



V CONEPETRO
V Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo,
Gás Natural e Biocombustíveis

TECNOLOGIAS DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA PARA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO

Hortência E. P. Santana¹, Isabelly P. Silva², Denise S. Ruzene³, Daniel P. Silva⁴

¹ Rede Nordeste de Biotecnologia, Universidade Federal de Sergipe, hortencia010@hotmail.com, ² Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, isabellypereira@outlook.com, ³ Rede Nordeste de Biotecnologia, Universidade Federal de Sergipe, ruzeneds@hotmail.com, ⁴ Rede Nordeste de Biotecnologia, Universidade Federal de Sergipe, silvadp@hotmail.com

Resumo: O hidrogênio gerado a partir da gaseificação de biomassa lignocelulósica promete desempenhar um papel crucial na transição para um sistema energético de baixo carbono. Além de ajudar a reduzir as emissões de CO₂, esse pode ser obtido a partir da valorização de resíduos agrícolas e agroindústrias. No processo termoquímico, a lignocelulose é despolimerizada e convertida em gás de síntese, mistura gasosa composta principalmente por H₂, CO, CO₂ e CH₄ e que pode ser empregada na síntese de biohidrogênio e biocombustíveis líquidos. Entretanto, estas aplicações ainda são tecnicamente limitadas em escala comercial, pois exigem um gás de alta pureza e elevada razão de H₂/CO, fatores que são influenciados pela natureza da matéria-prima, aparatos disponíveis e condições operacionais. Assim, sabendo dos benefícios ambientais e econômicos da utilização da biomassa lignocelulósica como fonte alternativa aos fósseis, este estudo propõe uma breve revisão sobre as tecnologias de gaseificação, circunstâncias operacionais e técnicas emergentes empregadas para produção de um gás rico em hidrogênio via gaseificação de biomassa lignocelulósica.

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

1. INTRODUÇÃO

Por décadas, o contínuo processo de industrialização junto a intensa exploração de recursos naturais foram medidas essenciais para permitir o rápido avanço tecnológico e melhoria na qualidade de vida da população. No entanto, no cenário contemporâneo, esses mesmos fatores têm sido a causa dominante de duas grandes problemáticas mundiais: a degradação ambiental por uso de recursos fósseis e o descarte de resíduos no ambiente. Apesar das nações terem se comprometido a atingir as emissões líquidas zero de carbono, desde 2020, quando houve uma queda devido a pandemia de covid-19, as emissões de CO₂ proveniente da combustão e processos industriais têm aumentado e quebrado recordes a cada ano (IEA, 2023; Waqas *et al.*, 2023). Como resposta, as consequências do aquecimento global têm se mostrado mais agressivas, imprevisíveis e difíceis de reverter.

Em paralelo, a disposição de dejetos de diferentes setores também representa uma fonte de poluição ambiental, seja em razão da origem tóxica, como os industriais, ou do volume gerado, como os resíduos lignocelulósicos oriundos das atividades agrícolas e agroindustriais (Waqas *et al.*, 2023). Estima-se que a taxa de produção anual de material lignocelulósico (resto de colheitas, cascas, talos, palhas, entre outros) seja de 180 bilhões de toneladas, das quais apenas 8,2 bilhões de toneladas possuem alguma aplicação (Kyei *et al.*, 2023). Entretanto, se por um lado a matéria lignocelulósica representa um desafio ambiental, por outro, se adequadamente manejada, é uma fonte alternativa e prontamente disponível aos compostos fósseis (Gao *et al.*, 2023).

A biomassa lignocelulósica é composta por polímeros naturais de celulose, hemicelulose e lignina, que quando despolimerizada são passíveis de serem convertidos em diferentes formas de energia e equivalentes aos derivados de petróleo, sendo, portanto, uma medida sustentável para reduzir a exploração de recursos sujeitos a escassez ao passo que evita a degradação ambiental do seu despejo inadequado. Nesse sentido, diversas tecnologias têm sido consideradas para acessar a estrutura polimérica da biomassa e expandir os limites do seu potencial. As vias de conversões

termoquímicas se destacam devido ao seu caminho mais direto de conversão, e rendimento estequiométrico mais rápido e mais alto (Basu, 2018).

Em vista da corrida pela geração de hidrogênio, este considerado o combustível de maior relevância a médio e longo prazo na economia de baixo carbono, dentre as rotas termoquímicas, que incluem a pirólise, conversão hidrotérmica, e combustão, a gaseificação tem atraído maior atenção devido à sua capacidade de tratar integralmente uma variedade de matérias-primas derivadas de resíduos agrícolas e agroindustriais e devido ao seu produto, gás de síntese, ser um gás rico em hidrogênio. Contornando os obstáculos técnico-científicos que ainda limitam a gaseificação em grandes escalas, esta tem viabilidade de ser uma das principais bases na geração de hidrogênio sustentável. Com isso, este trabalho objetiva abordar os princípios da gaseificação da biomassa, propondo uma breve revisão de como encontra-se o atual estado tecnológico para produção de biohidrogênio e quais os desafios em alcançar uma gaseificação eficaz, assegurando a viabilidade de se utilizar de matérias-primas mais acessíveis, menores custos de operação e instalação, e efeitos ambientais reduzidos

2. GASEIFICAÇÃO

A gaseificação refere-se a conversão termoquímica da biomassa carbonácea sólida em uma mistura gasosa, que contém principalmente CO, CO₂, H₂ e CH₄, biocarvão (*biochar*), cinzas e alcatrão (*tar*), quando esta é submetida a elevadas temperaturas em uma atmosfera com quantidade limitada de um agente oxidante, o qual pode ser ar, oxigênio, vapor, dióxido de carbono ou uma combinação entre os mesmos (Basu, 2018). O processo de conversão ocorre em etapas sequenciais de acordo com as reações sólido-gás que são desencadeadas nas diferentes zonas do gaseificador, iniciado com remoção da umidade superficial na secagem, seguida pela pirólise, combustão e redução, em que a biomassa terá sua estrutura quebrada e alterada para formação de novos compostos (Basu, 2018). Na etapa de pirólise, a despolimerização das moléculas lignocelulósicas é iniciada com geração de *biochar* e compostos voláteis (gases permanentes e precursores do alcatrão), os quais são oxidados na zona de combustão (etapa exotérmica) e, na etapa de redução, reagem com a fração sólida para gerar mais gases permanentes H₂, CO, CO₂ e CH₄, e hidrocarbonetos (Yan *et al.*, 2018) (Figura 1).

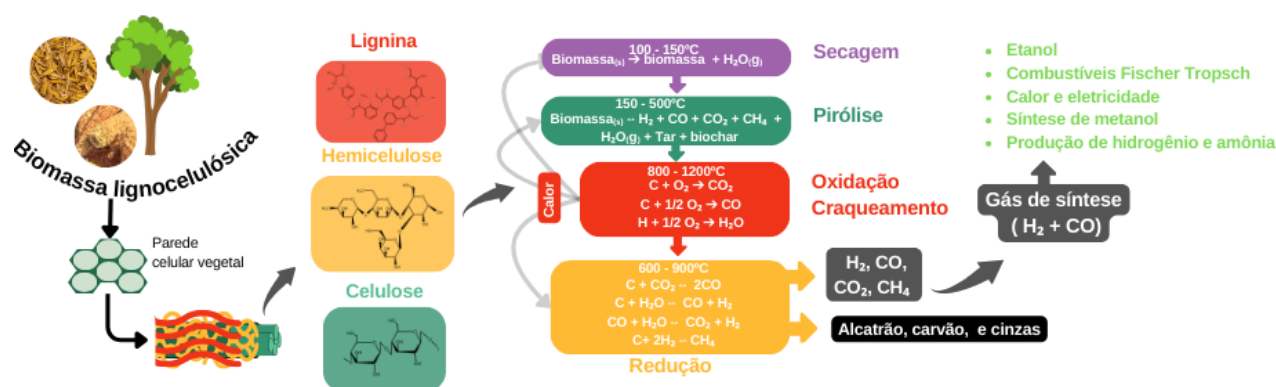


Figura 1: Conversão da biomassa lignocelulósica por gaseificação
Fonte: autoria própria

O gás gerado tem suas finalidades definidas de acordo com a qualidade em termos de impurezas, poder calorífico e proporções de CO, CO₂, H₂ e CH₄. Quando o gás tem significativas concentração de gases não combustíveis além da presença pronunciada de impurezas, este tem destinação para geração de eletricidade e calor. O gás composto primordialmente de CO e H₂ e com baixa presença de impurezas, sobretudo de alcatrão (*syngas*) pode ser direcionado para produção de gás natural sintético, combustíveis líquidos e biohidrogênio, sendo esta última a de maior interesse dada a importância do hidrogênio frente as metas de descarbonização. Apesar do potencial, das 110

instalações comerciais de gaseificação atualmente em todo o mundo, 89 produz gás de síntese de baixa qualidade (baixas relações H_2/CO , alto teor de alcatrão, alto teor de CO_2) sendo limitados apenas para geração de calor e energia e algumas para vapor, fornos de cal e calor (Mankasem; Prasertcharoensuk; Phan, 2024).

As propriedades do gás a ser gerado são diretamente influenciadas por vários fatores que vão desde as características da biomassa utilizada, o agente de gaseificação, condições operacionais (razão vapor/biomassa – SB, razão de equivalência ar/combustível - ER, temperatura, tempo de residência, etc.), e o *design* do reator. As relações entre essas variáveis definem como ocorrerão as reações do processo, permitindo uma flexibilidade de combinações para serem ajustadas visando a maximizar a produção de hidrogênio de acordo com a matéria-prima inicial (Basu, 2018). No estado atual da técnica, além da busca a por melhores relações de H_2/CO , a maior problemática da gaseificação, seja visando a produção de hidrogênio ou demais combustíveis líquidos, é a formação do alcatrão, composto aromático altamente condensado e de mais difícil controle e remoção dentre as impurezas. O teor excessivo de alcatrão no gás combustível reduz a eficiência geral da conversão da biomassa e aumenta o custo de operação da planta durante a gaseificação e nos processos sequenciais de conversão, uma vez que se não for tratado polimeriza em moléculas mais complexas e leva ao entupimento dos equipamentos. A remoção eficiente do alcatrão é primordial para a estabilidade das plantas de gaseificação e para a qualidade do gás de síntese.

3 INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PARÂMETROS NA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

3.1 Composição química da biomassa

A composição do material lignocelulósico consiste principalmente em celulose, hemicelulose, e lignina, que diferem em propriedades químicas e físicas, bem como em sua percentagem nas plantas de acordo com a espécie, tipo e até mesmo com a condição de maturidade (Tabela 1). A celulose é a principal substância na parede das células vegetais e consiste em uma cadeia longa e linear de subunidades beta-d-glucopirranose, interligadas por ligações de hidrogênio para formar uma estrutura fibrilar rígida e insolúvel em água (Heinze; El Seoud; Koschella, 2018). A hemicelulose também é um polissacarídeo, mas ao contrário da celulose, contém diversas unidades de açúcar C5 e C6, estrutura ramificada e amorfa, baixo grau de polimerização e é facilmente hidrolisada (Bajpai, 2016). O terceiro constituinte, a lignina, é um polímero tridimensional de unidades fenilpropanóides com estruturas amorfas, reticuladas e hidrofóbicas. A presença de lignina reforça a rigidez e proporciona um mecanismo de defesa à planta (Bajpai, 2016).

Tabela 1: Composição química dos resíduos lignocelulósicos e respectivo gás de síntese

Biomassa	% Lignocelulósica			Composição do gás (vol%)				Condições operacionais
	Cel	Hem	Lig	H_2	CO	CO_2	CH_4	
Palha de milho	69,85	18,17	10,96	22,7-25,9	28,1-28,9	29,8-26,3	11,1-10,1	¹ Gaseificação a vapor em leito fluidizado duplo - 700-800°C
Casca de arroz	47,24	25,3	26,5	22,4-28,1	36,8-37,1	23,9-18,3	12-11,3	
Madeira	45,66	21,27	31,96	25-30,7	35,2-36,3	22,3-16,2	12,8-12,1	
Bagaço de cana	44,1	31,8	22,3	10	18	17	4	² Gaseificação com ar em reator de leito fixo <i>downdraft</i> - 800°C
Casca de coco	41,84	21,03	39,17	15	17,5	17,5	2,5	

¹ Zhang e Pang (2019); ² Awais *et al.* (2021)

Em razão da hemicelulose, celulose e lignina serem formadas por compostos de diferentes funções químicas, essas possuem diferentes perfis de degradação térmica e contribuições nas formações dos gases (Tabela 1). A hemicelulose, menos estável termicamente, tem sua decomposição

entre 150 – 350°C contribuindo para formação de vapores, carvão e alcatrão; a celulose decompõe-se entre 275 – 500°C formando alcatrão, carvão e produtos gasosos permanentes, sendo que contribui mais para alcatrão do que hemicelulose; e a lignina tem decomposição entre 250 – 650°C e é o componente que mais contribui para formação de gases permanentes (principalmente H₂, CH₄ e CO₂) e alcatrão de elevado peso molecular (Rubinsin *et al.*, 2023). Tian *et al.* (2017) compararam a gaseificação dos três componentes lignocelulósicos, encontrando que, em comparação com a lignina, a celulose e a hemicelulose produziram gases mais rapidamente com teores de CO e CH₄ mais elevados e H₂ e CO₂ mais baixos. A lignina produziu mais H₂ (1,09 Nm³/kg a 1020°C) que a celulose e a hemicelulose com 0,33 e 0,36 Nm³/kg a 1220°C, respectivamente.

A composição química do alcatrão também depende de cada macromolécula. Em geral, este é predominantemente formado por hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), mas com presença de outros compostos. No trabalho de Yu *et al.* (2014), os autores encontraram para o alcatrão da celulose a proporção de derivados de aromáticos e hidrocarbonetos diversos de quase 33%. Para a lignina, os fenóis e seus derivados representaram 16,98%, e para a hemicelulose, os derivados de aromáticos, fenóis e seus derivados e hidrocarbonetos diversos representaram aproximadamente 35% do alcatrão. Observa-se que os resíduos lignocelulósicos ricos em lignina se mostram potenciais para obtenção de maiores rendimentos de gás de síntese e com elevado conteúdo de hidrogênio, gás de interesse, porém exigem medidas operacionais que possam controlar a formação do alcatrão.

3.2 Agente oxidante

Convencionalmente, na gaseificação, o ar é o agente oxidante mais utilizado devido a fácil disponibilidade e baixo custo, entretanto produz gás com baixo poder calorífico (presença de N₂) e baixa qualidade, não sendo muito adequado para síntese de combustíveis líquidos. O O₂ puro pode ser utilizado para obtenção de um gás de elevado poder calorífico e qualidade, pois permitir atingir maiores temperaturas de gaseificação que contribuem para o craqueamento do alcatrão e menor formação de *char*. Entretanto, o emprego do O₂ é limitado pelo alto custo (Ghodke *et al.*, 2023; Makwana *et al.*, 2023). Visando, a produção de biohidrogênio, o vapor tem sido o agente oxidante mais adequado por beneficiar as reações de reforma a vapor e *water gas shift*. Este oferece um equilíbrio entre o ar e O₂, pois permite uma elevada proporção de H₂ com redução significativa de na produção de *char* e alcatrão. Maisano *et al.* (2019) reportaram que a adição de vapor na razão SB=1 promoveu um aumento na concentração de H₂ de 6 e 14% em relação à gaseificação realizada exclusivamente com ar como agente oxidante.

O CO₂ tem sido considerado uma opção de agente oxidante por sua influência nas reações de reforma a seco em elevadas temperaturas. Comparado ao uso do vapor, o CO₂ tem vantagem de não consumir energia para ser gerado e ser reaproveitado dos processos industriais de captura e armazenamento de CO₂ (CCS, do inglês *Carbon Capture and Storage*) (Pandey; Sheth; Prajapati, 2022). Ainda, trabalhos na literatura reportam a combinação entre agentes como forma de unir os benefícios individuais de cada um e atingir um melhor custo-benefício da operação. Chen *et al.* (2020) avaliaram a gaseificação de *pellets* de pinheiro reportando um aumento de 34 v% de H₂ para 38 v% e 45 v% quando adicionados 25 kg e 50 kg de vapor. Sieradzka *et al.* (2024) avaliaram o efeito de CO₂, vapor e de vapor+CO₂ na gaseificação de resíduos de malte, palha de trigo, feno, e serragem de pinheiro, reportando que a atmosfera de CO₂ favoreceu a produção de CO, e o vapor a formação de H₂. Entretanto, a mistura entre eles foi a condição que mais favoreceu a produção de H₂. Mankasem *et al.* (2024) observaram um aumento na produção de gás de síntese com redução de 93% do conteúdo de alcatrão quando utilizado uma mistura de CO₂+ vapor.

Em novas perspectivas, a gaseificação super crítica (*supercritical water gasification* - SCWG) tem sido avaliada para contornar o obstáculo da gaseificação convencional utilizando a água como solvente. As vantagens do SCWG incluem poder processar amostras diretamente sem secagem, e a

obtenção de hidrogênio em temperatura mais baixa, embora exija pressão mais alta (Ghodke *et al.*, 2023).

3.3 Tipo de gaseificador

O tipo e tamanho dos reatores dependem de vários parâmetros, sendo categorizados em três grandes grupos: leito fixo (*fixed bed*), leito fluidizado (*fluidized bed*) e reatores de fluxo arrastado (*entrained flow*). Nos gaseificadores de fluxo arrastado a biomassa é alimentada em concorrência com o agente de oxidação e operam com baixo tempo de residência e alta temperatura (1250 – 1600°C), promovendo alta conversão de carbono em gás de síntese de alta qualidade, com mínimo alcatrão CH₄ e CO₂. É a técnica de conversão de carvão fóssil em energia mais utilizada (Makwana *et al.*, 2023).

Os reatores de leito fixo são os mais comercialmente utilizados devido a modelagem simples e fácil operação, esses podem ser do tipo *updraft* (a biomassa é alimentada no topo e o agente gaseificador por baixo), *downdraft* (a direção do fluxo de biomassa e do gás é concorrente) e *crossdraft*, que ao contrário dos outros dois, onde o gás do produto é liberado da posição superior ou inferior, o gás do produto é liberado do canal oposto ao local de entrada do agente de gaseificação entra (Dou *et al.*, 2019). Os *updraft* possuem a mais alta eficiência térmica devido à baixa temperatura dos gases quentes que passam através do leito de combustível, mas a entrada na zona de pirólise e secagem a baixa temperatura contribui para a formação de alcatrão e tem baixo volume de *syngas*. Os *downdraft* e *crossdraft* oferecem a vantagem de baixo teor de alcatrão, mas o *crossflow* tem baixa eficiência térmica e na redução de CO₂ (Ghodke *et al.*, 2023).

Comparado aos de leito fixo, os reatores de leito fluidizado são vantajosos pelas taxas de alimentação mais flexível, distribuição de temperatura mais controlada e uniforme, e adequados para produção em média ou larga escala. Esses gaseificadores são divididos em duas categorias principais com base na velocidade do meio: de leito borbulhante (*bubbling fluidized bed* - BFB), em que o material de leito são fluidizados pelo fluxo ascendente de gás, criando um efeito borbulhante, e de leito circulante (*circulating fluidized bed* – CFB), em que as partículas sólidas são arrastadas no fluxo de gás e circulam entre o leito denso inferior e a fase diluída superior garantindo boa mistura, altas taxas de transferência de calor e contato gás-sólido eficiente para as reações de gaseificação. Os CFB tem sido considerado promissores devido à alta eficiência na combustão, porém ainda possuem operações caras e complicadas (Hanchate *et al.*, 2021).

Nos gaseificadores de leito fluidizado em dois estágios, dois reatores são interligados através de uma válvula não mecânica e controlados separadamente de maneira que permite melhor controle dos voláteis decompostos para que esses tenham tempo suficiente de reagir com o agente de oxidação (Hanchate *et al.*, 2021). Em gaseificação de *pellets* de madeira em dois estágios com vapor e CO₂, Mankasem *et al.* (2024) produziram até 97,36% de rendimento de gás com 86,7 mgH₂/g biomassa e baixo teor de alcatrão (0,2 g/Nm³), sendo estes 47–79% e 95–99% menor que o gaseificador *downdraft* e o gaseificador de leito fluidizado (6–14 g/Nm³), respectivamente.

Nos reatores de leito fluidizado, a sílica é o material mais amplamente utilizado como meio fluidizante. No entanto, outros como dolomita, areia, esferas de vidro e olivina também são estudados por oferecer propriedades catalíticas que podem reduzir a concentração de alcatrão. Segundo Li *et al.* (2018), o efeito da olivina é relativamente fraco no rendimento do gás, sendo o efeito catalítico da dolomita o mais proeminente, em que aumentou a fração de H₂ de 22 para 33% e reduziu o conteúdo de alcatrão de 51 para 32 g/Nm³. Em outro experimento, a dolomita também mostrou efeito catalítico positivo na gaseificação de celulose, hemicelulose, lignina, palha e pinho, melhorando a eficiência da conversão, o valor calorífico do gás e o índice da taxa de conversão de carbono, e limitando a formação de alcatrão (Yu; Wu; Chen, 2018).

Aproximadamente 75% das plantas de gaseificação de biomassa comerciais são projetadas para operar com gaseificadores de leito fixo, cujas aplicações do gás são voltadas para produção de

calor e eletricidade (Chen *et al.*, 2020). Os processos com reatores de fluxo arrastado são visados como os principais para gaseificação em escala industrial, mas ainda têm requisitos rígidos de matéria-prima. Na literatura, os reatores de leito fluidizado são considerados os mais adequados para o processo de gaseificação de vapor de biomassa, quando visando a síntese de combustíveis em escala industrial, devido aos resultados benéficos alcançados, como altas concentrações de hidrogênio (>50 vol%), rendimentos de gás em torno de 1–1,4 Nm³/kg de biomassa, e baixa concentração de alcatrão (20–80 g/Nm³) (Gao *et al.*, 2023).

3.4 Temperatura, tempo de residência e razões estequiométricas

Investigando o efeito dos parâmetros operacionais, estudos na literatura reportam que o aumento da temperatura e a concentração de vapor no agente gaseificador aumentam os volumes gerados de H₂, CO, CH₄ e CO₂, favorecendo ainda uma maior proporção de H₂ e uma redução significativa no teor de alcatrão (Yu; Wu; Chen, 2018). Para a razão estequiométrica do ar, tempo de residência e tamanho das partículas, esses tendem a favorecer a eficiência da gaseificação quando são elevadas minimamente, mas apresentam uma faixa restrita de condições ótimas e o aumento implica na redução da produção de gás e hidrogênio.

Samani *et al.* (2024) estudaram o efeito de O₂ e vapor na gaseificação de lignina em reator do tipo de *entrained flow* e reportaram um valor ótimo de ER entre 0,15 – 0,35. O contínuo aumento do ER e tamanho da partícula reduziram a produção de H₂ e CO. Para a temperatura, variando de 1000-1400°C, a produção de H₂ e CO aumentam ao custo da diminuição do CH₄ e a concentração de H₂ e CO₂ aumentam com o aumento do SB de 0 – 1,6, enquanto CO decai continuamente.

Yang *et al.* (2019) performaram a gaseificação a vapor de talo de algodão em um BFB explorando diferentes condições de temperatura, SB, e material de leito. Os autores encontraram uma melhoria no rendimento de gás e conversão de carbono com a temperatura de 600-800°C e SB de 0,5-1,1. O aumento da temperatura implicou um aumento no conteúdo de H₂ e CO, e o aumento de SB elevou o conteúdo de H₂ e CO₂, mas diminuiu o conteúdo de CO. Por outro lado, o tempo de residência teve um impacto negativo na composição e rendimento do gás e formação de alcatrão, que cresceu significativamente. Os autores mostraram que a uma temperatura de 800°C e uma relação S/B de 0,9-1, seria ideal para produzir um gás de síntese mais rico em H₂ e teor de alcatrão <40 N/Nm³. Mas segundo Nguyen *et al.* (2020), aumentar o vapor utilizado acima da razão de 1,2 provoca um aumento indesejável na concentração de CO₂, levando a uma redução da qualidade do gás de síntese. As observações corroboram com as encontradas por Tian *et al.* (2017) na gaseificação a vapor dos componentes e resíduos lignocelulósicos em reator de leito fixo *updraft*, cuja a concentração de H₂ aumentou com a temperatura (900-1200°C) e diminuiu com o tempo de residência.

3.5 Catálise

Em conjunto ao controle das condições operacionais e design do reator, para um gás de síntese de pureza adequada a geração de biocombustíveis, tem-se também trabalhado na implementação de técnicas que limitem a formação ou promova a remoção de impurezas. Os métodos de controle de alcatrão podem ser por vias *ex-situ*, que remove o alcatrão do gás por meios físicos ou de craqueamento em alta temperatura; e *in-situ* que remove o alcatrão dentro do próprio reator com adição de catalisadores. Estes últimos, embora menos estabelecidos, são vantajosos por serem mais práticos e menos dispendiosos (Rubinsin *et al.*, 2023). A exploração de catalisadores acessíveis que aumentem a produção de H₂, reduzam a temperatura de gaseificação e favoreçam o craqueamento do alcatrão é, no atual estado da técnica, considerado crucial para melhorar a viabilidade técnico-econômica da implementação da gaseificação em larga escala. O catalisador pode ser utilizado para minimizar a formação ou converter alcatrão durante o processo, ou em processos a jusante, melhorando a cinética geral das reações (Ghodke *et al.*, 2023). Os catalisadores podem ser de base mineral (como dolomita, metais à base de cálcio e metais alcalino-terrosos) e sintéticos (a base de

metais níquel, rutênio e zircônia). Em novas abrangências, o biochar também tem emergido como potencial catalisador à base de carbono devido à sua estrutura de e baixo custo. No entanto, em reatores de grande escala, os parâmetros que afetam a atividade do catalisadores ainda são bastante complexos (Rubinsin *et al.*, 2023).

4. CONCLUSÃO

Assim como todas as novas rotas tecnológicas para geração de energia e combustíveis sustentáveis, a gaseificação da biomassa lignocelulósica ainda enfrenta desafios para promover sua implementação em larga escala. Embora não haja comprovação em unidades operacionais reais dedicadas à produção de biohidrogênio, tendo em vista que a gaseificação é uma tecnologia madura e estabelecida, disponibilidade de resíduos lignocelulósicos e analisando os estudos recentes nessa temática, pode-se perceber que a gaseificação possibilita uma variabilidade de arranjos operacionais e inovação em diversos aspectos que permitem um ajuste do processo favorável a produção de gás de síntese de alta qualidade com viabilidade para ser utilizado na produção compostos de elevado valor agregado. Desta forma, o manejo sustentável da biomassa lignocelulósica se prova uma opção promissora para viabilizar a produção de 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 Inovação (MCTI) e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC/SE).

REFERÊNCIAS

- 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.
- BAJPAI, Pratima. Structure of Lignocellulosic Biomass. p. 7–12, 2016.
- BASU, Prabir. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory**, p. 1–564, 2018.
- CHEN, T.; ZHANG, J.; WANG, Z.; ZHAO, R.; HE, J.; WU, J.; QIN, J. Oxygen-enriched gasification of lignocellulosic biomass: Syngas analysis, physicochemical characteristics of the carbon-rich material and its utilization as an anode in lithium ion battery. **Energy**, v. 212, p. 118771, 2020.
- DOU, B.; ZHANG, H.; SONG, .; ZHAO, L.; JIANG, B.; HE, M.; RUAN, C.; CHEN, H.; XU, Y. Hydrogen production from the thermochemical conversion of biomass: Issues and challenges. **Sustainable Energy and Fuels**, v. 3, n. 2, p. 314–342, 2019.
- GAO, Y.; WANG, M.; RAHEEM, A.; WANG, F.; WEI, J.; XU, D.; SONG, X.; BAO, W.; HUANG, A.; ZHANG, S. Syngas production from biomass gasification: Influences of feedstock properties, reactor type, and reaction parameters. **ACS omega**, v. 8, n. 35, p. 31620–31631, 2023.
- GHODKE, P. K.; SHARMA, A. K.; JAYASEELAN, A.; GOPINATH, K P. Hydrogen-rich syngas production from the lignocellulosic biomass by catalytic gasification: A state of art review on advance technologies, economic challenges, and future prospectus. **Fuel**, v. 342, p. 127800, 2023.
- HANCHATE, N.; RAMANI, S.; MATHPATI, C. S.; DALVI, V. H. Biomass gasification using dual fluidized bed gasification systems: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 123148, 2021.

- HEINZE, T.; EL SEOUD, O. A.; KOSCHELLA, A. **Structure and Properties of Cellulose and Its Derivatives**, 2018.
- IEA. CO₂ Emissions in 2022. **Global Energy**, v. 62, n. 10, p. 20–21, 2023.
- KYEI, S. K.; EKE, W. I.; NAGRE, R. D.; MENSAH, I.; AKARANTA, O. A comprehensive review on waste valorization of cashew nutshell liquid: Sustainable development and industrial applications. **Cleaner Waste Systems**, p. 100116, 2023.
- LI, Y.; SHUAI, L.; KIM, H.; MOTAGAMWALA, A. H.; MOBLEY, J. K.; YUE, F.; TOBIMATSU, Y.; HAVKIN-FRENKEL, D.; CHEN, F.; DIXON, R. A.; LUTERBACHER, J. S.; DUMESIC, J. A.; RALPH, J. An ideal lignin facilitates full biomass utilization. **Science Advances**, v. 4, n. 9, p. 1–11, 2018.
- 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.
- MAKWANA, J.; DHASS, A D; RAMANA, P V; SAPARIYA, D.; PATEL, D. An analysis of waste/biomass gasification producing hydrogen-rich syngas: A review. **International Journal of Thermofluids**, p. 100492, 2023.
- MANKASEM, J.; PRASERTCHAROENSUK, P.; PHAN, A. N. Intensification of two-stage biomass gasification for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, p. 189–202, 2024.
- NGUYEN, N. M.; ALOBAID, F.; MAY, J.; PETERS, J.; EPPLE, B. Experimental study on steam gasification of torrefied woodchips in a bubbling fluidized bed reactor. **Energy**, v. 202, p. 117744, 2020.
- PANDEY, B.; SHETH, P. N.; PRAJAPATI, Y. K. Air-CO₂ and oxygen-enriched air-CO₂ biomass gasification in an autothermal downdraft gasifier: Experimental studies. **Energy Conversion and Management**, v. 270, p. 116216, 2022.
- RUBINSIN, N. J.; KARIM, N. A; TIMMIATI, S. N.; LIM, K. L.; ISAHAK, W. N. R. W.; PUDUKUDY, M. An overview of the enhanced biomass gasification for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2023.
- SAMANI, N.; KHALIL, R.; SELJESKOG, M.; BAKKEN, J.; THAPA, R. K.; EIKELAND, M. S. Experimental and simulation studies of oxygen-blown, steam-injected, entrained flow gasification of lignin. **Fuel**, v. 362, p. 130713, 2024.
- SIERADZKA, M.; MLONKA-MĘDRALA, A.; BŁONIAK, A.; MAGDZIARZ, A. Experimental study of biomass waste gasification: Impact of atmosphere and catalysts presence on quality of syngas production. **Bioresource Technology**, v. 394, p. 130290, 2024.
- TIAN, T.; LI, Q.; HE, R.; TAN, Z.; ZHANG, Y. Effects of biochemical composition on hydrogen production by biomass gasification. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 31, p. 19723–19732, 2017.
- WAQAS, M.; HASHIM, S.; HUMPHRIES, U. W.; AHMAD, S.; NOOR, R.; SHOAIB, M.; NASEEM, A.; HLAING, P. T.; LIN, H. A. Composting Processes for Agricultural Waste Management: A Comprehensive Review. **Processes**, v. 11, n. 3, p. 731, 2023.
- YAN, W. C.; SHEN, Y.; YOU, S.; SIM, S. H.; LUO, Z. .; TONG, Y. W.; WANG, C. H. Model-based downdraft biomass gasifier operation and design for synthetic gas production. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 476–493, 2018.
- YANG, H M; LIU, J G; ZHANG, H; HAN, X X; JIANG, X M. Experimental research for biomass steam gasification in a fluidized bed. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 41, n. 16, p. 1993–2006, 2019.
- YU, H.; WU, Z.; CHEN, G.. Catalytic gasification characteristics of cellulose, hemicellulose and lignin. **Renewable Energy**, v. 121, p. 559–567, 2018.
- YU, H.; ZHANG, Z.; LI, Z.; CHEN, D. Characteristics of tar formation during cellulose, hemicellulose and lignin gasification. **Fuel**, v. 118, p. 250–256, 2014.
- ZHANG, Z.; PANG, S. Experimental investigation of tar formation and producer gas composition in biomass steam gasification in a 100 kW dual fluidised bed gasifier. **Renewable Energy**, v. 132, p. 416–424, 2019.