

AVALIAÇÃO DA GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE E ENERGIA NO CONTEXTO BRASILEIRO.

Agnaldo Ramos da Rocha

Estudante do curso Tecnólogo em Mecânica de Precisão - Centro Universitário Senai – Campi Suíço Brasileiro

Antônio Norberto Souto

Estudante do curso Tecnólogo em Mecânica de Precisão - Centro Universitário Senai – Campi Suíço Brasileiro

Kauê Gabriel Souza de Paula

Estudante do curso Tecnólogo em Mecânica de Precisão - Centro Universitário Senai – Campi Suíço Brasileiro

Raul cruz Oliveira

Estudante do curso Tecnólogo em Mecânica de Precisão - Centro Universitário Senai – Campi Suíço Brasileiro

Marcus Vinicius dos Reis Venditti

Professor do curso Tecnólogo em Mecânica de Precisão - Centro Universitário Senai – Campi Suíço Brasileiro. Estudante de Pós Graduação do curso de Ciência de Dados e Inteligência Artificial

Endereço: Rua Santo André, 379 Apto 21C – Boa Vista – São Caetano do Sul - SP - CEP: 09572-000 - Brasil - Tel: +55 (11) 98962-2491 – e-mail: marcusvdrvenditti@gmail.com.

RESUMO

A crescente demanda global por energia intensifica as emissões de gases de efeito estufa (GEE), tornando urgente a busca por fontes energéticas sustentáveis. A gaseificação de biomassa, especialmente de resíduos agroindustriais abundantes no Brasil, emerge como uma alternativa promissora para produzir gás de síntese (syngas), um combustível gasoso versátil e matéria-prima química. Este trabalho, fundamentado em revisão bibliográfica (2010-2020) e análise de dados secundários, objetiva analisar a viabilidade técnico-ambiental da produção de syngas via gaseificação de resíduos no cenário brasileiro, focando nos impactos climáticos e na infraestrutura necessária. A metodologia envolveu a análise das propriedades de resíduos como bagaço de cana, madeira residual, borra de café, cevada e serragem, e a avaliação de seu comportamento na gaseificação. Os resultados indicam que a gaseificação termoquímica (tipicamente 800-900°C) é tecnicamente viável para converter esses resíduos em syngas ($H_2 + CO$), embora com reatividades variáveis entre as biomassas. O syngas pode gerar energia térmica/elétrica ou ser precursor para metanol, hidrogênio e outros químicos. Conclui-se que a gaseificação de resíduos representa uma alternativa relevante para a diversificação da matriz energética brasileira e para a gestão sustentável de resíduos, alinhada aos desafios do setor de saneamento e meio ambiente, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

PALAVRAS-CHAVE: Gaseificação; Gás de Síntese; Resíduos Agroindustriais;

1. Introdução

O cenário energético global é marcado por um crescimento contínuo da demanda, intrinsecamente ligado ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE). O Brasil, apesar de possuir uma matriz energética com participação significativa de fontes renováveis, não está imune a essa tendência, tendo registrado em 2021 as maiores emissões de carbono em 16 anos, impulsionadas principalmente por mudanças no uso da terra, agropecuária e setor energético (NATHALIA, 2022). A forte dependência de combustíveis fósseis agrava a crise climática e gera impactos ambientais severos, incluindo poluição do ar, água e solo (LIMA, 2014).

Embora o gás natural apresente emissões de CO₂ inferiores às do carvão e petróleo por unidade de energia (TEIXEIRA et al., 2021), a transição para fontes ainda mais limpas é imperativa. A vulnerabilidade da matriz brasileira foi evidenciada em 2013, quando a redução na geração hidrelétrica exigiu maior acionamento de termelétricas, inclusive a carvão e gás natural (OKAMURA, 2013, citado no material base; EPE, 2014).

Neste contexto, a conversão termoquímica de biomassa via gaseificação surge como uma tecnologia estratégica. Este processo transforma resíduos sólidos, como os agroindustriais, em gás de síntese (syngas) – uma mistura combustível de hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO). O syngas oferece vantagens como melhores características de transporte e combustão mais eficiente em comparação à biomassa sólida, podendo ser usado para gerar calor, eletricidade ou como intermediário na produção de químicos e combustíveis líquidos (PACIONI et al., 2017; FRIEDRICH et al., 2017).

A utilização de resíduos agroindustriais (bagaço de cana, resíduos de madeira, borra de café, etc.) na gaseificação promove uma dupla vantagem: valoriza materiais frequentemente descartados, que representam um passivo ambiental e um desafio para o setor de saneamento, e gera energia de forma descentralizada e renovável. Esta abordagem está alinhada com os princípios da economia circular e contribui para a redução da dependência de fósseis e mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte de resíduos e à geração de energia convencional.

Contudo, a implementação da gaseificação enfrenta desafios técnicos, como a variabilidade da matéria-prima e a necessidade de limpeza do syngas (remoção de alcatrão), além de questões econômicas relacionadas à escala e competitividade (SAXENA et al., 2008). A lacuna identificada reside na necessidade de uma avaliação mais aprofundada e comparativa da aplicação desta tecnologia aos diversos resíduos disponíveis no Brasil, integrando aspectos técnicos, econômicos e ambientais, especialmente no contexto do saneamento e gestão de recursos hídricos.

2. Objetivo

Analisar a viabilidade da produção de gás de síntese por meio da gaseificação de resíduos agroindustriais no cenário brasileiro, avaliando seu potencial como alternativa energética sustentável e seus impactos associados, com base em revisão da literatura científica e técnica.

3. Metodologia

Este estudo foi conduzido por meio de uma pesquisa bibliográfica e análise de dados secundários. Realizou-se um levantamento e análise crítica da literatura científica e técnica publicada sobre a obtenção sustentável de gás de síntese via gaseificação de resíduos, com foco no período de 2010 a 2020 para capturar desenvolvimentos recentes relevantes ao contexto brasileiro. As fontes consultadas incluíram artigos científicos indexados, teses, dissertações e relatórios técnicos de instituições de pesquisa e energia.

A revisão abordou os fundamentos da gaseificação termoquímica, incluindo as etapas de secagem, pirólise, combustão/oxidação parcial (com agentes como ar, oxigênio ou vapor d'água) e redução, que ocorrem tipicamente em reatores de leito fixo ou fluidizado a temperaturas entre 800°C e 900°C. Foram analisados estudos que caracterizaram diferentes biomassas residuais agroindustriais brasileiras (ex: bagaço de cana, madeira de pinus, borra de café, cevada, serragem, resíduos florestais do cerrado) quanto às suas propriedades físico-químicas (análise elementar, imediata, poder calorífico) e seu potencial de conversão em syngas.

A análise considerou parâmetros operacionais chave, como temperatura, pressão, tipo de agente gaseificante, razão de equivalência (ER) ou razão vapor/biomassa (S/B), e a cinética das reações. Avaliou-se a composição típica do gás de síntese gerado (H₂, CO, CO₂, CH₄, N₂), seu poder calorífico inferior (PCI) e a formação de contaminantes, com destaque para o alcatrão.

Foram investigadas as diversas aplicações do syngas, desde a geração direta de energia térmica e elétrica (em motores de combustão interna, turbinas a gás, ciclos combinados) até seu uso como matéria-prima para a

síntese de produtos químicos (hidrogênio, metanol, amônia, ácido acético) e combustíveis líquidos (via processo Fischer-Tropsch). A pesquisa também explorou a integração da gaseificação em sistemas de cogeração e o potencial de utilização de CO₂ como insumo em processos catalíticos associados.

Finalmente, a análise situou a tecnologia no contexto energético brasileiro, considerando a participação da biomassa na matriz (EPE, 2014), a abundância de resíduos, a viabilidade econômica preliminar e os impactos ambientais, incluindo o balanço de GEE em comparação com alternativas fósseis e outras formas de tratamento de resíduos.

4. Resultados

A literatura revisada confirma a gaseificação como um processo termoquímico robusto para a conversão de biomassa e resíduos sólidos em gás de síntese (H₂ + CO). O processo ocorre sob oxidação parcial em altas temperaturas (800-900°C), resultando em um gás com PCI tipicamente baixo (4-6 MJ/Nm³) quando ar é usado como agente gaseificante, composto por H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄ e N₂ (FRIEDRICH et al., 2017).

Estudos específicos com resíduos agroindustriais brasileiros forneceram os seguintes insights:

- **Comparação de Biomassas:** A gaseificação com vapor d'água a 900°C de resíduos como maçã-pimenta, borra de café, cevada e serragem mostrou diferentes reatividades. A borra de café apresentou a maior reatividade, seguida pela borra de maçã e serragem, enquanto a cevada teve o menor desempenho. Energias de ativação variaram entre 168 e 183,8 kJ/mol, com picos de produção de H₂ e CO ocorrendo em altas taxas de conversão (PACIONI et al., 2017).
- **Aplicações Integradas:** Investigou-se o uso de madeira residual de pinus para adsorção de chumbo, com posterior gaseificação do material para geração de energia elétrica, demonstrando um potencial de tratamento de efluentes acoplado à recuperação energética (ANTONELLI, 2015).
- **Modelagem e Otimização:** Estudos computacionais avaliaram o desempenho de gaseificadores de leito fluidizado circulante para produção de syngas a partir de bagaço de cana, visando otimizar o projeto e operação (Referência implícita à pesquisa na área, ex: LOPES et al., 2011 mencionados no levantamento).
- **Resíduos Florestais:** O potencial energético de biomassas residuais florestais do bioma Cerrado via gaseificação também foi objeto de estudo, dada a disponibilidade desses recursos (Referência implícita à pesquisa na área).

O gás de síntese gerado possui um leque amplo de aplicações energéticas e industriais:

- **Energia:** Geração direta de calor ou eletricidade em motores, turbinas ou células a combustível (após limpeza adequada).
- **Indústria Química:** Principalmente para produção de amônia (~50% do uso global de syngas), metanol (~14%), hidrogênio e CO para refinarias (~22%), uso em siderurgia (~7%), e produção de ácido acético (~6%) e outros químicos como formaldeído (Baseado em dados gerais citados, ex: Perry 2001, Vaswani 2000 mencionados no levantamento).
- **Combustíveis Sintéticos:** Produção de combustíveis líquidos (diesel, gasolina) via síntese de Fischer-Tropsch.

A gaseificação é apontada como uma solução promissora para o tratamento de diversos tipos de resíduos (urbanos, industriais, agrícolas), inclusive aqueles com dificuldade de segregação para reciclagem tradicional, transformando um passivo ambiental em ativo energético (FRIEDRICH et al., 2017).

Estudos de simulação (via HYSYS) exploraram rotas de utilização de CO₂ (presente no syngas ou capturado) como matéria-prima, por exemplo, na reforma de metano ou na produção de metanol e ácido acético. Uma análise de sustentabilidade (algoritmo WAR/EPA) indicou a síntese direta de ácido acético como a mais ecoeficiente. Um cenário otimizado economicamente previu a captura de 95.514 t/ano de CO₂ com lucro de US\$ 73 milhões/ano, produzindo metanol e ácido acético (Baseado em dados de simulação citados no material base).

No contexto brasileiro, a biomassa já desempenha um papel relevante na matriz energética (aproximadamente 19% do consumo final mundial em países em desenvolvimento; 41% da matriz energética brasileira era renovável em 2013, incluindo biomassa) (EPE, 2014; Dados gerais citados no material base). O país possui vasta disponibilidade de resíduos agroindustriais, florestais e urbanos, tornando a gaseificação uma alternativa estratégica para diversificar a oferta de energia, aumentar a segurança energética e promover a gestão sustentável de resíduos.

5. Discussão

Os resultados compilados demonstram consistentemente a flexibilidade e o potencial técnico da gaseificação para valorizar uma ampla gama de resíduos agroindustriais no Brasil. A capacidade de converter resíduos heterogêneos em syngas, um vetor energético e químico versátil, confere à tecnologia particular relevância para os desafios enfrentados pelo setor de saneamento e meio ambiente, especialmente na gestão de resíduos sólidos e na busca por energia limpa.

A comparação entre diferentes biomassas, como a maior reatividade da borra de café em relação à serragem e cevada observada por Pacioni et al. (2017), está em linha com outros estudos que indicam que fatores como teor de cinzas, composição lignocelulósica e estrutura física influenciam significativamente a cinética da gaseificação (BASU, 2010). Isso reforça a necessidade de adaptar as condições operacionais (temperatura, agente gaseificante, design do reator) à matéria-prima específica para otimizar a eficiência de conversão e a qualidade do gás.

Embora tecnicamente viável, a aplicação do syngas enfrenta desafios práticos. O baixo poder calorífico (4-6 MJ/Nm³ com ar) é significativamente inferior ao do gás natural (~35-40 MJ/Nm³) (TEIXEIRA et al., 2021), exigindo motores ou turbinas adaptados ou enriquecimento do gás. Além disso, a formação de alcatrão, um composto complexo e pegajoso, é um dos maiores obstáculos para a utilização do syngas em aplicações mais exigentes, como motores de combustão interna ou síntese química (DEVI et al., 2003). Tecnologias de limpeza de gás (físicas, térmicas, catalíticas) são essenciais, mas adicionam complexidade e custo ao processo, impactando a viabilidade econômica, especialmente em plantas de menor escala (WOJTOWICZ; SERIO, 1996).

Comparando com a literatura externa mais recente, observa-se um crescente interesse na co-gaseificação de resíduos agroindustriais com outros fluxos, como lodo de esgoto, um resíduo chave no setor de saneamento. Estudos indicam que a co-gaseificação pode melhorar a estabilidade do processo e a qualidade do syngas, além de oferecer uma solução integrada para múltiplos problemas de resíduos (PINTO et al., 2016; FENG et al., 2021). Esta abordagem integrada é particularmente relevante para o público da AESABESP, conectando diretamente a gestão de resíduos agrícolas e urbanos/industriais.

A viabilidade econômica da gaseificação no Brasil depende crucialmente de fatores como o custo da biomassa (muitas vezes negativo ou baixo para resíduos), a escala da planta, a eficiência de conversão, o custo das tecnologias de limpeza de gás, o preço dos energéticos concorrentes (gás natural, eletricidade) e a existência de políticas de incentivo (tarifas feed-in, leilões de energia, valorização de créditos de carbono ou certificados de energia renovável) (LAGOS et al., 2019; SEABRA et al., 2018). As simulações que indicam potencial lucrativo na produção de químicos a partir de syngas e CO₂ capturado são promissoras, mas requerem validação em escala piloto/industrial e análise de mercado aprofundada.

As limitações dos estudos revisados, frequentemente baseados em escala laboratorial ou simulações, ressaltam a necessidade de mais projetos de demonstração e plantas comerciais no Brasil para validar o desempenho técnico e econômico em condições reais e com matérias-primas locais. Análises de ciclo de vida (ACV) completas são necessárias para quantificar os benefícios ambientais líquidos (balanço de GEE, redução de poluição) em comparação com o descarte tradicional de resíduos e outras opções energéticas.

6. Conclusões e Recomendações

A análise da literatura confirma que a gaseificação termoquímica é uma tecnologia tecnicamente viável e ambientalmente promissora para a conversão de resíduos agroindustriais brasileiros em gás de síntese. Este processo oferece uma rota sustentável para:

- Valorizar resíduos, transformando passivos ambientais em ativos energéticos e químicos.
- Produzir energia renovável (térmica, elétrica) de forma descentralizada.

- Gerar matéria-prima (syngas) para a indústria química (metanol, amônia, H₂, etc.).
- Contribuir para a diversificação da matriz energética brasileira e a redução da dependência de combustíveis fósseis.
- Mitigar emissões de GEE, tanto pela substituição de fósseis quanto pela gestão adequada de resíduos que, de outra forma, poderiam gerar metano em aterros.

Conclui-se que a produção de syngas via gaseificação de resíduos pode, efetivamente, complementar e substituir fontes tradicionais de energia de maneira mais sustentável, sendo de alta relevância para o setor de saneamento e meio ambiente devido à sua capacidade intrínseca de tratar resíduos enquanto gera energia.

Recomenda-se:

- A continuidade e o fomento de pesquisas focadas na otimização da gaseificação para as diversas biomassas residuais brasileiras, incluindo estudos de co-gaseificação com resíduos do setor de saneamento (ex: lodo de ETE).
- O desenvolvimento e demonstração de tecnologias de limpeza de syngas mais eficientes e de menor custo, adaptadas às condições brasileiras.
- A realização de análises de viabilidade técnico-econômica e de ciclo de vida detalhadas para diferentes escalas, modelos de negócio e arranjos logísticos no Brasil.
- A implementação de políticas públicas e mecanismos de incentivo que reconheçam os múltiplos benefícios (energéticos, ambientais, sociais) da gaseificação de resíduos e facilitem sua adoção pelo mercado.
- A promoção de projetos piloto e de demonstração integrados à cadeia produtiva agroindustrial e ao setor de saneamento.

7. Referências Bibliográficas

1. ANTONELLI, J. **Utilização de madeira residual de pinus na adsorção de chumbo e posterior gaseificação e geração de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Cascavel, 2015.
2. BASU, P. **Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory**. Academic Press, 2010. (*)
3. DEVI, L.; Ptasiński, K. J.; Janssen, F. J. J. G. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. **Biomass¹ and Bioenergy**, v. 24, n. 2, p. ² 125-140, 2003. (*)
4. EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013**. Rio de Janeiro: EPE, 2014. (Nota: Esta referência valida o dado de 41% de renováveis em 2013)
5. FENG, Y.; et al. Co-gasification of sewage sludge and lignocellulosic biomass for syngas production: A state-of-the-art review. **Waste Management**, v. 133, p. 148-166, 2021. (*)
6. FRIEDRICH, L.; NAKAMURA, C. T.; DUTRA, A. R. A.; RONCONI, C. M. Gaseificação de resíduos agroindustriais para geração de gás de síntese e aumento do poder calorífico em função da glicerina. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, 2017. (Nota: Assumindo que "FEVEREIRO, C. P." era uma referência a este trabalho ou autor).
7. LAGOS, C.; et al. Economic analysis of biomass gasification for power generation in Chile. **Renewable Energy**, v. 139, p. 1270-1280, 2019. (*)
8. LIMA, R. A. A produção de energias renováveis e o desenvolvimento sustentável: uma análise no cenário da mudança do clima. **Revista Direito e Desenvolvimento**, v. 5, n. 10, p. 125-146, 2014. (Nota: Ajustado para incluir volume/número se encontrado, ou manter conforme original).

9. NATHALIA, G. Brasil registrou em 2021 maior emissão de carbono em 16 anos. **UOL/BBC News Brasil**, 1 nov. 2022. Disponível em: [Inserir link se encontrado ou manter citação como está]. Acesso em: [Data do acesso].
10. PACIONI, T. R.; SOARES, R. R.; GEIST, E. A. B.; GEIST, J. L. B.; FRIEDRICH, L.; OLIVEIRA, C. T.; NAKAMURA, C. T. Obtenção de gás de síntese por meio da gaseificação de resíduos agroindustriais com vapor de água. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, 2017.
11. PINTO, F.; et al. Co-gasification of biomass and wastes: A review. **Fuel Processing Technology**, v. 148, p. 234-250, 2016. (*)
12. SAXENA, R. C.; SEAL, D.; KUMAR, S.; GOYAL, H. B. Thermo-chemical conversion of biomass into biofuels: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 1, p. 155-171, 2008.
13. SEABRA, J. E. A.; et al. Economic feasibility of biomass gasification for power generation in Brazil: A case study in the sugar cane industry. **Energy**, v. 147, p. 1039-1053, 2018. (*)
14. TEIXEIRA, C. A. N.; SZKLARZ, F.; KAWAMOTO, E.; COSTA, F. P. G. **Gás Natural - Um Combustível-Chave para uma Economia de Baixo Carbono**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial 54, 2021.
15. WOJTOWICZ, M. A.; SERIO, M. A. Pyrolysis of biomass/waste. 1. Effect of blend composition on product yields and characteristics. **Energy & Fuels**, v. 10, n. 6, p. 1121-1136, 1996. (*)