

Avaliação de Diferentes tipos de Biomassas na Produção de GNV: Estudo Comparativo da Demanda de Água para Eletrólise

Braiam Wilhans Santos Haidman^{a*}, Lucas Bonfim-Rocha^b, Thiago Leandro De Souza^c

^aCurso de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina, Brasil

^bProfessor, Universidade Estadual de Maringá - Maringá, Brasil

^cProfessor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina, Brasil

*braiamhaidman@alunos.utfpr.edu.br

RESUMO

A presente investigação avalia o potencial de três biomassas socioeconomicamente relevantes (palha de milho, bagaço de cana-de-açúcar e palha de arroz) na produção de gás natural veicular (GNV) via gaseificação e metanação, com vistas à identificação de alternativas mais sustentáveis. Por meio de simulações no Aspen Plus, fundamentadas em modelo da literatura, comparou-se a produção de metano (CH_4) e o consumo de água destinada à eletrólise. As condições ótimas foram definidas em 800°C e 0,1 MPa para a gaseificação, e 300°C e 3 MPa para a metanação. Os resultados indicam que o bagaço de cana apresentou a maior vazão de GNV (52,70 kg/h). A palha de milho, por sua vez, destacou-se pelo melhor desempenho hídrico, com consumo específico de 1,80 kg $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$ CH_4 valor 20% inferior ao do bagaço de cana e 27% inferior ao da palha de arroz. Todas as biomassas geraram metano com pureza superior a 96%. Conclui-se que, embora o bagaço de cana tenha o maior rendimento, a palha de milho representa uma rota mais sustentável devido à sua menor demanda hídrica, evidenciando a importância de análises multicritério para a seleção de matérias-primas industriais.

Palavras-chave: Aspen Plus, Simulação, GNV, Sustentabilidade.

1. Introdução

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem acelerado a busca por fontes de energia renováveis e sustentáveis. Nesse cenário, a biomassa destaca-se como recurso energético versátil e de elevado potencial, especialmente os resíduos gerados em larga escala por diversos setores industriais. Estes materiais, muitas vezes de baixo custo e alta disponibilidade, incluem subprodutos como o bagaço da indústria sucroalcooleira, o licor negro da indústria de papel e celulose, e resíduos de serragem e processamento da indústria madeireira, que podem ser convertidos em biocombustíveis e energia (Kalak, 2023).

Para aproveitamento energético eficiente dessa diversidade de materiais, tecnologias de conversão avançadas são necessárias. Uma das rotas termoquímicas mais promissoras é a gaseificação, um processo que ocorre em altas temperaturas e na presença controlada de um agente gaseificante para converter a biomassa sólida em um gás combustível. Este gás, conhecido como gás de síntese ou "syngas", é rico em hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). A composição e a qualidade do syngas são cruciais para suas aplicações posteriores e dependem diretamente das propriedades da biomassa utilizada e das condições do processo (Wang et al., 2023).

Nesse contexto, a metanação catalítica configura-se como etapa subsequente, na qual o hidrogênio e os óxidos de carbono presentes no gás de síntese reagem para formar metano de alta pureza, originando o denominado gás natural renovável ou biometano. A eficiência desta etapa é fundamental para a viabilidade de toda a cadeia produtiva, sendo o desenvolvimento de catalisadores de baixo custo e alta estabilidade um dos principais focos de pesquisa na área (Zhang et al., 2020). A viabilidade e a sustentabilidade de todo o processo, contudo, dependem criticamente da matéria-prima utilizada. Diferentes biomassas possuem composições elementares, teores de umidade e poderes caloríficos distintos, fatores que influenciam diretamente o rendimento e a eficiência da produção de biometano. Diante disso, o presente estudo se propõe a realizar uma avaliação comparativa do potencial de três biomassas de grande relevância socioeconômica para o Brasil: a palha de milho, o bagaço de cana-de-açúcar e a palha de arroz. Utilizando simulações computacionais no software Aspen Plus, este trabalho tem como objetivo principal investigar e comparar o desempenho de cada biomassa na rota integrada de

gaseificação e metanação para a produção de GNV, focando não apenas na maximização da produção de metano, mas também em um indicador crítico de sustentabilidade, o consumo de água necessário para a geração de hidrogênio via eletrólise.

2. Metodologia

A metodologia deste trabalho foi fundamentada na simulação de processos utilizando o software Aspen Plus, um software amplamente reconhecido para modelagem, simulação e otimização de processos químicos. O estudo foi dividido em três etapas principais: Caracterização das biomassas; Simulação no Aspen Plus; Otimização das condições de operação para cada biomassa.

2.1. Caracterização das Biomassas

Foram selecionadas três biomassas lignocelulósicas de alta relevância no contexto agroindustrial brasileiro: palha de milho, bagaço de cana-de-açúcar e palha de arroz. A escolha foi baseada na ampla disponibilidade, baixo custo e potencial de aproveitamento energético desses resíduos.

As propriedades físico-químicas necessárias para a modelagem foram obtidas da literatura, incluindo análise imediata (teores de umidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas) e análise elementar (C, H, O, N e S), conforme apresentado na Tabela 1. O poder calorífico superior (HHV) também foi considerado para avaliar o conteúdo energético das biomassas.

Para inserção no simulador, as biomassas foram modeladas como componentes não convencionais no Aspen Plus, sendo suas propriedades definidas a partir das análises reportadas. O método de decomposição foi baseado na conversão da biomassa em seus elementos constituintes, permitindo sua posterior participação em reações de equilíbrio.

Tabela 1

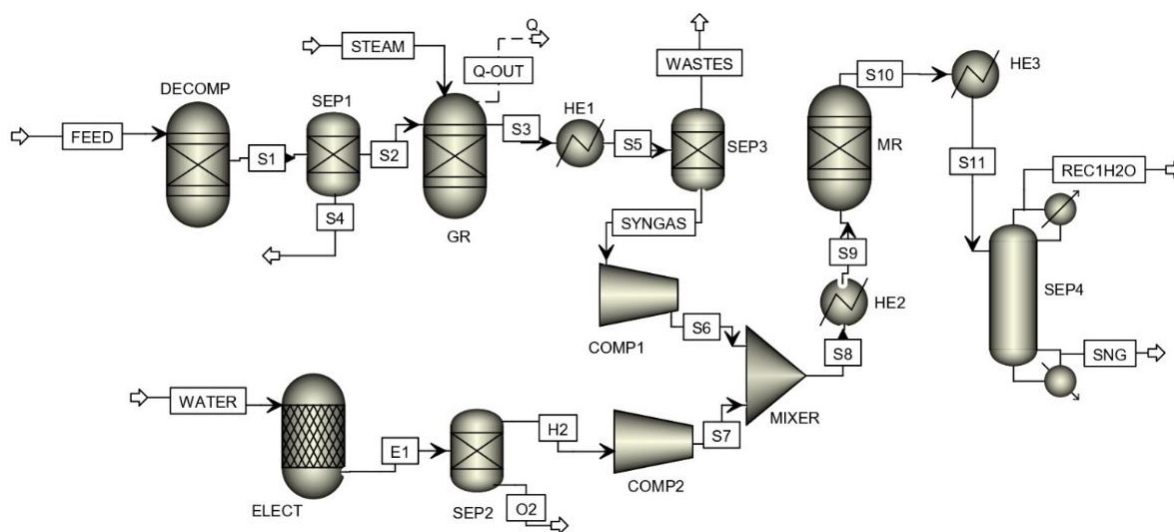
Dados de Análise imediata, elementar e HHV das biomassas.

Propriedades	Biomassa		
	Palha de milho (Mansoor et al., 2025)	Bagaço de cana-de-açúcar (Arpia et al., 2021)	Palha de arroz (Nath et al., 2024)
1. Análise imediata (w.t %)			
Umidade	4,90	3,12	6,20
Carbono Fixo	13,03	10,34	11,10
Matéria volátil	80,27	84,96	75,61
Cinza	1,80	1,58	7,09
2. Análise elementar			
Cinza	1,86	1,60	7,03
Carbono (C)	40,99	42,77	41,21
Hidrogênio (H)	8,52	6,08	4,56
Oxigênio (O)	47,29	48,98	46,58
Nitrogênio (N)	1,00	0,57	0,52
Enxofre (S)	0,34	0,00	0,10
3. ΔH combustão (MJ/kg)			
HHV	11,67	16,78	17,02

2.2. Simulação no Aspen Plus

A modelagem do processo foi realizada no software Aspen Plus®. O objetivo foi representar a conversão de biomassa em gás natural sintético (SNG) pelas etapas de gaseificação e metanação, contemplando ainda a produção complementar de hidrogênio via eletrólise da água. O fluxograma do processo foi estruturado com base em configurações publicadas na literatura, adaptadas para as biomassas avaliadas neste estudo, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1. Fluxograma no AspenPlus para metanação de gás de síntese a partir da gaseificação de biomassa.



As biomassas, definidas como componentes não convencionais, foram inicialmente submetidas a um reator do tipo RYield, no qual foram decompostas em seus elementos constituintes (C, H, O, N e S), com base na análise elemental previamente definida. Essa etapa foi conduzida a 550 °C e 0,1 MPa, permitindo a conversão da biomassa em espécies convencionais compatíveis com os modelos termodinâmicos do simulador.

Em seguida, os produtos da decomposição foram direcionados a um reator de equilíbrio do tipo RGibbs, operando a 800°C e 0,1 MPa, representando a etapa de gaseificação. Nesse reator, a composição do gás de síntese foi determinada pela minimização da energia livre de Gibbs do sistema, sob a hipótese de equilíbrio químico entre as espécies presentes. Essa abordagem permite estimar a composição limite do sistema sob condições ideais, sendo amplamente utilizada em estudos preliminares de avaliação de processos termoquímicos.

O gás de síntese gerado foi então comprimido e alimentado a um segundo reator RGibbs, operando a 300 °C e 3 MPa, no qual ocorre a metanação. Nessa etapa, as reações entre hidrogênio e óxidos de carbono (principalmente CO e CO₂) resultam na formação de metano, conforme as reações de Sabatier. A utilização de um reator de equilíbrio implica na consideração de conversões máximas teóricas, não contemplando limitações cinéticas. Para complementar a demanda de hidrogênio do processo, foi incluído um reator do tipo RStoic, responsável por simular a eletrólise da água, operando a 80 °C e 2 MPa. Neste bloco, a água é convertida estequiometricamente em hidrogênio e oxigênio, sendo o hidrogênio posteriormente misturado ao gás de síntese antes da etapa de metanação.

Equipamentos auxiliares, como trocadores de calor, compressores e misturadores, foram utilizados para ajustar as condições operacionais das correntes ao longo do processo, garantindo compatibilidade entre as etapas.

Para o cálculo das propriedades termodinâmicas das fases gasosas, foi adotado o modelo PR-MB. As condições operacionais dos reatores foram definidas com base em dados publicados na literatura (Wan et al., 2024) e posteriormente avaliadas por meio de análise de sensibilidade, descrita na Tabela 2.

Tabela 2

Blocos e propriedades de operação da simulação.

Bloco (ID)	Propriedade		Descrição
RYield (DECOMP)	Temperatura Pressão	550°C 0,1 MPa	Converte a biomassa em seus componentes elementares (C, H, O, N, S) com base na análise última.
RGibbs (GR)	Temperatura Pressão	800°C 0,1 MPa	Simula um reator em equilíbrio químico
RGibbs (MR)	Temperatura Pressão	300°C 3 MPa	
RStoic (ELECT)	Temperatura Pressão	80°C 2MPa	Simula uma reação com estequiometria definida, como a eletrólise da água.
Heater (HE1, HE3)	Temperatura Pressão	25 °C 0,1MPa	Aquece ou resfria uma corrente do processo.
Heater (HE2)	Temperatura Pressão	300°C 0,1MPa	
Compr (COMP1, COMP2)	Pressão	3 MPa	Aumenta a pressão de um gás.
Mixer	N/A	N/A	Mistura duas ou mais correntes em uma única.

A vazão de alimentação de biomassa foi fixada em 100 kg/h para todas as simulações, com o objetivo de permitir comparação direta entre as diferentes matérias-primas. As demais variáveis de processo foram mantidas constantes, isolando o efeito das propriedades da biomassa sobre os resultados.

2.3. Otimização das condições de operação para cada biomassa

Após a definição do modelo no Aspen Plus e a inserção das propriedades de cada biomassa, foi realizada uma análise de sensibilidade com o objetivo de avaliar a influência das variáveis operacionais sobre a produção de metano. Inicialmente, investigaram-se os efeitos da temperatura e pressão nos reatores de gaseificação e metanação, considerando faixas operacionais típicas reportadas na literatura. Essa etapa teve como finalidade verificar a consistência das condições previamente adotadas e garantir que o sistema operasse próximo ao regime de máxima conversão. Os resultados indicaram que as condições de 800 °C e 0,1 MPa para a gaseificação, bem como 300 °C e 3 MPa para a metanação, proporcionam elevado rendimento de CH₄, sendo, portanto, mantidas como base para as simulações subsequentes.

Em uma segunda etapa, a análise de sensibilidade foi direcionada à otimização da quantidade de hidrogênio suplementar requerida no processo de metanação. Para isso, a vazão de água alimentada ao reator de eletrólise foi progressivamente ajustada, resultando em diferentes níveis de produção de H₂ e, consequentemente, distintas composições do gás de síntese alimentado ao reator de metanação. Essa abordagem foi necessária devido às diferenças intrínsecas entre as biomassas, especialmente em relação à razão H/C e à capacidade de geração de hidrogênio durante a gaseificação. Dessa forma, a otimização foi conduzida de maneira individual para cada matéria-prima, garantindo que as condições avaliadas refletissem seu comportamento específico no processo.

O critério adotado para definição da condição ótima baseou-se na análise do incremento marginal na produção de metano em função do aumento da vazão de hidrogênio. Considerou-se que o sistema atingia um ponto ótimo quando acréscimos adicionais de H₂ resultavam em ganhos pouco significativos na produção de CH₄. Tal comportamento caracteriza uma região de saturação do processo. Esse procedimento permitiu identificar, para cada biomassa, a quantidade mínima de hidrogênio necessária para maximizar o rendimento de metano, evitando

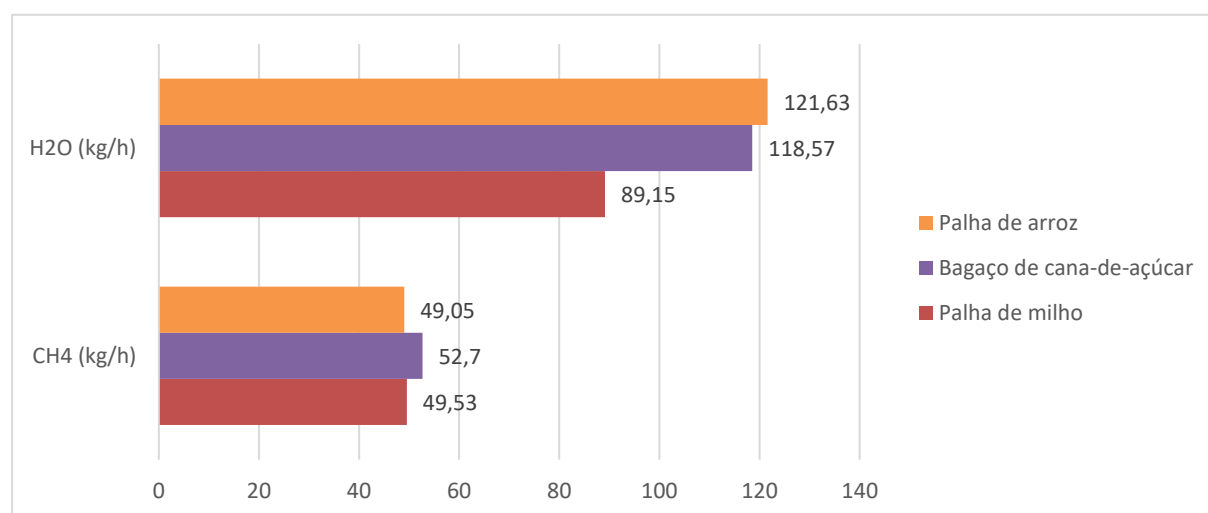
Realização:

consumo excessivo de água e energia na etapa de eletrólise. Assim, foi possível estabelecer uma base consistente para a comparação dos indicadores de desempenho, especialmente no que se refere à eficiência hídrica do sistema.

3. Resultados e Discussões

Os resultados das simulações para as biomassas são apresentados na Figura 2. Foram considerados dois indicadores principais: a produção máxima de CH_4 obtida na análise de sensibilidade e o consumo de água associado a essa produção.

Figura 1. Resultado de produção de metano e consumo de água de diferentes biomassas



De forma geral, as três biomassas avaliadas apresentaram desempenhos próximos em termos de produção de metano, com variações associadas às suas propriedades físico-químicas. O bagaço de cana-de-açúcar apresentou a maior produção de metano (52,70 kg/h), seguido pela palha de milho (49,53 kg/h) e pela palha de arroz (49,05 kg/h). Esse comportamento pode ser relacionado ao maior poder calorífico superior (HHV) do bagaço de cana (16,78 MJ/kg), em comparação à palha de milho (11,67 MJ/kg), o que favorece a geração de um gás de síntese com maior conteúdo energético.

Além disso, a composição elementar também exerce influência relevante, uma vez que o maior teor de carbono no bagaço de cana (42,77%) contribui para maior disponibilidade de carbono reativo na formação de CH_4 . Por outro lado, a palha de arroz, apesar de apresentar HHV elevado (17,02 MJ/kg), possui maior teor de cinzas (7,09%), o que pode impactar negativamente a conversão efetiva da biomassa em gás de síntese no modelo considerado.

Em relação à pureza do gás produzido, todas as biomassas apresentaram fração molar de metano superior a 0,96, indicando que o processo de metanação foi eficiente nas condições simuladas. Esse resultado sugere que, independentemente da biomassa utilizada, é possível obter um gás compatível com as especificações de gás natural renovável, desde que as condições operacionais sejam adequadamente controladas. Diferenças mais expressivas foram observadas na análise do consumo específico de água para produção de hidrogênio via eletrólise. A palha de milho apresentou o melhor desempenho hídrico (1,80 kg H_2O /kg CH_4), significativamente inferior ao bagaço de cana (2,25 kg H_2O /kg CH_4) e à palha de arroz (2,48 kg H_2O /kg CH_4).

Esse resultado pode ser explicado pela maior eficiência da palha de milho na geração de H_2 durante a gaseificação. Em razão de sua maior razão H/C (8,52%), essa biomassa tende a produzir um gás de síntese mais rico nesse componente, reduzindo a necessidade de suplementação externa via eletrólise. Como consequência, há menor consumo de água no processo e, potencialmente, menor demanda associada à produção adicional de H_2 . Biomassas com menor teor de hidrogênio, como a palha de arroz (4,56%), requerem maior adição de hidrogênio externo para atingir condições adequadas de metanação, o que se reflete em maior consumo de água na etapa de eletrólise.

Esses resultados evidenciam um trade-off importante entre produtividade e consumo hídrico. Enquanto o bagaço de cana maximiza a produção de metano, a palha de milho minimiza o consumo de água no processo. Esse comportamento destaca a relevância do consumo hídrico como um critério adicional na avaliação de rotas termoquímicas, especialmente quando associado a outras métricas de desempenho. Cabe destacar, ainda, que o

modelo empregado se baseia em reatores do tipo RGibbs, sob a hipótese de equilíbrio termodinâmico. Embora essa abordagem seja amplamente empregada em estudos preliminares, ela pode superestimar conversões e rendimentos quando comparada a sistemas reais, uma vez que não considera limitações cinéticas e fenômenos de transporte. Dessa forma, os valores obtidos devem ser interpretados como limites teóricos, sendo necessária validação experimental para aplicação industrial.

Por fim, embora o consumo de água tenha sido utilizado como principal indicador de sustentabilidade, outros fatores relevantes, como eficiência energética global, emissões de CO₂ e viabilidade econômica, não foram considerados neste estudo. A inclusão desses parâmetros em análises futuras permitirá uma avaliação mais abrangente da viabilidade do processo.

4. Conclusão

Os resultados obtidos por meio da simulação da rota integrada de gaseificação e metanação demonstraram que a escolha da biomassa exerce influência significativa tanto na produtividade quanto na eficiência no uso de recursos do processo. O bagaço de cana-de-açúcar apresentou o maior rendimento em termos de produção de metano, alcançando 52,70 kg/h, desempenho associado ao seu maior poder calorífico e teor de carbono, que favorecem a geração de um gás de síntese energeticamente mais rico. Em contrapartida, todas as biomassas avaliadas produziram gás com elevada pureza, com frações de metano superiores a 0,96, indicando que, sob condições adequadas, o processo é tecnicamente viável para a produção de gás natural renovável compatível com aplicações energéticas.

Sob a perspectiva do consumo hídrico no processo, a palha de milho destacou-se como a alternativa mais eficiente, apresentando o menor consumo específico de água (1,80 kg H₂O/kg CH₄), resultado diretamente relacionado ao seu maior teor de hidrogênio e, consequentemente, à menor necessidade de suplementação externa via eletrólise. Esse comportamento evidencia a existência de um trade-off relevante entre maximização de rendimento e minimização do consumo de água, reforçando a importância da adoção de critérios multicritério na avaliação de rotas termoquímicas. Assim, embora o bagaço de cana maximize a produção de metano, a palha de milho se mostra mais vantajosa sob o critério específico de consumo hídrico avaliado neste estudo.

Por fim, ressalta-se que os resultados obtidos se baseiam em modelo de equilíbrio termodinâmico, o que implica limitações na representação de efeitos cinéticos e de transporte presentes em sistemas reais. Os valores obtidos devem, portanto, ser interpretados como estimativas de desempenho teórico ideal. Adicionalmente, a análise realizada considerou apenas o consumo de água como indicador de desempenho, não contemplando outros aspectos relevantes, como eficiência energética global, demanda energética da eletrólise e impactos ambientais. Nesse sentido, trabalhos futuros devem incluir validação experimental, incorporação de modelos cinéticos e avaliação integrada de indicadores energéticos, econômicos e ambientais, como eficiência global do processo e emissões de CO₂, de modo a fornecer uma análise mais abrangente da viabilidade da produção de biometano a partir de diferentes biomassas.

Agradecimentos: Agradeço aos meus orientadores Lucas Bonfim Rocha e Thiago Leandro De Souza, grupo de pesquisa SIPROS da UTFPR campus Londrina e ao CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida.

Referências

- A. A. Arpia, et al.: Catalytic microwave-assisted torrefaction of sugarcane bagasse with calcium oxide optimized via Taguchi approach: Product characterization and energy analysis, *Fuel* (305), 121543, 2021.
- T. Kalak: Potential Use of Industrial Biomass Waste as a Sustainable Energy Source in the Future, *Energies* (16), 1783, 2023.
- K. Mansoor, et al.: Unlocking the potential of corn husk through pyrolysis and gasification: Characterization, kinetics, and agglomeration analysis, *Biomass and Bioenergy* (195), 107701, 2025.
- B. Nath, et al.: Thermal decomposition of wheat straw pellets in a nitrogen environment: Characterization Using Thermogravimetric Analyzer, *Case Studies in Thermal Engineering*, 105457, 2024.
- H. Wan, et al.: Methanation of syngas from biomass gasification in a dual fluidized bed: An Aspen plus modeling, *Energy Conversion and Management* (318), 118902, 2024.
- M. Wang, et al.: Syngas Production from Biomass Gasification: Influences of Feedstock Properties, Reactor Type, and Reaction Parameters, *ACS Omega* (8), 31713–31727, 2023.
- L. Zhang, et al.: Study on Methanation Performance of Biomass Gasification Syngas Based on a Ni/Al₂O₃ Monolithic Catalyst, *ACS Omega* (5), 28721–28729, 2020.