

Geração combinada de eletricidade, calor e bio-óleo a partir da gaseificação de biomassa lignocelulósica com água supercrítica: uma análise termodinâmica

Miguel Queiroz Viveiro Gomes¹, Thiago Averaldo Bimestre²

¹Instituto de Pesquisa em Bioenergia, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, UNESP, Brasil. Email: miguel.viveiros@unesp.br

²Instituto de Pesquisa em Bioenergia, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, UNESP, Brasil. Email: thiago.bimestre@unesp.br

Resumo

A crescente preocupação com a sustentabilidade energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa tem impulsionado a busca por fontes renováveis de energia. Nesse contexto, a gaseificação de biomassa tem se destacado como uma promissora alternativa para a produção de gás de síntese, um combustível versátil e limpo. A gaseificação com emprego de água supercrítica é um processo combinado de decomposição térmica e hidrólise para converter a biomassa úmida em gás de síntese. O processo evita a necessidade de uma etapa de pré-secagem intensiva em energia e precisa de tempos de residência relativamente mais curtos quando comparado à gaseificação convencional. A principal característica da gaseificação com água supercrítica é obter o gás de síntese rico em hidrogênio, minimizando a formação de carvão e alcatrão que provocam problemas importantes para as operações industriais, especialmente relacionados ao entupimento de tubulações e danos para as partes mecânicas dos dispositivos de conversão de energia. Sistemas avançados de conversão de energia baseados em biomassa são essenciais para uma utilização altamente eficiente da energia nela contida. Embora esses sistemas possam alcançar a conversão da biomassa em produtos valiosos, a recuperação de calor residual tem sido ignorada, resultando em menor eficiência energética e exérgica de todo o sistema. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi modelar e avaliar conceitualmente um sistema de gaseificação de biomassa com água supercrítica para trigeração - geração combinada de bio-óleo, eletricidade e calor. O fluxo de massa e energia do processo geral foi configurado utilizando o software de processos termoquímicos de código aberto DWSim, com detalhamento do fluxo de energia para todo o sistema. Quanto à biomassa escolhida para estudo, foi selecionado o bagaço da cana de açúcar por ser esta biomassa uma das principais *commodities* produzidas no Brasil. Parâmetros chave importantes na eficiência energética do sistema, como a temperatura de operação (450°C), pressão (251bar), razão de água de recirculação (50%), concentração de biomassa (35%) e porcentagem de oxigênio na queima (50%) foram avaliados. Os resultados da pesquisa revelaram que a maior eficiência energética obtida foi de 70,7% a 500°C e 221 bar para 2000 kg/h com 50% de oxigênio. Além disso vazões menores de biomassa promovem a formação mais significativa de gás de síntese, resultando em uma maior produção de trabalho mecânico e energia térmica, embora isso venha acompanhado de uma redução na produção de bio-óleo. A análise comparativa da eficácia termodinâmica deste sistema com outros métodos de conversão de energia baseados em biomassa demonstrou que a gaseificação de biomassa com o uso de água supercrítica é uma abordagem relativamente eficiente e ambientalmente amigável.

Palavras-chave: gaseificação com água supercrítica, biomassa lignocelulósica, análise termodinâmica.

Abstract

The growing concern with energy sustainability and the reduction of greenhouse gas emissions has driven the search for renewable energy sources. In this context, biomass gasification has emerged as a promising alternative to produce synthesis gas, a versatile and clean fuel. Gasification using supercritical water is a combined process of thermal decomposition and hydrolysis to convert wet biomass into synthesis gas. The process avoids the need for an energy-intensive pre-drying stage and requires relatively shorter residence times compared to conventional gasification. The main feature of gasification with supercritical water is to obtain hydrogen-rich synthesis gas, minimizing the formation of char and tar that cause major problems for industrial operations, especially related to

pipe clogging and damage to the mechanical parts of energy conversion devices. Advanced energy conversion systems based on biomass are essential for highly efficient use of the energy contained therein. Although these systems can achieve the conversion of biomass into valuable products, the recovery of residual heat has been ignored, resulting in lower energy and exergetic efficiency of the entire system. The aim of this work was to conceptually model and evaluate a biomass gasification system with supercritical water for trigeneration - the combined generation of bio-oil, electricity and heat. The mass and energy flow of the overall process was configured using the open-source thermochemical process software DWSim, detailing the energy and exergy flow for the entire system. The biomass chosen for the study was sugar cane bagasse, which is one of the main commodities produced in Brazil. Key parameters important in the energy efficiency of the system, such as operating temperature (450°C), pressure (251 bar), recirculation water ratio (50%), biomass concentration (35%) and percentage of oxygen in the burner (50%) were evaluated. The results of the research revealed that the highest energy efficiency obtained was 70.7% at 500°C and 221 bar for 2000 kg/h with 50% oxygen. In addition, lower biomass flow rates promote more significant synthesis gas formation, resulting in greater production of mechanical work and thermal energy, although this is accompanied by a reduction in bio-oil production. Comparative analysis of the thermodynamic efficiency of this system with other biomass-based energy conversion methods has shown that biomass gasification using supercritical water is a relatively efficient and environmentally friendly approach.

Keywords: supercritical water gasification, lignocellulosic biomass, thermodynamic analysis.

1. Introdução

Com o aumento da demanda por energia elétrica devido à densidade populacional e ao crescimento econômico global, torna-se evidente a necessidade de buscar novas fontes energéticas em substituição aos combustíveis fósseis limitados [1]. A bioenergia surge como uma solução para reduzir a forte dependência desses combustíveis e cumprir as metas globais de redução de emissões de gases de efeito estufa estabelecidas pelo acordo de Paris [2,3].

Nas últimas décadas, a energia proveniente da biomassa tem consistentemente ocupado a quarta posição como fonte global de energia, representando de 10% a 14% do consumo final, ficando atrás apenas do carvão, gás natural e eletricidade [4]. Estima-se que até 2050, a biomassa contribuirá com cerca de 30% do fornecimento global de energia primária [5]. A biomassa é abundante e disponível em muitos locais, incluindo resíduos agroindustriais e urbanos, além de ser uma fonte renovável e de baixo custo.

Existem diferentes processos para produzir energia a partir da biomassa, classificados em processos bioquímicos-biológicos e processos termoquímicos [6,7]. Os processos bioquímicos envolvem a digestão anaeróbica, que converte a biomassa orgânica em gás de síntese, seguida pela fermentação alcoólica, na qual os carboidratos são convertidos em etanol e outros produtos por micro-organismos [8,9]. Já os processos termoquímicos ocorrem em condições especiais de alta temperatura e/ou pressão, permitindo a conversão da biomassa em produtos líquidos, sólidos ou gasosos [10]. Geralmente, os processos termoquímicos são mais eficientes devido ao menor tempo de reação necessário (segundos ou minutos), enquanto os processos bioquímicos podem levar dias ou semanas [11].

A gaseificação é uma forma útil de aproveitar a biomassa. Nesse processo, a biomassa é transformada

em gás de síntese, composto principalmente por hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO), além de contaminantes como sulfureto de carbonila (COS) e sulfureto de hidrogênio (H_2S). Esses contaminantes são removidos em uma etapa de tratamento, resultando em um gás de síntese puro. Esse gás pode ser utilizado de várias maneiras, como na produção de hidrogênio como combustível [12], na geração de energia [13] e na produção de líquidos químicos por meio do processo Fischer-Tropsch, como metanol e etanol [14].

Entretanto, a gaseificação é um processo limitado pela baixa qualidade do produto gasoso, uma vez que o gás de síntese frequentemente contém impurezas como carvão e alcatrão [15]. Esses aspectos causam problemas significativos nas operações industriais, especialmente relacionados ao entupimento de tubulações e danos às partes mecânicas dos dispositivos de conversão de energia, como motores e turbinas [16].

Além disso, devido ao alto teor de água presente na biomassa, os métodos tradicionais de gaseificação exigem uma etapa de secagem, que consome considerável quantidade de energia, reduzindo a eficiência do processo [17].

Para superar esses inconvenientes, a gaseificação com água supercrítica é proposta como um método viável para aumentar o rendimento e a qualidade dos produtos gerados.

Acima da temperatura crítica (374°C) e da pressão crítica (22,1 MPa) [18], a água possui uma massa específica semelhante à dos líquidos e alta compressibilidade e difusividade, características semelhantes aos gases. Isso a torna um solvente poderoso para a despolimerização e extração de compostos orgânicos [19-21].

A alta condutividade térmica da água supercrítica também beneficia reações químicas de reforma endotérmica [22]. Além disso, sua massa específica é

maior do que a do vapor, o que permite projetar reatores e trocadores de calor mais compactos [23].

Uma das principais características da gaseificação em água supercrítica é a baixa produção de carvão e alcatrão em comparação com as tecnologias convencionais [24]. Essa observação despertou o interesse inicial nesse método.

Além disso, em comparação com os métodos tradicionais de gaseificação, o processo em água supercrítica apresenta alta eficiência de reação e rendimentos elevados de hidrogênio (H_2), uma vez que a água atua como meio de reação e não é necessário secar a biomassa antes do processo. Portanto, para biomassa úmida contendo 90% de água, a gaseificação parece ser uma opção sustentável [25].

Os componentes da biomassa lignocelulósica podem se decompor em moléculas simples durante o processo de gaseificação com água supercrítica, resultando na produção do gás de síntese. Diversos tipos de biomassa, como esterco [26], lodo de esgoto [27], restos de alimentos [28], algas [29] e resíduos de biorrefinarias, como o bagaço de cana-de-açúcar [30], já foram gaseificados utilizando esse método.

Durante o processo de gaseificação por água supercrítica, a biomassa é inicialmente decomposta em bio-óleo e gás de síntese por meio de uma série de reações termoquímicas. Considerando a dificuldade de armazenamento e transporte do gás de síntese, vários estudos [31,32] sobre modelagem de sistemas de conversão de energia propuseram a conversão da energia contida no gás de síntese de alta temperatura em formas de energia útil, incluindo eletricidade e calor.

Com base nessas observações, um novo sistema de gaseificação de biomassa por água supercrítica para produção combinada de bio-óleo, energia e calor, ou seja, trigeração, é proposto para melhorar a eficiência de conversão de energia.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a viabilidade e perspectiva desse novo sistema de trigeração, com a realização de uma análise termodinâmica com base nas condições de água supercrítica e verificar como parâmetros de processo como temperatura e pressão influenciam na potência e energia térmica disponível no sistema.

Até o momento, poucos estudos abordaram a análise termodinâmica do sistema de gaseificação por água supercrítica [33]. Um dos principais desafios é a falta de dados cinéticos detalhados para a gaseificação de biomassa, o que dificulta a modelagem da reação no reator de água supercrítica.

Para superar essa limitação, resultados experimentais serão utilizados neste estudo para modelar os produtos da gaseificação no reator de água supercrítica, garantindo resultados de simulação mais próximos da realidade.

2. Descrição do sistema proposto

A planta termodinâmica utilizada na modelagem é ilustrada na Figura 1. Inicialmente, a entrada de água supercrítica (ASC) ocorre à temperatura de 450°C e 251 bar de pressão e a biomassa (BM) é adicionada 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 produto do RGAS, tem-se o gás de síntese (GS) e bio-óleo (BO) misturados com água. 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 direcionados a uma turbina (TURB), que reduz a pressão até a pressão atmosférica, gerando trabalho mecânico (WT), o qual tem por objetivo a produção de energia elétrica. Os gases de combustão (GC2) escoam 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 do vapor (Q_s) pode então ser utilizada para aquecimento de ambiente, produção de compostos químicos, entre outros fins.

3. Metodologia

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 em [34] e [35]. DWSim é um *software* de processos modulares sequenciais, ou seja,

Tabela 1 – Características das máquinas de fluxo

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%

Tabela 2 – Características dos trocadores de calor

Parâmetros	Trocador de calor	Aquecedor	Resfriador
U	2000 W/(m²K)	-	-
Área de troca	2 m²	-	-
Fluxo	Contrafluxo	-	-
T saída	-	450°C	25°C
Eficiência	-	100%	100%

4. Avaliação Termodinâmica

A eficiência energética foi adotada para medir a performance energética do sistema de gaseificação com água supercrítica e geração combinada de eletricidade, calor e bio-óleo. A eficiência energética (η_{en}) é definida como a razão entre a saída de energia e a entrada como indica a equação (10):

$$\eta_{en} = \frac{E_{n,saída}}{E_{n,entrada}} \times 100\% \quad (10)$$

Onde: $E_{n,saída}$ (kJ/h) e $E_{n,entrada}$ (kJ/h) são as energias de saída e de entrada no sistema respectivamente. A energia de saída e de entrada podem ser calculadas pelas equações (11) e (12):

$$E_{n,saída} = E_{gasdesíntese} + E_{elétrica} + E_{calor} \quad (11)$$

$$E_{n,entrada} = E_{biomassa} + E_{GN\ suplementar} \quad (12)$$

Onde: $E_{biomassa}$ (kJ/h), $E_{gasdesíntese}$ (kJ/h) e $E_{GNsuplementar}$ (kJ/h) representam a energia da biomassa utilizada como matéria prima, do gás de síntese produzido e do gás natural respectivamente. $E_{elétrica}$ e E_{calor} são a eletricidade e o calor gerado pela planta de trigerção proposta em (kJ/h). $E_{biomassa}$, $E_{gasdesíntese}$ e $E_{GNsuplementar}$

podem ser calculados conforme as equações (13), (14) e (15):

$$E_{biomassa} = M_{biomassa} \times Q_{biomassa} \quad (13)$$

$$E_{gasdesíntese} = M_{gás} \times Q_{gás} \quad (14)$$

$$E_{GNsuplementar} = M_{GN} \times Q_{GN} \quad (15)$$

Onde: $M_{biomassa}$, $M_{gás}$ e M_{GN} é a vazão em massa da biomassa, do gás de síntese e do gás natural suplementar (kg/h) respectivamente. $Q_{biomassa}$, $Q_{gás}$ e Q_{GN} é o poder calorífico da biomassa, do gás de síntese e do gás natural respectivamente.

5. Resultados

Considerando a planta termodinâmica operando com uma vazão de biomassa de 2000 kg/h, com um excesso de 50% de oxigênio na combustão, foram analisadas as variações de pressão e de temperatura e sua influência na eficiência energética, na potência mecânica útil, na geração de energia térmica e na produção de bio-óleo do sistema.

Os valores de pressão experimentados foram de 221 bar, 251 bar e 300 bar, enquanto a temperatura foi variada entre 400°C e 550°C, em acréscimos de 50°C. Na Figura 2 encontram-se as curvas de eficiência energética. Pode-se observar que a eficiência energética foi favorecida pelo aumento da pressão até a temperatura de 450 °C, apresentando valores próximos para pressão de operação de 251 bar e 300 bar. Contudo, para temperaturas mais elevadas, a eficiência apresentou melhores valores para a pressão de 221 bar. No geral, a eficiência energética não apresentou diferença acentuada entre as pressões de 251 bar e 300 bar, tendo ficado entre 68% e 70,5%. A maior variação de eficiência ocorreu para 221 bar. Nesse cenário, a eficiência teve seu menor valor (66%) próximo dos 450°C, enquanto o maior valor foi próximo de 500°C (71%).

Quanto a potência mecânica útil do sistema, para as temperaturas de 400 e 450°C, a pressão teve influência significativa no trabalho líquido. Para 500 e 550°C, a influência da pressão foi mínima, apresentando valores de potência em torno de 1500 e 1600 kW, respectivamente. O maior valor de potência mecânica útil foi obtido para uma pressão e temperatura de operação de 300 bar e 450°C como se observa na Figura 3.

Com relação a energia térmica gerada, em todas as temperaturas estudadas, o menor valor encontrou-se no cenário cujo valor de pressão foi de 300 bar. Sendo que para essa pressão, nas temperaturas de 500 e 550°C, a energia térmica gerada foi bem próxima àquela obtida com uma pressão de operação de 251 bar.

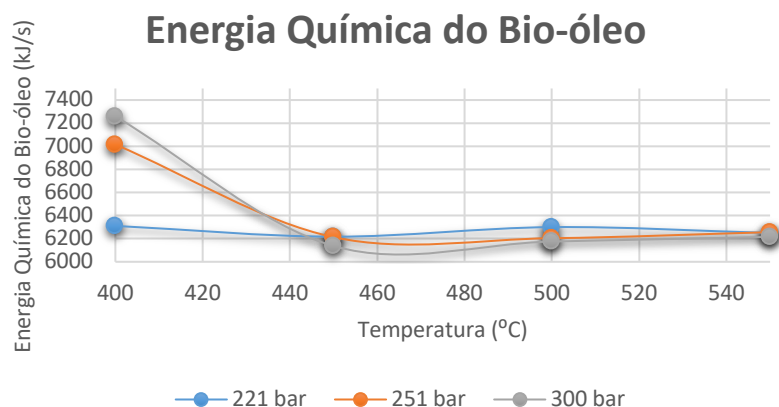


Figura 5. Energia química do bio-óleo. Fonte: elaboração própria.

Figura 2. Curvas de eficiência energética em função da temperatura. Fonte: elaboração própria.

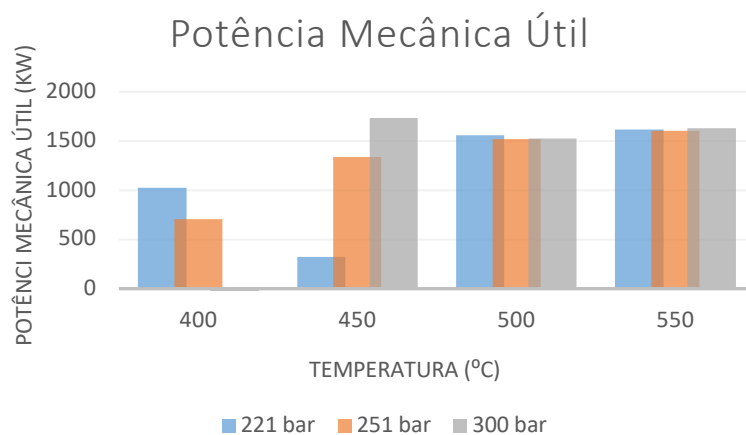


Figura 3. Potência Mecânica útil. Fonte: elaboração própria.

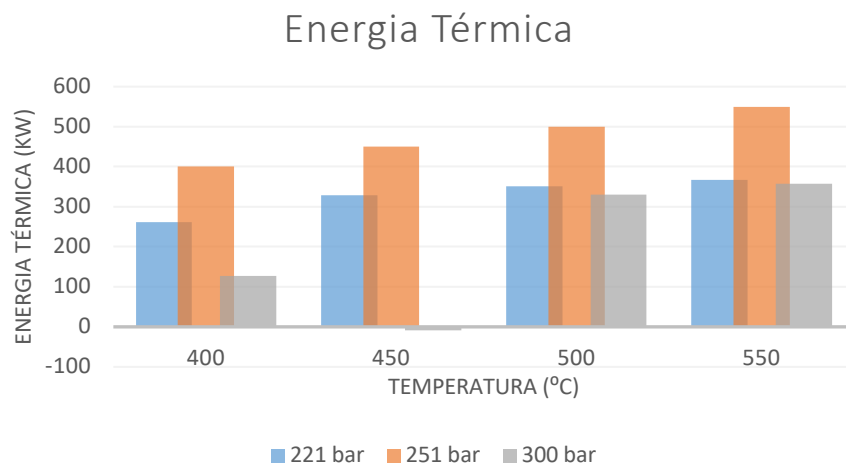


Figura 4. Energia térmica gerada. Fonte: elaboração própria.

Contudo, fica evidente que a melhor pressão para geração de energia térmica foi 251 bar, sendo o calor gerado positivamente afetado pelo aumento de temperatura como ilustra a Figura 4.

Analisando a energia química de bio-óleo gerada por unidade de tempo, para as temperaturas menores que 450°C, a produção foi significativamente favorecida a 221 bar e 251 bar, tendo essa produção decrescido conforme aumento de temperatura. Acima de 450°C, a diferença na produção de bio-óleo diminuiu drasticamente entre as pressões analisadas, e em 550°C podemos observar que a produção de energia química proveniente do bio-óleo para todos os casos se mostrou semelhante, em torno de 6200 kJ/s, como indicado na Figura 5.

A gaseificação de biomassa usando água em estado supercrítico apresenta várias vantagens que podem justificar o consumo de energia necessário para atingir e manter esse estado, dependendo da disponibilidade e custo da biomassa, do preço dos produtos gerados e da integração com sistemas de recuperação de energia.

A água em estado supercrítico atua como um solvente excelente e um agente de reação, promovendo a decomposição eficiente da biomassa em gases combustíveis, como hidrogênio, metano e monóxido de carbono, com alta eficiência de conversão. Além disso, o processo pode ser otimizado para maximizar a produção de hidrogênio, que tem aplicações crescentes em energia e transporte. Ainda nesta serra de vantagens, o processo de gaseificação com água supercrítica minimiza a formação de resíduos sólidos e alcatrões, simplificando o tratamento dos gases produzidos e evitando o entupimento de tubulações.

A SCWG é vantajosa também pelo fato da flexibilidade de matéria-prima, inclusive sendo eficaz para biomassas com alto teor de umidade. O processo também pode ser mais ambientalmente amigável, com menores emissões de poluentes comparado a outras técnicas de conversão. Por fim, o processo SCWG pode ser integrado com outras tecnologias de recuperação de calor e energia para melhorar a eficiência energética geral do sistema. O calor residual gerado pode ser reutilizado, melhorando ainda mais a eficiência do processo..

6. Conclusões

Neste estudo, foi proposto um sistema de gaseificação de biomassa lignocelulósica com água supercrítica para a trieração combinada de bio-óleo, eletricidade e calor. Foi adotado um método viável, reutilizando água a alta temperatura e gases de escape, para recuperação de calor residual. As principais conclusões em termos de desempenho termodinâmico são as seguintes:

(1) A maior eficiência energética obtida foi de 70,7%, na condição de operação ideal, onde a temperatura e a pressão do reator foram de 500°C e 221 bar. A condição ideal está relacionada a vazão de biomassa fixada em 2000 kg/h com 50% de oxigênio na queima e foi escolhida porque resultou na maior potência da turbina devido à combinação ideal de qualidade do gás de síntese e eficiência de combustão. Essa vazão produziu um gás de síntese de melhor qualidade para combustão, com maiores concentrações de CO e CH₄, além de proporcionar uma maior vazão mássica de gás de síntese.

(2) 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.

(3) A queima suplementar foi modelada como uma combustão estequiométrica, e a quantidade de metano necessária para se produzir a energia suplementar no caso estudado foi de 5,64 kg/h. 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. Para a configuração estudada a vazão mássica de vapor foi de 399,34 kg/h com temperatura de 178,46 °C. Foi 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.

(4) Em comparação com outros sistemas de conversão de energia a partir da biomassa, o sistema de gaseificação de biomassa com água supercrítica pode maximizar a eficiência térmica e minimizar as emissões. Para que esta tecnologia promissora progrida, há ainda vários desafios que têm de ser superados no futuro.

(5) O sistema proposto é um sistema de conversão de energia à base de biomassa comparativamente eficiente e limpo, com perspectivas promissoras de aplicação industrial. No entanto, esforços de pesquisas nesta área devem ser realizados para ultrapassar os desafios que se colocam no desenvolvimento desta tecnologia.

7. Referências

- [1] Chaudry, S., Bahri, P. A., & Moheimani, N. R. (2015). Pathways of processing of wet microalgae for liquid fuel production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1240–1250. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.005>
- [2] Galik, C. S., Abt, R. C., Latta, G., Méley, A., & Henderson, J. D. (2016). Meeting renewable energy and land use objectives through public–private biomass supply partnerships. *Applied Energy*, 172, 264–274. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.047>
- [3] Gopalan, N., Rodríguez-Duran, L. V., Saucedo-Castaneda, G., & Nampoothiri, K. M. (2015). Review on technological and scientific aspects of feruloyl esterases: A versatile enzyme for biorefining of biomass. *Bioresource Technology*, 193, 534–544. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.117>
- [4] Mafakheri, F., & Nasiri, F. (2014). Modeling of biomass-to-energy supply chain operations: Applications, challenges and research directions. *Energy Policy*, 67, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.071>
- [5] Ausilio Bauen, Göran Berndes, Junginger, M., Londo, M., & François Vuille. (2009). *Bioenergy - a Sustainable and Reliable Energy Source MAIN REPORT*.
- [6] Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 850–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>
- [7] Sikarwar, S. S., Surywanshi, G. D., Patnaikuni, V. S., Kakunuri, M., & Vooradi, R. (2020). Chemical looping combustion integrated Organic Rankine Cycled biomass-fired power plant – Energy and exergy analyses. *Renewable Energy*, 155, 931–949. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.114>
- [8] González-Vázquez, M. P., García, R., Gil, M. V., Pevida, C., & Rubiera, F. (2018). Comparison of the gasification performance of multiple biomass types in a bubbling fluidized bed. *Energy Conversion and Management*, 176, 309–323. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.020>
- [9] Campos, D. A., Gómez-García, R., Vilas-Boas, A. A., Madureira, A. R., & Pintado, M. M. (2020). Management of Fruit Industrial By-Products—A Case Study on Circular Economy Approach. *Molecules*, 25(2), 320. <https://doi.org/10.3390/molecules25020320>
- [10] Moradi, R., Marcantonio, V., Cioccolanti, L., & Bocci, E. (2020). Integrating biomass gasification with a steam-injected micro gas turbine and an Organic Rankine Cycle unit for combined heat and power production. *Energy Conversion and Management*, 205, 112464. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112464>
- [11] Chu, S., & Majumdar, A. (2022). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488(7411), 294–303. <https://doi.org/10.1038/nature11475>
- [12] Peng, W. X., Wang, L. S., Mirzaee, M., Ahmadi, H., Esfahani, M. J., & Fremaux, S. (2017). Hydrogen and syngas production by catalytic biomass gasification. *Energy Conversion and Management*, 135, 270–273. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.056>
- [13] Zhang, X., Li, H., Liu, L., Bai, C., Wang, S., Song, Q., Zeng, J., Liu, X., & Zhang, G.-Q. (2018). Exergetic and exergoeconomic assessment of a novel CHP system integrating biomass partial gasification with ground source heat pump. *Energy Conversion and Management*, 156, 666–679. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.075>
- [14] Rafati, M., Wang, L., Dayton, D. C., Schimmel, K., Kabadi, V., & Shahbazi, A. (2017). Techno-economic analysis of production of Fischer-Tropsch liquids via biomass gasification: The effects of Fischer-Tropsch catalysts and natural gas co-feeding. *Energy Conversion and Management*, 133, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.051>
- [15] Fan, J., Hong, H., Zhu, L., Jiang, Q., & Jin, H. (2017). Thermodynamic and environmental evaluation of biomass and coal co-fuelled gasification chemical looping combustion with CO₂ capture for combined cooling, heating and power production. 195, 861–876. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.093>
- [16] Johar, D. K., Sharma, D., & Soni, S. L. (2020). Comparative studies on micro cogeneration, micro cogeneration with thermal energy storage and micro trigeneration with thermal energy storage system using same power plant. *Energy Conversion and Management*, 220, 113082. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113082>
- [17] Chen, Y., Yi, L., Yin, J., Jin, H., & Guo, L. (2022). Sewage sludge gasification in supercritical water with fluidized bed reactor: Reaction and product characteristics. *Energy*, 239, 122115. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122115>
- [18] Okajima, I., & Sako, T. (2014). Energy conversion of biomass with supercritical and subcritical water using large-scale plants. *Journal of Bioscience and*

- Bioengineering, 117(1), 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2013.06.010>
- [19] Nalawade, S. P., Picchioni, F., & Janssen, L. P. B. M. (2006). Supercritical carbon dioxide as a green solvent for processing polymer melts: Processing aspects and applications. *Progress in Polymer Science*, 31(1), 19–43.
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2005.08.002>
- [20] Yan, S., Xia, D., & Xuan, W. (2020). New insight into enhancement effect of supercritical water on scrap tire depolymerization: A study based on ReaxFF-MD simulation and DFT method. *Fuel Processing Technology*, 200, 106309–106309.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106309>
- [21] Yan, S., Xia, D., Zhang, X., & Jiang, B. (2019). A complete depolymerization of scrap tire with supercritical water participation: A molecular dynamic simulation study. *Waste Management*, 93, 83–90.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.030>
- [22] Gadhe, J. B., & Gupta, R. B. (2005). Hydrogen Production by Methanol Reforming in Supercritical Water: Suppression of Methane Formation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(13), 4577–4585. <https://doi.org/10.1021/ie049268f>
- [23] Taylor, J. (2003). Hydrogen production in a compact supercritical water reformer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(11), 1171–1178.
[https://doi.org/10.1016/s0360-3199\(02\)00291-4](https://doi.org/10.1016/s0360-3199(02)00291-4)
- [24] Amin, S., Reid, R. C., & Modell, M. (1975). Reforming and decomposition of glucose in an aqueous phase. *Intersociety Conference on Environmental Systems*.
- [25] Calzavara, Y., Jousset-Dubien, C., Boissonnet, G., & Sarrade, S. (2005). Evaluation of biomass gasification in supercritical water process for hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 46(4), 615–631.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.04.003>
- [26] Youssef, E. A., Elbeshbishy, E., Hafez, H., Nakhla, G., & Charpentier, P. (2010). Sequential supercritical water gasification and partial oxidation of hog manure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(21), 11756–11767.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.097>
- [27] Chen, Y., Guo, L., Cao, W., Jin, H., Guo, S., & Zhang, X. (2013). Hydrogen production by sewage sludge gasification in supercritical water with a fluidized bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(29), 12991–12999.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.165>
- [28] Rattana Muangrat, Onwudili, J. A., & Williams, P. T. (2012). Reactions of different food classes during subcritical water gasification for hydrogen gas production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(3), 2248–2259.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.100>
- [29] Hydrothermal processing of microalgae using alkali and organic acids. (2010). *Fuel*, 89(9), 2234–2243. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.01.025>
- [30] Sheikhdavoodi, M. J., Almassi, M., Ebrahimi-Nik, M., Kruse, A., & Bahrami, H. (2015). Gasification of sugarcane bagasse in supercritical water; evaluation of alkali catalysts for maximum hydrogen production. *Journal of the Energy Institute*, 88(4), 450–458. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.10.005>
- [31] Chen, J., Xu, W., Zhang, F., Zuo, H., E, J., Wei, K., Liao, G., & Fan, Y. (2019). Thermodynamic and environmental analysis of integrated supercritical water gasification of coal for power and hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 198, 111927.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111927>
- [32] Yan, B., Xue, S., Li, Y., Duan, J., & Zeng, M. (2016). Gas-fired combined cooling, heating and power (CCHP) in Beijing: A techno-economic analysis. 63, 118–131.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.036>
- [33] Wang, C., Jin, H., Peng, P., & Chen, J. (2019). Thermodynamics and LCA analysis of biomass supercritical water gasification system using external recycle of liquid residual. *Renewable Energy*, 141, 1117–1126.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.129>
- [34] Tangsriwong, K., Lapchit, P., Kittijungjit, T., Klamrassamee, T., Sukjai, Y., & Laoonual, Y. (2020). Modeling of chemical processes using commercial and open-source software: A comparison between Aspen Plus and DWSIM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 463(1), 012057.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012057>
- [35] Hassan, T. N., & Manji, S. T. (2023). Simulating Combined Cycle and Gas Turbine Power Plant under Design Condition using Open-Source Software DWSIM. *ARO. The Scientific Journal of Koya University*, 11(1), 60–71.
<https://doi.org/10.14500/aro.11098>
- [36] Yan, S., Xia, D., Mao, R., & Liu, X. (2021). A conceptual biomass liquefaction system with supercritical water for bio-oil, power and heating trigeneration: Thermodynamic and environmental

analysis. *Energy Conversion and Management*, 244, 114474–114474.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114474>