2578,21
Bio-óleo	22813,66	11784,79	9312,64	6210,87	4784,83	1250,05

Fonte: Produção do próprio autor

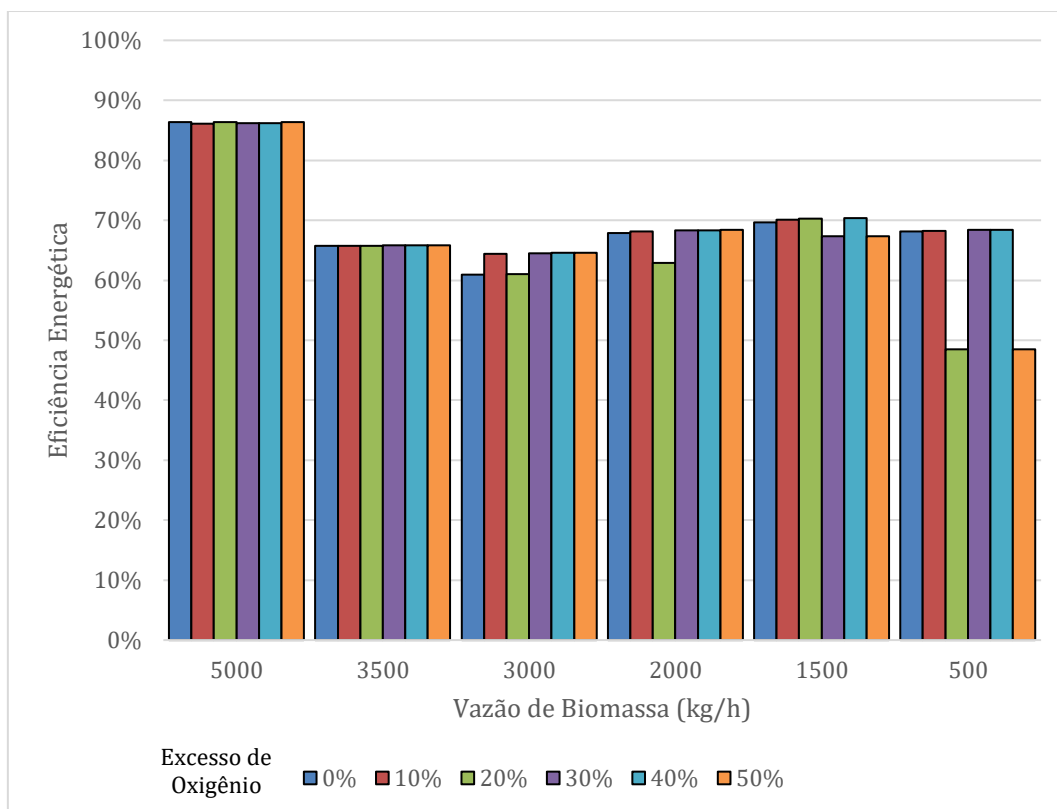
Em posse de todos os dados, a eficiência energética foi calculada. A Figura16 apresenta as potências de entrada e de saída do sistema, e a Figura 17, a eficiência energética do sistema.

Figura 16 – Potência gerada e consumida pelo sistema em kW



Fonte: Autor.

Figura 17 – Eficiência energética do sistema



Fonte: Autor.

Dessa forma, a maior eficiência energética é obtida com a maior vazão de biomassa, variando pouco entre 2000 e 500 kg/h de biomassa, conforme apresentado na Figura 17. Contudo, mesmo sendo um bom parâmetro de análise, é necessário verificar as quantidades de cada tipo de energia que são geradas em cada caso. Na Tabela 11 encontram-se as vazões que permitem a maior geração para cada tipo de energia.

Tabela 11 – Vazão de biomassa e excesso de oxigênio para a maior geração de energia

Tipo de energia	Vazão mássica de biomassa (kg/h)	Excesso de oxigênio
Mecânica útil	2000	50%
Térmica	2000	20%
Química (bio-óleo)	5000	-

Fonte: Produção do próprio autor

Por mais que tenha fornecido a melhor eficiência energética, a vazão de 5000 kg/h de biomassa chega a esse patamar devido à grande produção de bio-óleo. Porém, a essa vazão, a produção de gás de síntese é baixa, levando a uma baixa produção de energia mecânica por parte da turbina e uma baixa produção de calor no resfriador. Graças à baixa quantidade

de gás de síntese produzida, a energia consumida pelo compressor também é baixa, visto que menos oxigênio é necessário para a combustão.

Para a vazão de biomassa de 3500 kg/h, as conclusões são semelhantes às aquelas para a maior vazão, visto que a produção de bio-óleo foi acentuada para esse caso.

Com as vazões de 3000, 2000 e 1500 kg/h de biomassa, a energia mecânica obtida da turbina foi maior, com um acréscimo na energia térmica produzida quando em comparação com as vazões maiores. A vazão de bio-óleo, por menor que tenha sido nessas condições, apresentou valores adequados. De uma forma geral, foram nesses casos em que se obteve um funcionamento mais balanceado da planta termodinâmica, com destaque para a vazão de 2000 kg/h e excesso de oxigênio de 50%.

Para a menor vazão de biomassa analisada, os valores foram os mais baixos para todos os tipos de energia, de forma que, por mais que a maior geração de potências (mecânica/elétrica e térmica) estivesse relacionada com uma fração de água supercrítica por biomassa abaixo de 1:1, o valor de 500 kg/h de biomassa representa uma quantidade de matéria orgânica muito baixa para alimentar o sistema de maneira satisfatória.

Por fim, a Tabela 12 apresenta os parâmetros dos principais fluxos para o funcionamento da planta com vazão de 2000 kg/h de biomassa e excesso de oxigênio na combustão de 50%, sendo essa a condição tomada como ótima.

Tabela 12 – Parâmetros de fluxos para a condição ótima

Parâmetros	VA	H2O R	GS3	GC2	GC1	FSC	BO	ASC
Temperatura (°C)	25,00	154,28	134,44	2404,33	4343,70	404,88	154,28	450,00
Pressão (bar)	1,01	251,00	251,00	1,01	251,00	251,00	251,00	251,00
Fluxo de Massa (kg/h)	399,30	4914,10	622,80	1934,75	1934,75	7000,00	1447,29	5000,00

Fonte: Produção do próprio autor

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos por meio das simulações indicam que a razão entre a quantidade de biomassa e a água de alimentação do sistema é um dos parâmetros de maior importância para o processo de gaseificação de biomassa empregando água no estado supercrítico. Tal parâmetro exerce uma influência direta na composição e na vazão dos bio-produtos. A geração de potência mecânica na turbina, a qual é convertida em potência elétrica por meio de um gerador, está diretamente correlacionada com a composição e vazão mássica do gás de síntese.

Ao sofrer a oxidação, o gás de síntese origina os gases de combustão, que têm como função a transmissão de momento aos rotores da turbina, o pré-aquecimento da água que será reutilizada no processo e a geração de calor a partir do resfriamento de vapor d'água contido em sua composição. Nesse contexto, a mistura gás de síntese e oxigênio é um fator importante. O estudo mostrou que um enriquecimento da mistura proporciona uma maior geração de potência mecânica na turbina. Inclusive, por mais que a potência consumida no compressor tenha aumentado com o acréscimo de oxigênio injetado, a potência mecânica útil no sistema foi beneficentemente afetada pelo excesso de oxigênio.

A produção de energia térmica pouco foi afetada pela quantidade de oxigênio, sendo essa quantidade majoritariamente dependente da vazão de biomassa. Basicamente, da mesma forma como para a geração de potência mecânica/elétrica, a potência térmica gerada apresentou melhores valores com a diminuição da vazão de biomassa até 2000 kg/h, decrescendo em valores para vazões mais baixas. Com relação à energia térmica suplementar proveniente da queima de metano, foi observada a ocorrência de altos valores para todas as situações, apresentando uma tendência de decrescimento com a menor vazão de biomassa e menores valores de excesso de oxigênio na combustão.

De uma forma geral, ao se diminuir a vazão de biomassa, há um ganho na produção do gás de síntese e uma perda na produção do bio-óleo. O ganho na produção do gás de síntese levou a bons rendimentos de potência mecânica/elétrica e térmica. Contudo, ao se diminuir excessivamente a vazão de biomassa, como pode ser observado a partir da vazão de 1500 kg/h e, principalmente, na vazão de 500 kg/h, os rendimentos da planta tendem a diminuir. Isso ocorre porque essas quantidades de biomassa são muito pequenas para alimentar o sistema termo quimicamente. Basta analisar o fluído supercrítico na fase vapor, pois as reações de reforma a vapor, deslocamento gás/água e metanação ocorrem nessa fase. Ao se diminuir excessivamente a vazão de biomassa, a fase de vapor do fluído

supercrítico apresenta altíssima fração de água, com as mais baixas quantidades de xilose, glicose e fenol, gerando pouco gás de síntese, com quantidades cada vez maiores de dióxido de carbono, resultando em um produto de combustão mais pobre energeticamente.

Com relação à eficiência energética, a melhor vazão foi a de 5000 kg/h de biomassa. Contudo, isso se deve ao fato de que a produção de bio-óleo, um produto altamente energético, foi acentuada nesse cenário. Um funcionamento muito mais balanceado da planta foi observado para os valores de 3000 a 1500 kg/h de biomassa. Devido aos maiores valores na produção de energia mecânica/elétrica e calor e boa produção de bio-óleo, a vazão de 2000 kg/h foi escolhida como a ideal nesse estudo, com destaque para a combustão enriquecida com 50% de oxigênio.

REFERÊNCIAS

- AHMED, I. I. *et al.* Sugarcane bagasse gasification: global reaction mechanism of syngas evolution. **Applied Energy**, Londres, v. 91, n. 1, p. 75-81, mar. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911004466>. Acesso em: 12 set, 2023.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN) 2023: ano base 2022. Rio de Janeiro, EPE [Empresa de Pesquisa Energética], 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.
- CALVO-FLORES, F. *et al.* Lignin as renewable raw material. **ChemSusChem**, Weinheim, v. 3, n. 11, p. 1227-1235, nov. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.201000157>. Disponível em: <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cssc.201000157>. Acesso em: 18 set. 2023.
- CAO, W. *et al.* Assessment of sugarcane bagasse gasification in supercritical water for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 43, n. 30, p. 13711-13719, jul. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917346487>. Acesso em: 12 set. 2023.
- CARVALHO, N. B. *et al.* How likely is Brazil to achieve its NDC commitments in the energy sector: a review on brazilian low-carbon energy perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 133, p. 110343, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110343>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120306316>. Acesso em: 3 out. 2023.
- CASTRO, A. J. A. *et al.* Gaseificação do bagaço de cana-de-açúcar: modelagem, análise e comparação com sistema real. **Exacta**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 39-47, 2009. Disponível em <https://www.redalyc.org/pdf/810/81012760005.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2023.
- CLIMATE CHANGE 2023: synthesis report. Genebra, IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf. Acesso em: 03 ago. 2023.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 10 ago. 2023.
- DENTELLO, R. O. **Estudo das características fluidodinâmicas do bagaço de cana de açúcar para aplicações da gaseificação no setor sucroalcooleiro**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/0e508c89-7a8e-4f08-a9cd-ed8357c9dbc9>. Acesso em: 8 nov. 2023.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Papel da biomassa na expansão da geração de energia elétrica. **Documento de Apoio ao PNE**, v. 2050, dez. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Biomassa%20e%20Expans%C3%A3o%20de%20Energia.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Plano nacional de energia (PNE) 2050**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 25 set. 2023.

GUO, L *et al.* Supercritical water gasification research and development in China. **The Journal of Supercritical Fluids**, Cincinnati, v. 96, p. 144-150, jan 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.supflu.2014.09.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896844614003003>. Acesso em: 14 set. 2023.

HASSAN, T. N. *et al.* Simulating combined cycle and gas turbine power plant under design condition using open-source software DWSIM: a comparative study. **ARO-The Scientific Journal of Koya University**, Koya, v. 11, n. 1, p. 60-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.14500/aro.11098>. Disponível em: <https://aro.koyauniversity.org/index.php/aro/article/view/1098>. Acesso em: 21 out. 2023.

HU, Y. *et al.* Supercritical water gasification of biomass model compounds: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 118, p. 109529, fev. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109529>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119307373>. Acesso em: 14 set. 2023.

LETELLIER, S. *et al.* Gasification of aqueous biomass in supercritical water: a thermodynamic equilibrium analysis. **The Journal of Supercritical Fluids**, Cincinnati, v. 51, n. 3, p. 353-361, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2009.10.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896844609003659>. Acesso em: 21 set. 2023.

LI, H. *et al.* Supercritical water gasification of lignocellulosic biomass: development of a general kinetic model for prediction of gas yield. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 433, p. 133618, abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133618>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894721051925>. Acesso em: 24 out. 2023.

MARIAS, F. *et al.* Energetic analysis of gasification of aqueous biomass in supercritical water. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 1, p. 59-73, jan. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.030>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953410002874>. Acesso em: 21 set. 2023.

NANDA, S. *et al.* Subcritical and supercritical water gasification of lignocellulosic biomass impregnated with nickel nanocatalyst for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 41, n. 9, p. 4907-4921, mar. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.060>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915304961>. Acesso em: 24 out. 2023.

NORFARHANA, A. S. *et al.* Revolutionizing lignocellulosic biomass: a review of harnessing the power of ionic liquids for sustainable utilization and extraction. **International Journal of Biological Macromolecules**, Guildford, v. 256, p.128256, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128256>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813023051553>. Acesso em: 21 out. 2023.

OKOLIE, J. A. *et al.* Chemistry and specialty industrial applications of lignocellulosic biomass. **Waste and Biomass Valorization**, [s.l.], v. 12, p. 2145-2169, jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01123-0> Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-020-01123-0>. Acesso em: 18 set. 2023.

QEPEQ. **Interações e transformações I**: elaborando conceitos sobre transformações químicas. São Paulo: EDUSP. 2004.

RIBEIRO, A. P. *et al.* Residual biomass energy potential: perspectives in a peripheral region in Brazil. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [s.l.], v. 21, p. 733-744, fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01675-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-019-01675-3>. Acesso em: 3 out. 2023.

SAMAMAD, N. T. I. **Interação genótipos x ambientes dos teores de fibra e lignina em cana-de-açúcar**. 2011. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/4540>. Acesso em: 29 set. 2023.

SHRESTHA, S. *et al.* Different facets of lignocellulosic biomass including pectin and its perspectives. **Waste and Biomass Valorization**, [s.l.], v. 12, p. 4805-4823, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01305-w> Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-020-01305-w>. Acesso em: 18 set. 2023.

TANGSRIWONG, K. *et al.* Modeling of chemical processes using commercial and open-source software: a comparison between Aspen Plus and DWSIM. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s.l.], v. 463, p. 012057, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012057>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/463/1/012057/pdf>. Acesso em: 21 dez. 2023.

TEZER, Ö. *et al.* Biomass gasification for sustainable energy production: a review. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 47, n. 34, p. 15419-15433, abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.158>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922007728>. Acesso em: 14 set. 2023.

WANG, Q. *et al.* Advances in supercritical water gasification of lignocellulosic biomass for hydrogen production. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s.l.], v. 170, p. 105934, mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105934>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237023000785>. Acesso em: 14 set. 2023.

WANG, Y. *et al.* Thermodynamic and environmental analysis of heat supply in pig manure supercritical water gasification system. **Energy**, Oxford, v. 263, p. 125694, jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125694>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222025804>. Acesso em: 12 set. 2023.

YAN, S. *et al.* A conceptual biomass liquefaction system with supercritical water for bio-oil, power and heating trigeneration: thermodynamic and environmental analysis. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 244, p. 114474, set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114474>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421006506>. Acesso em: 12 set. 2023.

YU, O. *et al.* Lignin to materials: a focused review on recent novel lignin applications. **Applied Sciences**, Basileia, v. 10, n. 13, p. 4626, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10134626>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/13/4626>. Acesso em: 18 set. 2023.

YÜREK, Y. *et al.* Socio-political evaluation of renewable energy resources under uncertain environment. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, [s.l.], v.126, p. 106881, nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106881>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197623010655>. Acesso em: 21 set. 2023.

ZHANG, F. *et al.* Thermodynamic analysis of a supercritical water gasification - oxidation combined system for sewage sludge treatment with cool wall reactor. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 247, p. 114708, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114708>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421008840>. Acesso em: 12 set. 2023.

ZHANG, X. *et al.* Mechanism of supercritical water gasification of corn stover for hydrogen-rich syngas: composition of reaction products. **Energy**, Oxford, v. 288, p. 129767, feb. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129767>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223031614>. Acesso em: 21 out. 2023.