

## **Hidrogênio sustentável a partir de resíduos: a nova fronteira da bioenergia**

Emanuele Graciosa

Doutora em Engenharia Agrícola, especializada em Bioenergia, formada pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente atuo como pesquisadora na área de Energias Renováveis, com ampla experiência em Engenharia Térmica, Termodinâmica e Mecânica dos Fluidos, com ênfase em energia da biomassa, conversão termoquímica e tecnologias solares.

### **1. Introdução**

A energia renovável desempenha um papel fundamental na transição para uma economia sustentável. Dentre os diversos tipos de energia renovável disponíveis, destacam-se a energia solar, a energia eólica e a energia oceânica. No entanto, é importante ressaltar que essas fontes apresentam limitações geográficas, estando disponíveis apenas em determinados países e em horários específicos ao longo do dia e do ano.

Nesse contexto, o hidrogênio emerge como uma fonte promissora de energia renovável, distinguindo-se dos combustíveis fósseis devido à sua capacidade de minimizar o impacto ambiental. O hidrogênio é capaz de produzir energia sem gerar poluentes significativos, uma vez que seu subproduto resultante da combustão é apenas água (H<sub>2</sub>O).

O hidrogênio apresenta um notável potencial calorífico, com valores que variam entre 120 e 140 MJ kg<sup>-1</sup>. Essa alta densidade energética o torna uma opção atrativa para diversas indústrias, como transporte, eletricidade e química. Em particular, processos industriais de larga escala, como a síntese de amônia e a produção de produtos petroquímicos, têm aproveitado as propriedades versáteis do hidrogênio como parte de suas operações. Essa demanda crescente reflete a posição crucial do hidrogênio na indústria atual e seu papel fundamental na transição para uma economia mais sustentável.

Como um combustível versátil, o hidrogênio pode ser produzido a partir de diferentes fontes de energia por meio de várias tecnologias que levam a diferentes

emissões de CO<sub>2</sub>. O hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis é considerado uma alternativa ao hidrogênio preto ou marrom obtido a partir do carvão e do gás natural que tem uma elevada emissão de carbono. O hidrogênio renovável inclui o hidrogênio verde e o bio-hidrogênio, os quais são classificados em diferentes cores de hidrogênio, dependendo da origem do recurso utilizado na produção. O hidrogênio verde é produzido por meio da eletrólise utilizando energia proveniente de fontes renováveis, como eólica, hidrelétrica e solar. O bio-hidrogênio é obtido pela transformação termoquímica e biológica de biomassa, por meio de rotas de conversão biológica e termoquímica. A fermentação e a digestão são métodos bioquímicos, enquanto a gaseificação e pirólise são procedimentos termoquímicos.

A produção de hidrogênio a partir de biomassa tem ganhado destaque recentemente devido à abundância desse recurso e à maturidade das tecnologias de conversão termoquímica. Além disso, em resposta às projeções de um aumento na demanda de quase cinco vezes em relação aos níveis atuais de produção nos próximos 30 anos, diversas rotas para a produção de hidrogênio estão sendo consideradas (IEA, 2022).

## **2. Biomassa**

Biomassa é um termo utilizado para descrever a matéria orgânica de origem vegetal ou animal que pode ser usada como fonte de energia. A biomassa é o material mais abundante no planeta, com cerca de 550-560 bilhões de toneladas de carbono. Além disso, cerca de 100 mil milhões de toneladas de biomassa são produzidas por ano (Bar-On et al. 2018). Sendo uma fonte de energia renovável e sustentável, a biomassa pode ser utilizada para a produção de calor, eletricidade, biocombustíveis e outros produtos de valor agregado. Ao todo, cerca de 25,1% da matriz energética do Brasil é representada pela biomassa (EPE, 2022).

Quase todos os tipos de biomassa são compostos principalmente por elementos de carbono, oxigênio e hidrogênio. Em relação a sua origem, as biomassas para fins energéticos podem ser classificadas nas categorias de biomassa energética florestal, seus produtos e subprodutos ou resíduos; biomassa energética da agropecuária, as culturas agroenergéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e rejeitos urbanos.

A biomassa pode ser ainda dividida em dois tipos de acordo com sua composição, sendo biomassa lignocelulósica e biomassa não lignocelulósica. A biomassa lignocelulósica refere-se à biomassa composta principalmente de celulose, hemicelulose e lignina, que são componentes estruturais encontrados em plantas. Essa forma de biomassa é derivada principalmente de materiais vegetais não comestíveis, como madeira, cascas, caules, palhas e resíduos agrícolas.

A celulose e a hemicelulose são polissacarídeos presentes na parede celular das plantas, enquanto a lignina é um polímero complexo que proporciona rigidez e resistência aos tecidos vegetais. A biomassa lignocelulósica é uma fonte abundante de energia renovável e pode ser convertida em biocombustíveis, calor e eletricidade através de processos de conversão bioquímica ou termoquímica.

Por outro lado, a biomassa não lignocelulósica é composta por outros materiais orgânicos que não possuem a mesma composição química da biomassa lignocelulósica. Isso inclui, por exemplo, resíduos de alimentos, resíduos de culturas energéticas não lignocelulósicas (como milho e cana-de-açúcar), algas e resíduos de processos industriais, como a indústria de papel e celulose. A biomassa não lignocelulósica pode ser utilizada para a produção de biogás através da digestão anaeróbica, onde os resíduos orgânicos são decompostos por bactérias em um ambiente sem oxigênio, gerando metano. Além disso, a biomassa não lignocelulósica também pode ser convertida em biocombustíveis líquidos, como biodiesel, através de processos de transesterificação.

É importante destacar que tanto a biomassa lignocelulósica quanto a biomassa não lignocelulósica desempenham um papel importante na produção de energia renovável e na redução da dependência de combustíveis fósseis, cada uma com suas características e potenciais de aproveitamento específicos.

### **3. Conversões termoquímicas da biomassa em hidrogênio**

#### **3.1. Gaseificação da biomassa**

Gaseificação da biomassa tem sido amplamente estudada como uma tecnologia eficiente e sustentável para a geração de calor e energia elétrica, produção de hidrogênio e etanol. A gaseificação é a conversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido, em um gás energético, através da oxidação parcial a temperaturas elevadas. Esse gás,

chamado de gás de síntese, é constituído por uma mistura de monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), pequenas quantidades de outros hidrocarbonetos leves (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e vapor d'água (H<sub>2</sub>O), além do nitrogênio (N<sub>2</sub>) presente no ar e fornecido para a reação. O gás de síntese resultante da gaseificação pode ser limpo e tratado para separar o hidrogênio dos outros componentes, como o monóxido de carbono e o dióxido de carbono. Esse hidrogênio pode então ser utilizado como combustível ou como matéria-prima para a produção de produtos químicos.

Em função do processo obtém-se também quantidades variáveis de carvão, ácidos pirolenhosos (formado por ácido acético, ácido fórmico, alcatrão solúvel, metanol e água) e alcatrão insolúvel. A formação de alcatrão é um dos maiores problemas a ser enfrentado durante a gaseificação de biomassa. Alcatrão condensa sob temperaturas reduzidas, polimerizando-se em equipamentos tais como motores e turbinas, prejudicando assim o funcionamento dos mesmos.

A eficiência da conversão termoquímica da biomassa depende do material utilizado, tamanho e forma das partículas, vazão do gás, tipos de reatores, entre outros fatores. O modo com que o combustível e o agente gaseificante entram em contato no gaseificador é importante e forma a base das principais classificações de gaseificadores. Em linhas gerais, os gaseificadores podem ser classificados com base na direção do fluxo dos gases: concorrente, contra-corrente, fluxo cruzado, e leito fluidizado.

O processo de gaseificação acontece na faixa de temperatura entre 800 e 1800 °C, sendo esta temperatura influenciada pelas características do combustível utilizado. As principais reações químicas decorrentes do processo de gaseificação são as que envolvem carbono, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, metano e água. Um sistema de gaseificação consiste principalmente por um reator no qual o combustível é alimentado juntamente com um limitado fornecimento de ar (cerca de 35% do requerido para a combustão completa), ou seja, onde as reações do processo de gaseificação acontecem.

### 3.2. Pirólise de biomassa

A pirólise da biomassa é a degradação térmica de biomassa que ocorre em temperaturas mais baixas (400-1200 °C) em comparação à gaseificação com condições controladas de agente oxidante, geralmente na ausência dele. Os principais produtos

resultantes da pirólise da biomassa são o bio-óleo líquido, biocarvão sólido e produtos gasosos não condensáveis, como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>.

A pirólise é um processo de conversão termoquímica simples e eficiente para obter energia da biomassa e gerar produtos de alta densidade energética, incluindo o hidrogênio. Essas tecnologias utilizadas para aproveitamento de energia são diferenciadas de acordo com as características da biomassa e do produto, eficiência do processo, quantidade de oxidante utilizado, temperatura e taxa de aquecimento, entre outros.

A eficiência do processo de pirólise depende da matéria-prima (tipo de biomassa, tamanho de partícula, pré-tratamento da biomassa), condições de reação (temperatura final, pressão, taxa de aquecimento, tempo de residência), tipo de reator e variáveis como a presença de catalisadores e mecanismos de condensação de vapor. Existem diferentes tipos de pirólise e, dependendo das condições de operação, a pirólise é denominada lenta, flash, rápida, intermediária ou vácuo.

Além disso, as proporções e a composição dos produtos de pirólise também dependem das condições utilizadas. A pirólise lenta ocorre em uma temperatura de processo mais baixa, menor taxa de aquecimento e tempos de residência mais longos, o que favorece a produção de carvão vegetal. A pirólise flash é o processo no qual o tempo de reação é de apenas alguns segundos, ou até menos, e a taxa de aquecimento é muito alta. Devido ao aquecimento rápido, o tamanho da partícula deve ser pequeno. A pirólise rápida favorece a formação de bio-óleo e ocorre em temperatura moderada, curto tempo de residência do vapor e alta taxa de aquecimento, mas não tão alta quanto na pirólise flash. A tecnologia de pirólise rápida pode ter custos de investimento relativamente baixos e alta eficiência energética em comparação com outros processos, especialmente em pequena escala, tem menores investimentos de capital, maior eficiência e aceitabilidade ambiental. A pirólise intermediária é geralmente utilizada para fazer um equilíbrio entre produtos líquidos e sólidos. As condições operacionais para a pirólise intermediária estão entre a pirólise lenta e rápida.

#### **4. Considerações finais**

A produção de hidrogênio com baixo teor de carbono a partir da biomassa é uma abordagem sustentável e promissora em comparação com os combustíveis fósseis

convencionais. À medida que a demanda por hidrogênio renovável continua a crescer, a gaseificação e a pirólise de biomassa surgem como soluções promissoras, oferecendo fontes sustentáveis, diversificadas e descentralizadas de hidrogênio. No entanto, a implementação comercial dessas tecnologias ainda enfrenta desafios tecnológicos e econômicos significativos que precisam ser superados.

Para viabilizar a produção de hidrogênio a partir da biomassa em larga escala, é crucial aprimorar a eficiência dos processos, reduzir os custos de investimento e operação, bem como desenvolver sistemas eficientes de limpeza e purificação de gases. Esses aspectos são fundamentais para tornar essa abordagem economicamente competitiva e ambientalmente sustentável.

A colaboração entre governos, instituições de pesquisa e o setor privado desempenha um papel essencial na superação dos desafios existentes e na promoção da inovação. Investimentos contínuos em pesquisa, desenvolvimento e implementação dessas tecnologias são necessários para transformar a economia do hidrogênio em realidade.

## **5. Referências bibliográficas**

Bar-On YM, Phillips R, Milo R. The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2018;115(25):6506-11.

Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional, ano base 2022.

International Energy Agency, IEA. *Global Hydrogen Review 2022*.