

POTENCIAL DO LIXO PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA E HIDROGÊNIO

Davi Reis Vasconcelos (IC), Antonio Carlos Zambroni de Souza (PQ)¹, Maximilian Joachim Hodapp (PQ)²

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Palavras-chave: Gaseificação do lixo. Energia renovável. Simulação computacional.

Introdução

Com o aumento da urbanização e do consumo nas áreas metropolitanas, a produção de resíduos sólidos tem se tornado um desafio ambiental crescente, exigindo soluções sustentáveis para a gestão e o reaproveitamento desses materiais [1]. Neste contexto, a pesquisa investiga a viabilidade da conversão de resíduos sólidos urbanos em energia e hidrogênio, recursos essenciais para a transição a uma matriz energética limpa e sustentável.

A pesquisa tem como objetivo simular, no *software* DWSIM, o processo de gaseificação de resíduos para a produção de gás de síntese, com foco na geração de metano e hidrogênio. Além de quantificar a eficiência desse processo, o estudo explora a aplicabilidade do gás de síntese na geração de energia e na produção de hidrogênio como combustível. A partir dos resultados, busca-se identificar possíveis melhorias no modelo de simulação, tornando-o mais próximo das condições industriais.

A relevância da pesquisa está em oferecer uma alternativa para o tratamento de resíduos, com benefícios como a redução do uso de combustíveis fósseis e das emissões de gases poluentes. A transformação do lixo em uma fonte de energia renovável contribui para o desenvolvimento sustentável, valorizando o reaproveitamento de resíduos urbanos.

Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida em etapas organizadas, iniciando com uma revisão da literatura sobre gaseificação de resíduos sólidos urbanos como em [2], [3] e [4]. Esse levantamento ajudou a definir os principais parâmetros operacionais necessários para construir o modelo para as simulações, as quais foi escolhido o *software* DWSIM por suas funcionalidades voltadas para processos químicos e sua acessibilidade.

Com base nos estudos revisados, foi elaborado um fluxograma no simulador, representado na Figura 1, que ilustra as correntes de entrada e saída, os reatores, misturadores e as correntes de energia do processo de gaseificação.

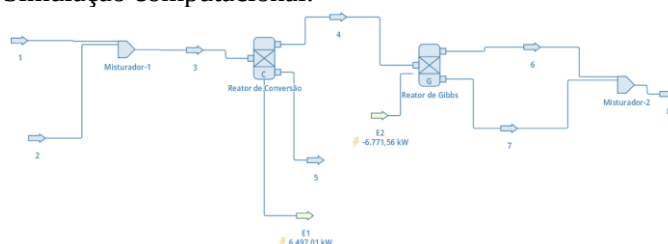


Figura 1 – Processo de gaseificação do lixo

O primeiro passo foi definir as correntes de alimentação 1 e 2, onde 1 é definida por [5], a qual descreve a análise próxima e última típica para dados de resíduos sólidos e pela Figura 2, fornecida pelo aterro Cimasas. A partir dessas informações, foi possível elaborar a Tabela 1, que estima à análise próxima e última de resíduos sólidos de Itajubá –MG. Já a corrente de alimentação 2 foi configurada para representar a entrada de ar, com composição de 79% de N₂ e 21% de O₂, conforme validado por [4].

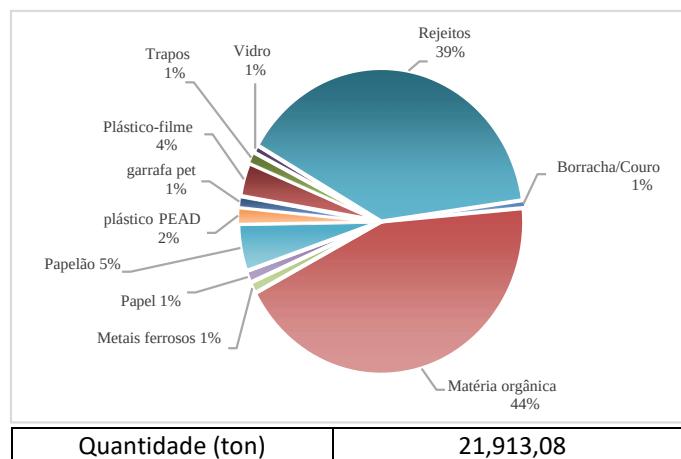


Figura 2 – Análise gravimétrica de Itajubá-MG

Análise próxima (wt%)	
Mistura	51,84
Matéria Volátil	36,23
Carbono Fixado	4,08
Cinzas (não combustível)	7,84
Análise última (wt %)	

C	47,7
H	6,26
O	34,92
N	2,03
S	0,33
Cinzas	8,75

Tabela 1 – Análise próxima e última de Itajubá-MG

Outras correntes de alimentação são 3, 4, 6 e 7 onde as correntes 3 e 4 alimentam diretamente os reatores e assim como 1 e 2, 6 e 7 alimentam um misturador. Com as correntes de alimentação definidas foram colocados os misturadores 1 e 2 que têm a função de convergir as correntes para produzir uma única corrente de saída.

Com isso foram definidos os reatores, onde o primeiro reator no processo é o Reator de Conversão, cuja principal função é transformar todo o C presente na corrente de alimentação (corrente 3) em uma mistura de metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e água (H₂O), conforme as reações químicas apresentadas na Tabela 2 e o segundo reator utilizado, o Reator de Gibbs, opera com base no princípio da energia livre de Gibbs.

Reações de oxidação
$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$
$C + O_2 \rightarrow CO_2$
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$

Tabela 2 – Equações químicas do Reator de Conversão

Com isso se obtém as correntes de energia são destacadas por E1 e E2: E1 representa a energia liberada no Reator de Conversão, enquanto E2 indica a energia necessária para a reação no Reator de Gibbs. Por fim, as correntes de saída são geradas ao se simular o processo e elas são numeradas como 6 e 7, que representam o gás sintetizado no final do processo, bem como 4 e 5 que representam o gás sintetizado no Reator de Conversão e as correntes 3 e 8 que representam a saída dos misturadores. As correntes 5 e 7 indicam o produto líquido sintetizado, já as demais estão todas no estado gasoso.

Os parâmetros para as correntes de entrada foram definidos com base em [4]: a corrente 1 foi configurada com temperatura de 1050 °C, pressão de 2 bar e fluxo mássico de 1000 kg/h. Para a corrente 2, utilizou-se temperatura de 20 °C e pressão de 1 atm, e o fluxo mássico foi ajustado iterativamente para alcançar o valor mínimo necessário para a reação completa no Reator de

Gibbs.

Também foi testado o modelo para outras condições como em [2], o qual a corrente 1 é definida pela temperatura é 1050 °C, pressão de 5 bar e fluxo mássico de 1000 kg/h e outras condições para verificar a influência da temperatura, pressão e fluxo mássico no gás de síntese.

Resultados e discussão

Após realizadas as simulações, os resultados obtidos a partir de algumas condições, dem modo que os resultados estão apresentados na Figura 3. A primeira condição analisada aproxima-se dos valores simulados por [3], o que valida parcialmente o modelo, conforme demonstrado na Tabela 3. Nela, estão listados os valores de produção de gás de síntese, além de suas composições relativas, permitindo uma comparação direta com as previsões teóricas.

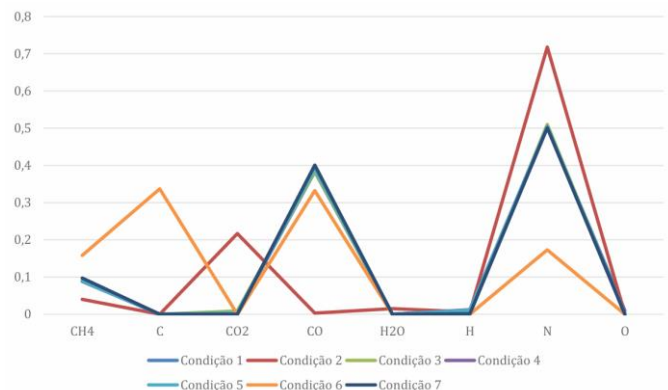


Figura 3 – Quantidade de componentes no gás de síntese

Resultados	H ₂	CO ₂	CO	CH ₄	N ₂	O ₂
Esperado	11,08	2,6	30,36	~0	55,96	0
Obtido	1,10	0,3	38,3	8,9	50,4	1

Tabela 3 – Comparativo entre o resultado obtido com o esperado

Os dados da simulação indicam que, sob as condições estabelecidas, a produção de CO₂ e H₂ foi inferior ao esperado, porém a de CH₄ se mostrou superior ao esperado ao se analisar a Tabela 4. Esses resultados apontam para a necessidade de melhorias no modelo, especialmente no que diz respeito à eficiência do processo de gaseificação. A comparação entre os resultados simulados e os dados de referência sugere que o modelo não apenas precisa de melhorias, mas também

que certas variáveis não foram suficientemente consideradas. Um dos fatores que podem ter contribuído para esses desvios inclui a parametrização inadequada das correntes de alimentação. A análise das condições operacionais sugere que a corrente de alimentação 2, que representa a entrada de ar, pode não ter sido otimizada para garantir a reação completa no Reator de Gibbs.

Analisando a Figura 3 se observa que a pressão, temperatura e fluxo mássico são as variáveis responsáveis por variar a saída, devido a sua interação de forma dinâmica, a qual a alteração em alguma delas exige a compensação em outra para manter o equilíbrio do sistema. O fluxo mássico o fator principal por controlar a taxa de alimentação dos reagentes e o tempo de reação, ou seja, qualquer alteração neste parâmetro altera diretamente o produto final.

Para aprimorar o modelo e alcançar uma representação mais fiel do processo de gaseificação, é necessário incluir etapas adicionais que permitam a validação completa do sistema, aproximando-o do funcionamento de um reator real. Além de buscar a máxima produção de CH_4 , objetiva-se também aumentar a produção de H_2 , tornando o modelo mais alinhado com o comportamento esperado em operações industriais e permitindo uma análise mais confiável e representativa da conversão de resíduos sólidos em gás de síntese.

Uma das principais melhorias que o modelo pode se beneficiar são a inclusão de trocadores de calor e separadores, elementos que auxiliariam no condicionamento térmico e na remoção de componentes indesejado, onde os separadores seriam responsáveis por retirar compostos como enxofre e cinzas, que prejudicam a qualidade do gás de síntese e interferem na eficiência do processo. Adicionalmente, um sistema de desidratação seria necessário para eliminar a água das correntes, permitindo que o processo utilize resíduos secos, aumentando a eficiência na produção de CH_4 . A inserção de trocadores de calor entre as etapas permitiria ajustar as temperaturas das reações, dessa forma, o sistema poderia ser configurado como adiabático, aproximando ainda mais o modelo simulado das condições encontradas em reatores reais.

Ao considerar o processo como adiabático, é possível reproduzir melhor as variações térmicas naturais do sistema durante as reações exotérmicas e endotérmicas. Esse ajuste não só aumenta a precisão e realismo da simulação, como também permite observar o impacto das trocas de calor no desempenho e na eficiência energética do processo. Com esses aprimoramentos, o modelo refletiria com maior precisão as condições industriais, aumentando a confiabilidade dos resultados da simulação e permitindo uma análise mais detalhada sobre o impacto de cada parâmetro na produção de gás de síntese e na

viabilidade energética.

Além das etapas de gaseificação, podem ser implementadas as fases de metanação e reforma do metano, possibilitando avaliar a viabilidade da produção de hidrogênio via reforma do gás metano em comparação com a metanação como forma direta de produção de energia. Essa comparação permite analisar se a produção de hidrogênio é vantajosa tanto para uso imediato como para integração à rede de gás, ou se a conversão direta em metano apresenta maior eficiência energética. O estudo realizado em [6] aborda o acoplamento entre redes elétricas e de gás através da mistura de hidrogênio, considerando o aumento da geração fotovoltaica distribuída. A pesquisa explora a produção de hidrogênio utilizando excedentes de energia solar e a injeção desse hidrogênio na rede de gás para descarbonizar o sistema. O estudo utiliza um modelo que simula redes elétricas e de gás em cenários urbanos para analisar o impacto da injeção de hidrogênio em diferentes pontos e com padrões de injeção variados.

Outro aspecto relevante é a criação de um campus sustentável. Na cidade de Itajubá MG, o campus da Universidade Federal de Itajubá abriga o Centro de Hidrogênio Verde, que promove estudos e pesquisas sobre a produção de hidrogênio como alternativa energética limpa. A proposta de destinar parte dos resíduos coletados na cidade ao Centro de Hidrogênio Verde permitiria produzir hidrogênio a partir de resíduos e, simultaneamente, apoiar estudos acadêmicos sobre aplicações do hidrogênio na transição energética. A produção de hidrogênio no campus poderia ainda ser direcionada para abastecer veículos pesados, como caminhões de lixo ou ônibus de transporte público, oferecendo uma solução de combustível limpo e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Com isso, a universidade poderia implementar linhas de transporte sustentáveis e, até mesmo, gratuitas para a comunidade.

Por fim, a energia produzida a partir desses processos poderia ser integrada à rede elétrica municipal, contribuindo para tarifas reduzidas em horários de pico e aliviando a demanda energética da cidade. Todas essas soluções são viáveis, mas o primeiro passo é aproximar o modelo simulado das condições reais de operação e, posteriormente, realizar um estudo de viabilidade econômica para avaliar a implementação prática dessas melhorias.

Conclusões

Com base nos objetivos da pesquisa e nos resultados alcançados, destacam-se os principais avanços obtidos e a importância dos aprimoramentos futuros. A pesquisa

atingiu seus objetivos iniciais ao simular, com sucesso, a conversão de resíduos sólidos em gás de síntese e ao avaliar preliminarmente a viabilidade deste gás para produção de energia e hidrogênio, ambos de grande potencial para aplicações energéticas sustentáveis. As simulações realizadas no DWSIM permitiram analisar a eficiência do processo de gaseificação e identificar melhorias necessárias para aumentar a fidelidade e eficiência do modelo, especialmente em relação à maximização da produção de CH₄ e H₂, além de sugerirem ajustes para uma representação mais próxima das condições reais.

Os resultados apontaram que o gás de síntese produzido possui grande potencial para aplicações em geração de energia elétrica e produção de hidrogênio, porém ainda dependente de ajustes como a inclusão de separadores, trocadores de calor e sistemas de desidratação. Esses elementos aumentariam o controle sobre o processo, permitindo uma maior eficiência e a obtenção de um gás de síntese mais puro e adequado para conversão em hidrogênio. Essas melhorias permitirão que o modelo simule com maior precisão as reações exotérmicas e endotérmicas dos reatores reais, especialmente em condições adiabáticas, promovendo um entendimento mais detalhado sobre a viabilidade prática do processo.

Além dos avanços técnicos, a pesquisa teve impactos significativos no âmbito social e ambiental, promovendo um modelo de gestão de resíduos sólidos integrado à produção de energia, que contribui diretamente para o desenvolvimento sustentável. A ideia de transformar resíduos em uma fonte de energia renovável oferece uma alternativa real para reduzir o volume de lixo em aterros e minimizar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado. Implementar esse processo no campus da Universidade Federal de Itajubá e em Itajubá –MG possibilita à universidade e à comunidade local explorar um modelo de economia circular, onde o lixo é valorizado como insumo energético, promovendo um ciclo de reutilização de recursos e incentivando práticas de sustentabilidade.

Ao adotar esse sistema, o campus poderia se tornar um centro de referência para pesquisas e demonstrações de tecnologia limpa, incentivando novos projetos de energia renovável e oferecendo uma base para iniciativas educacionais voltadas à conscientização ambiental. Com o envolvimento dos estudantes e da comunidade acadêmica, a Universidade Federal de Itajubá reforça seu compromisso com a inovação e a sustentabilidade, e a pesquisa pode inspirar outras universidades e instituições a adotar tecnologias de conversão de resíduos em energia ou outros métodos de geração de energia sustentável e renovável. Essa abordagem não apenas contribui para a redução de resíduos e emissões, mas também permite que

o campus e a cidade de Itajubá atendam parcialmente suas demandas energéticas de forma autossuficiente e sustentável.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com apoio institucional e financeiro da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas (FAPEMIG) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energia Elétrica (INERGE).

Também agradeço pelo apoio e suporte dos professores Maximilian Joachim Hodapp e Antonio Carlos Zambroni de Souza.

Referências

- [1] Global Waste Management Outlook 2024 - Beyond an age of waste: Turning rubbish into a resource. [s.l: s.n.].
- [2] MEHDI, M. et al. Aspen plus simulation model of municipal solid waste gasification of metropolitan city for syngas production. *Fuel*, v. 344, p. 128128, jul. 2023.
- [3] MEDINA, A. et al. Evaluation of two different alternatives of energy recovery from municipal solid waste in Brazil. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/319648854_Evaluation_of_two_different_alternatives_of_energy_recovery_from_municipal_solid_waste_in_Brazil>.
- [4] JARUNGTHAMMACHOTE, S.; DUTTA, A. Equilibrium modeling of gasification: Gibbs free energy minimization approach and its application to spouted bed and spout-fluid bed gasifiers. *Energy Conversion and Management*, v. 49, n. 6, p. 1345–1356, jun. 2008.
- [5] Nakamura M (2008) Mathematical and Physical Modeling of Mixing and Flow Phenomena of Municipal Solid Waste Particles on a Reverse Acting Grate. PhD. degree document of Columbia University New York, NY.
- [6] CAVANA, M. et al. Electrical and gas networks coupling through hydrogen blending under increasing distributed photovoltaic generation. *Applied Energy*, v. 290, p. 116764, maio 2021.