



Gaseificação da biomassa lignocelulósica e aplicações do gás de síntese

SANTANA, Hortência Elucielly Pereira¹; VIEIRA, Fabrícia¹;

MONTEIRO, Luciano Fernandes²; SILVA, Isabelly Pereira²;

RUZENE, Denise Santos^{1,2,3}; SILVA, Daniel Pereira^{1,2,3,4*}

¹ Rede Nordeste de Biotecnologia, Universidade Federal de Sergipe

² Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe

³ Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Universidade Federal de Sergipe

⁴ Programa de Pós-Graduação em Ciências da Propriedade Intelectual, Universidade Federal de Sergipe

* Autor de correspondência. E-mail: silvadp@hotmail.com

RESUMO

A geração de energia e produtos sustentáveis está entre os maiores desafios contemporâneos. Mesmo diante da urgência em reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, a mudança energética depende também de desenvolver rotas que, além de ser ambientalmente favoráveis, sejam flexíveis, economicamente viáveis e em volume capaz de atender a demanda mundial. Com isso, o aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos agrícolas e agroindústrias pelo processo de gaseificação tem se destacado como promissor por permitir a obtenção do gás de síntese, mistura gasosa com aplicação para gerar uma bioenergia, biocombustível líquidos, biohidrogênio e uma variedade de compostos de elevado interesse industrial. Assim, o presente trabalho teve por finalidade revisar as destinações do gás de síntese em diversas cadeias produtivas, abordando os principais desafios ainda enfrentados na sua implementação.

Palavras-chave: Gaseificação; Biomassa lignocelulósica; Gás de síntese; Biohidrogênio; Bioenergia.

Lignocellulosic biomass gasification and applications of synthesis gas

ABSTRACT

Sustainable energy and product generation are among the most outstanding contemporary challenges. Even facing the urgency to reduce dependence on fossil fuels, energy transition also depends on developing routes that, besides being environmentally friendly, are also flexible, economically viable, and available in volume capable of meeting world demand. Thus, the use of lignocellulosic residues from agriculture and agro-industries as the feedstock of the gasification process has shown promise as it allows obtaining synthesis gas, a gaseous mixture that can be used to generate bioenergy, liquid biofuel, biohydrogen and a variety of compounds of industrial interest. In this way, the present work aims to briefly review the destinations of synthesis gas in different production chains, addressing the main challenges still faced in its implementation.

Keywords: Gasification; Lignocellulosic biomass; Syngas; Biohydrogen; Bioenergy.

1 Introdução

O uso da biomassa como matéria-prima energética está entre as vias de maior importância que corroboram com a produção sustentável de energia, combustíveis de transporte e químicos comercializáveis (SARANGI *et al.*, 2023). Referida a qualquer matéria orgânica biodegradável e não fossilizada, a biomassa é o único recurso renovável de base carbonácea, podendo ser obtida de plantas, animais, microrganismos e até mesmo dos rejeitos alimentares, industriais e municipais (DEMIRBAS, 2009).

Dentro da perspectiva de aproveitamento da biomassa, esta vem sendo largamente explorada na produção de combustíveis de primeira geração a partir da biomassa vegetal rica em amido, açúcares e lipídeos, como o etanol da cana e do milho e biodiesel da soja e girassol (ARPIT SINGH *et al.*, 2022). Entretanto, tem-se que focar na expansão da bioeconomia com base na reutilização de resíduos, invés de culturas dedicadas, torna-se mais eficaz frente a generalização das metas de sustentabilidade e por não competir com outros interesses industriais (ROGERS *et al.*, 2017). Nesse cenário, os materiais lignocelulósicos, para fins energéticos e industriais, oferecem a vantagem de auxiliar diretamente na solução de duas problemáticas ambientais contemporâneas e urgentes: o descarte indiscriminado de resíduos das atividades agrícolas e agroindustriais e a implementação de fontes alternativas aos recursos fósseis, seja para mitigação das mudanças climáticas quanto para fortalecer a segurança energética.

Com uma produção agrícola cada vez mais intensa para suprir as demandas socioeconômicas a geração de resíduos advindos direta ou indiretamente desse setor também aumenta massivamente sem, no entanto, ter uma logística economicamente viável para o manejo adequado a fim de evitar os problemas da sua queima a céu aberto ou disposição no meio ambiente (BONECHI *et al.*, 2017). Porém, contendo em sua estrutura diferentes biopolímeros que servem como precursores de compostos orgânicos com valor agregado, a biomassa lignocelulósica é um recurso renovável de elevado conteúdo energético e baixo custo, portanto, um candidato atrativo para material base das biorrefinarias (ZHOU *et al.*, 2018).

Atrelado a versatilidade das fontes, a biomassa é também relevante pela sua flexibilidade em ser convertida por meios que vão desde a simples queima (como tradicionalmente utilizada) a rotas que promovem a obtenção de produtos mais energeticamente densos (BASU, 2018). Neste sentido, a conversão termoquímica da biomassa pelo processo de gaseificação pode ser citada entre as vias que melhor permitem explorar o potencial dos materiais lignocelulósicos, pois embora ainda enfrente desafios técnicos em escala comercial,

seu produto principal, gás de síntese, é considerado um portador de energia intermediário para produção de eletricidade, calor, químicos e combustíveis, o que permite ser inserido em uma amplitude de aplicações em substituição aos combustíveis fósseis (ALNOUSS *et al.*, 2020).

Assim, sabendo da alta disponibilidade de resíduos agrícolas e agroindustriais e do potencial da biomassa em promover a descarbonização, não só no setor elétrico, mas em outras cadeias produtivas, este trabalho teve como finalidade abordar as possíveis destinações do gás de síntese, ressaltando quais os desafios que ainda limitam a exploração dessas aplicações em escala comercial.

2 Biomassa lignocelulósica e gaseificação

Biomassas lignocelulósicas são materiais de origem vegetal compostos predominantemente por celulose, hemicelulose e lignina, cuja proporção varia de acordo com a biomassa específica. Ambas celulose e hemicelulose consistem em polímeros de carboidratos com diferença que a primeira é unicamente formada por D-glucose (KUMAR GUPTA *et al.*, 2019) enquanto a última tem composição heterogênea; a lignina, por sua vez, é um polímero de fenilpropano sendo o mais complexo e termicamente estável dos três componentes, promovendo a recalcitrância das plantas (MATHEW *et al.*, 2018). Em vista da variabilidade e heterogeneidade das biomassas lignocelulósicas há diferentes tecnologias disponíveis para sua conversão, sendo as rotas termoquímicas, em especial a gaseificação, as que sobressaem dado a eficiência, tempo de reação, custo de catálise, e maior abrangência de materiais (KUMAR *et al.*, 2020).

O termo conversão da biomassa lignocelulósica por gaseificação é caracterizado por ocorrer em elevadas temperaturas (650-1200°C) com a ação de um agente oxidante (MAISANO *et al.*, 2019). O processo é guiado por reações químicas complexas, em que as moléculas carbonáceas de cadeias longas são despolimerizadas em moléculas simples de hidrogênio, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono e outros gases e compostos minoritários (MOLINO *et al.*, 2016), obtendo-se uma mistura gasosa rica em hidrogênio e mais densa energeticamente, o gás de síntese.

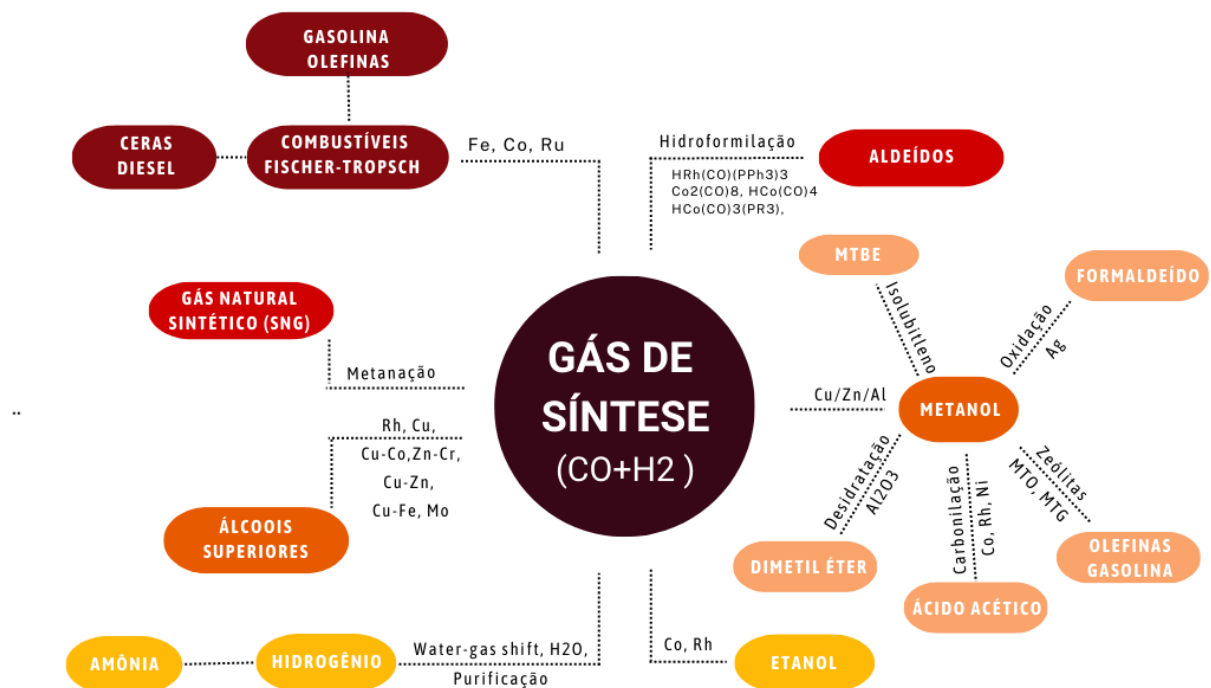
3 Aplicações do gás de síntese

O gás de síntese é o produto majoritário do processo de gaseificação e atrai elevado interesse dos segmentos energéticos e da síntese química, isso pela diversificação de suas aplicações, tais como: i. intermediário para produção de amônia, dimetil éter (DME) e metanol;

ii. composto primário em processos petroquímicos e de refino; iii. combustível primário ou secundário na geração de energia; iv. em células de combustível; v. em processos *Gas-to-Liquids*; vi. e sobretudo na geração de biohidrogênio (Figura 1).

Porém frente a todas as possibilidades, a destinação e limitações do gás depende não só da aplicação industrial de interesse, mas da qualidade do produto obtido, seja em termos de proporção dos gases quanto na presença de impurezas, dado que os níveis exigidos de pureza e razão ideal de H_2/CO variam com a aplicação. Vale comentar que estas características dependem das condições adotadas durante o processo e da composição do combustível utilizado, que no caso da biomassa lignocelulósica se diz respeito a concentração de celulose, lignina e hemicelulose (GLUSHKOV *et al.*, 2021).

Figura 1 – Aplicações do gás de síntese



Fonte: Autoria própria.

Geração de calor e eletricidade

O gás de síntese oriundo da biomassa vem sendo bastante explorado como combustível para geração de energia térmica e elétrica, focando principalmente em sistemas que permitem a geração combinada e promovendo a geração distribuída em áreas remotas e rurais (MENDIBURU *et al.*, 2014). Nesta aplicação, o gás é comumente empregado para alimentar motores de combustão interna (CI) e turbina a gás, e mais recente em células de combustível de óxido sólido (SOFCs), sendo as performances do gás avaliadas considerando as operações

puramente com o gás de síntese ou em uma mistura com diesel, metano ou biogás (SARAVANAKUMAR *et al.*, 2023).

A utilização do gás de síntese para combustão é flexível em relação a proporção dos gases (não restringe o H_2/CO e se beneficia da presença de metano), sendo as maiores problemáticas relacionadas a baixa densidade energética (poder calorífico inferior - LHV) e impurezas do gás. A presença de alcatrão e compostos sólidos são responsáveis por causar severos problemas de corrosão nas partes internas dos equipamentos e bloqueio dos fluxos de gás e calor (SARAVANAKUMAR *et al.*, 2023). O baixo LHV implica em temperaturas baixa da chama, alteração no tempo de combustão e na velocidade da chama laminar, e menor eficiência devido a perda de calor por convecção (SHIVAPUJI; DASAPPA, 2015). Como consequência, ainda que a combustão seja considerada uma aplicação “direta”, em muitas situações a operação exige que o gás seja antes submetido a etapas de refino para remoção dos compostos indesejados. Além disso, por vezes, é necessário que os equipamentos, inicialmente feitos para operar com combustíveis tradicionais, sejam modificados, principalmente na utilização do gás de síntese puro, o que ainda é inviável tecnicamente (RAUCH *et al.*, 2014).

Combustíveis e compostos químicos

O uso direto como combustível para eletricidade e calor é a aplicação mais simples e difundida do gás de síntese obtido da biomassa, porém devido a demanda do mercado por alternativas aos fósseis que vão além do setor elétrico, o gás de síntese como matéria-prima de refinarias desperta o interesse de múltiplas indústrias, sobretudo pela possibilidade de integrar a biomassa nas infraestruturas bem estabelecidas e tradicionalmente utilizadas (GRUBER *et al.*, 2021). Entre as rotas mais buscadas neste sentido se destacam a síntese de amônia, metanol e combustíveis Fischer-Tropsch (RAUCH *et al.*, 2014).

O processo de Fischer-Tropsch (FT), atualmente baseado na utilização de gás natural e carvão, consiste na reação catalítica de H_2 e CO para sintetizar hidrocarbonetos líquidos e então produzir combustíveis de transportes, como diesel e querosene, olefinas e parafinas. O gás de síntese, rico em H_2 e CO , pode então ser direcionado para este fim, entretanto, o processo FT requer um gás de alta qualidade, com razão de H_2/CO entre 1,8-2,3 e níveis baixíssimos de alcatrões, cloro, sulfúricos e alcalinos (GRUBER *et al.*, 2021). Dessa forma, a viabilidade econômica depende essencialmente dos custos do catalisador e das etapas de limpeza, e meios de reduzir a variabilidade na composição do gás (SANTOS; ALENCAR, 2020). Cabe relatar que o DME resultante da desidratação do metanol tem propriedades semelhantes ao propano e

butano o que faz ser uma alternativa ao gás liquefeito de petróleo e para ser usado em motores a diesel (RAUCH *et al.*, 2014).

O metanol, produzido por hidrogenação exotérmica do CO e CO₂, pode ser utilizado como combustível e matéria-prima para síntese química de ácido acético, formaldeído, etileno, propileno, gasolina, polímeros e dimetil éter. Dado a vasta aplicabilidade do metanol, a produção deste com base no gás de síntese obtido via biomassa é considerada essencial para reduzir a dependência de combustíveis fósseis na indústria, no entanto, a exploração dessa via também requer proporções bem ajustadas de H₂/CO (>2) e CO/CO₂, além de depender da redução dos custos de operação, que usa altas temperaturas e catalisador, e da limpeza prévia do gás, pois tem baixa tolerância a presença de impurezas (PONTZEN *et al.*, 2011).

Utilizada massivamente como ponto de partida para os fertilizantes nitrogenados, a amônia é um dos químicos mais consumidos industrialmente e responsável por 1,3% das emissões de CO₂. Como rota alternativa a produção pela reforma do gás natural (Haber-Bosch), a gaseificação da biomassa se mostra a mais economicamente competitiva em obter amônia quando comparada a outras vias sustentáveis (eletrólise) (IEA, 2021). Ainda assim, como desafio tem a carência de comprovação da eficiência em maiores escalas e da padronização do processo para reduzir o risco associado ao investimento inicial (FLÓREZ-ORREGO *et al.*, 2019).

Além das aplicações supracitadas, o gás de síntese também pode ser empregado na produção de outros compostos químicos, como: gás natural sintético, obtido por metanação catalisada e exigindo um gás com H₂/CO de aproximadamente 3 e níveis de enxofre menores que 0,1 ppm; etanol, por reação catalítica de hidrogenação do CO ou fermentação, sendo esta última uma combinação dos meios termoquímicos com biológicos; e outros álcoois, usados como aditivos para gasolina ou convertidos em combustíveis de maior qualidade.

Biohidrogênio

Desde que apontado como principal combustível no futuro de baixo carbono, a produção de hidrogênio tem ganhado cada vez mais relevância na academia e indústria. Além das indústrias em que já se utiliza o hidrogênio (refino de petróleo, indústria de metal, e produção de amônia), a possibilidade de usos do hidrogênio se expande para múltiplos setores: reagente de síntese químico ou combustível, incluindo substituir o gás natural no aquecimento de casas; meio de estocar eletricidade; portador de energia em células de combustível; e produção de derivados, hidrocarbonetos e metanol (MARTINEZ-BURGOS *et al.*, 2021). Entretanto, 95% da produção atual de hidrogênio ocorre por utilização de gás natural e carvão, de tal forma que

sua produção também precisa ser oriunda de fontes renováveis para ser considerado sustentável, tornando assim o gás rico em hidrogênio em uma das vias atrativas para contribuir com a expansão desse combustível a partir de diversos tipos de biomassa, sobretudo no médio e longo prazo (SANTANA *et al.*, 2022). O hidrogênio é produzido pela reação *Water-gas shift* e subsequente separação por *pressure swing adsorption* e, semelhante aos outros processos descritos, os maiores empecilhos residem em otimizar as vias de produção para ser possível obter um gás economicamente viável com elevada seletividade de gás hidrogênio (nesse caso, o máximo possível) e mínimas impurezas (SANTANA *et al.*, 2022).

4 Oportunidade para bioenergia em Sergipe

Com base naquilo que foi abordado nos tópicos anteriores pode-se observar que a biomassa está entre as fontes renováveis de maior versatilidade para contribuir com a descarbonização, principalmente quando combinada com a gaseificação, dado a capacidade do gás de síntese em fornecer energia na forma de eletricidade e calor, combustível de transportes ou ser convertida em outros compostos de interesse industrial e elevado valor agregado. A relevância da biomassa como matéria-prima energética e industrial pode ser ainda melhor aproveitada em regiões caracterizadas por uma forte produção agrícola, uma vez que, como mencionado, esta é uma das atividades que mais contribuem para geração de resíduos lignocelulósicos. Dessa forma, bem-posicionado geograficamente e com produção agrícola crescente e diversifica (amendoim, batata, abacaxi, arroz, banana, coco, feijão, laranja, limão, mandioca, milho e cana-de-açúcar), Sergipe é favorável para explorar o mercado da bioenergia por rotas mais tecnológicas (gaseificação) que a simples queima como ocorre nas usinas sucroenergéticas.

Embora o uso com a biomassa lignocelulósica na gaseificação ainda enfrente desafios na produção comercial, é possível perceber que muitas das limitações dependem da continuação de estudos e pesquisas para maturar a tecnologia e assim otimizar os processos, visando se adaptar as variabilidades e complexibilidade das biomassas lignocelulósicas e reduzindo os custos relacionados a catalise e etapas de limpeza em larga escala. Salienta-se que por ser uma rota essencial no que condiz a produção renovável, mas que se encontra em estado de maturação, Sergipe tem potencial de ainda sair na vanguarda na consolidação de uma economia baseada em biomassa. Como exemplo, há estudos preliminares na literatura que demonstram, em escala laboratorial, a viabilidade no aproveitamento de diferentes resíduos lignocelulósicos na produção de gás de síntese, entre os quais englobam resíduos produzidos abundantemente

no território sergipano: Awais *et al.* (2021) investigaram experimentalmente a gaseificação da casca de coco obtendo um gás de síntese com 12,3% de hidrogênio e LHV de 6 MJ/Nm³, enquanto Sirinwaranon *et al.* (2020), na gaseificação da rizoma de mandioca, produziram um gás de síntese de poder calorífico de 7,78–8,37 MJ/kg sem catálise e de 9,38–10,03 MJ/kg quando catalisada com zeólitas, tendo ambos indicado a capacidade de gerar calor e eletricidade; Hu *et al.* (2019) utilizaram a gaseificação baseada em loop químico para otimizar a conversão de talos de arroz, caule de milho e casca de amendoim, tendo obtido um gás de síntese com H₂/CO entre 1,7–2, o que com poucos ajustes se qualificaria para produção de combustíveis FT, metanol e biohidrogênio; Nanda *et al.* (2016) performaram a gaseificação supercrítica de cascas de banana, coco, laranja, limão e abacaxi, e atingiu a 600°C e com 45 min um gás com seletividade para hidrogênio de até 37% para reação não catalisada e 45% para reação catalisada; Haydary *et al.* (2020) usaram de *blends* de resíduos lignocelulósicos, contendo resíduos do milho, para avaliarem a conversão de gás de síntese em metanol, tendo obtido como resultado uma razão de metanol/biomassa de 0,49, quando usando oxigênio com vapor como agente oxidante da gaseificação.

5 Considerações finais

Com essa revisão das possibilidades de aplicações do gás de síntese para descarbonização de diversas cadeias produtivas, foi possível ressaltar a importância do aproveitamento da biomassa lignocelulósica, sobretudo dos resíduos agrícolas e agroindústrias, frente a consolidação de vias biotecnológicas para geração de bioenergias e bioprodutos. No entanto, observou-se que a maior parte dos bioprodutos ainda não conseguem ser produzidos a preços competitivos com os métodos tradicionais e muito do potencial da biomassa a ser explorado ainda depende da maturação das tecnologias para conseguir lidar com a complexidade e variabilidade das matérias-primas e composição do produto gasoso. Assim, tem-se que a pesquisa e desenvolvimento dessas rotas precisam continuar a ser exploradas para otimizar os processos e reduzir custos de operação, principalmente visando a obtenção de combustíveis e compostos químicos. Ademais, tendo em vista a ampla produção agrícola, salienta-se o potencial do estado de Sergipe em não só expandir sua energia renovável como em explorar mercados em ascensão como o do biohidrogênio.

Agradecimentos

Os autores reconhecem a assistência financeira das agências brasileiras de fomento à pesquisa como Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) sob o Código Financeiro 001, fundação brasileira vinculada ao Ministério da Educação (MEC), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), fundação brasileira vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e à Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC/SE).

Referências bibliográficas

- ALNOUSS, A.; MCKAY, G.; AL-ANSARI, T. Production of syngas via gasification using optimum blends of biomass. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, e118499, 2020.
- ARPIT SINGH, T.; SHARMA, M.; SHARMA, M.; DUTT SHARMA, G.; KUMAR PASSARI, A.; BHASIN, S. Valorization of agro-industrial residues for production of commercial biorefinery products. **Fuel**, v. 322, n. April, e124284, 2022.
- AWAIS, M.; LI, W.; MUNIR, A.; OMAR, M. M.; AJMAL, M. Experimental investigation of downdraft biomass gasifier fed by sugarcane bagasse and coconut shells. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 11, n. 2, p. 429–444, 2021.
- BASU, P. Introduction. In: Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. 3. ed. [s.l.] Academic Press, 2018. v. 21, p. 4–8.
- BONECHI, C.; CONSUMI, M.; DONATI, A.; LEONE, G.; MAGNANI, A.; TAMASI, G.; ROSSI, C. **Biomass: An overview**. [s.l.] Elsevier Ltd., 2017.
- DEMIRBAS, A. Chapter 2 - Biomass Feedstocks. **Biofuels. Green Energy Technol.** London: [s.n.], 2009. p. 45–85.
- FLÓREZ-ORREGO, D.; MARÉCHAL, F.; DE OLIVEIRA JUNIOR, S. Comparative exergy and economic assessment of fossil and biomass-based routes for ammonia production. **Energy Conversion and Management**, v. 194, n. April, p. 22–36, 2019.
- GLUSHKOV, D.; NYASHINA, G.; SHVETS, A.; PEREIRA, A.; RAMANATHAN, A. Current status of the pyrolysis and gasification mechanism of biomass. **Energies**, v. 14, n. 22, 2021.
- GRUBER, H.; GROSS, P.; RAUCH, R.; REICHHOLD, A.; ZWEILER, R.; AICHERNIG, C.; MÜLLER, S.; ATAIMISCH, N.; HOFBAUER, H. Fischer-Tropsch products from biomass-derived syngas and renewable hydrogen. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 11, n. 6, p. 2281–2292, 2021.
- HAYDARY, J.; ŠUHAIJ, P.; HUSÁR, J. Waste biomass to methanol optimisation of gasification agent to feed ratio. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2020.
- HU, J.; LI, C.; LEE, D. J.; GUO, Q.; ZHAO, S.; ZHANG, Q.; LI, D. Syngas production from biomass using Fe-based oxygen carrier: Optimization. **Bioresource Technology**, v. 280, n. January, p. 183–187, 2019.
- IEA, International Energy Agency. **Ammonia Technology Roadmap**. [S.l.: s.n.], 2021.
- KUMAR GUPTA, P.; SAI RAGHUNATH, S.; VENKATESH PRASANNA, D.; VENKAT, P.; SHREE, V.; CHITHANANTHAN, C.; CHOUDHARY, S.; SURENDER, K.; GEETHA, K. An Update on Overview of Cellulose, Its Structure and Applications. **Cellulose**, p. 1–21, 2019.

- MAISANO, S.; URBANI, F.; CIPITÌ, F.; FRENI, F.; CHIODO, V. Syngas production by BFB gasification: Experimental comparison of different biomasses. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 9, p. 4414–4422, 2019.
- MARTINEZ-BURGOS, W. J.; DE SOUZA CANDEO, E.; PEDRONI MEDEIROS, A. B.; CESAR DE CARVALHO, J.; OLIVEIRA DE ANDRADE TANOBE, V.; SOCCOL, C. R. Hydrogen: Current advances and patented technologies of its renewable production. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, 2021.
- MATHEW, A. K.; ABRAHAM, A.; MALLAPUREDDY, K. K.; SUKUMARAN, R. K. **Lignocellulosic biorefinery wastes, or resources?** [s.l.] Elsevier B.V., 2018.
- MENDIBURU, A. Z.; CARVALHO, J. A.; CORONADO, C. J. R. Thermochemical equilibrium modeling of biomass downdraft gasifier: Stoichiometric models. **Energy**, v. 66, p. 189–201, 2014.
- MOLINO, A.; CHIANESE, S.; MUSMARRA, D. Biomass gasification technology: The state of the art overview. **Journal of Energy Chemistry**, v. 25, n. 1, p. 10–25, 2016.
- NANDA, S.; ISEN, J.; DALAI, A. K.; KOZINSKI, J. A. Gasification of fruit wastes and agro-food residues in supercritical water. **Energy Conversion and Management**, v. 110, p. 296–306, 2016.
- PONTZEN, F.; LIEBNER, W.; GRONEMANN, V.; ROTHAEML, M.; AHLERS, B. CO₂-based methanol and DME - Efficient technologies for industrial scale production. **Catalysis Today**, v. 171, n. 1, p. 242–250, 2011.
- RAUCH, R.; HRBEK, J.; HOFBAUER, H. Biomass gasification for synthesis gas production and applications of the syngas. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, v. 3, n. 4, p. 343–362, 2014.
- ROGERS, J. N.; BRYCE STOKES, A.; DUNN, J.; CAI, H.; WU, M.; HAQ, Z.; BAUMES, H. An assessment of the potential products and economic and environmental impacts resulting from a billion ton bioeconomy. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, n. 3, p. 110–128, 2017.
- SANTANA, H. E. P.; SANTOS, B. L. P.; SILVA, D. P.; SILVA, I. P.; RUZENE, D. S. Thermochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass for Biohydrogen Production. **Org. Waste to Biohydrogen**. [S.l.]: Springer, 2022. p. 207–227.
- SANTOS, R. G. DOS; ALENCAR, A. C. Biomass-derived syngas production via gasification process and its catalytic conversion into fuels by Fischer Tropsch synthesis: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 36, p. 18114–18132, 2020.
- SARANGI, P. K.; SUBUDHI, S.; BHATIA, L.; SAHA, K.; MUDGIL, D.; PRASAD SHADANGI, K.; SRIVASTAVA, R. K.; PATTNAIK, B.; ARYA, R. K. Utilization of agricultural waste biomass and recycling toward circular bioeconomy. **Environmental Science and Pollution Research**, v.30, n.4, p.8526–8539, 2023.
- SARAVANAKUMAR, A.; VIJAYAKUMAR, P.; HOANG, A. T.; KWON, E. E.; CHEN, W. H. Thermochemical conversion of large-size woody biomass for carbon neutrality: Principles, applications, and issues. **Bioresource Technology**, v. 370, e128562, 2023.
- SHIVAPUJI, A. M.; DASAPPA, S. Influence of fuel hydrogen fraction on syngas fueled SI engine: Fuel thermo-physical property analysis and in-cylinder experimental investigations. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 32, p. 10308–10328, 2015.
- SIRINWARANON, P.; ATONG, D.; SRICHAROENCHAikul, V. Gasification of torrefied cassava rhizome with Ni/MCM-41 catalyst derived from illite waste. **Energy Reports**, v. 6, n. June, p. 537–547, 2020.
- ZHOU, B.; DICHIARA, A.; ZHANG, Y.; ZHANG, Q.; ZHOU, J. Tar formation and evolution during biomass gasification: An experimental and theoretical study. **Fuel**, v. 234, n. May, p. 944–953, 2018.