

## **Economia circular: o papel do hidrogênio rumo à transição energética**

Sayonara Eliziário<sup>1</sup>  
Luana Oliveira<sup>2</sup>  
José Vinícius<sup>3</sup>  
Marta Célia Dantas<sup>4</sup>  
Nivalde de Castro<sup>5</sup>

Nas últimas décadas, a demanda energética mundial aumentou exponencialmente devido ao crescimento populacional e ao desenvolvimento tecnológico. Com os amplos investimentos em combustíveis fósseis, as emissões de carbono chegaram a um nível alarmante, resultando em transformações climáticas associadas ao aquecimento da atmosfera. Além disso, dada a escassez de recursos naturais e a presença de problemas econômicos, a humanidade é forçada a buscar novos modelos de desenvolvimento que sejam diferentes daqueles que existem atualmente. Por isso, esforços para reverter este cenário, como políticas de mitigação de emissões e impactos ao meio ambiente e às populações, são inexoráveis à transição energética (Li, 2013).

A transição para uma sociedade mais eficiente em termos de recursos, que utiliza energia limpa e é capaz de mitigar mudanças climáticas e garantir um futuro sustentável, é um objetivo central dos governos de todo o mundo. Neste sentido, muitas estratégias de descarbonização podem ser promovidas e incluídas no âmbito do conceito de economia circular, através de soluções para um sistema de energia de baixo carbono, maximizando as participações de

---

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB. Pesquisadora Associada do GESEL.

<sup>2</sup> Pesquisadora Júnior do GESEL.

<sup>3</sup> Pesquisador Júnior do GESEL.

<sup>4</sup> Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB.

<sup>5</sup> Professor do Instituto de Economia da UFRJ e coordenador do GESEL.

energia renovável, reduzindo o consumo de combustível fóssil e fornecendo serviços necessários para aumentar a eficiência energética a custos competitivos. A economia circular está, portanto, intimamente relacionada ao conceito de transição energética, que se baseia nos pilares de eficiência energética e energia renovável.

Conceitualmente, a economia circular opera como um sistema que substitui o modelo linear de “fim de vida” por reaproveitamento, reciclagem, recuperação e eliminação de resíduos que podem impactar o meio ambiente (Macarthur, 2012). Este sistema implica em uma compreensão diferente das necessidades humanas, separando aquelas essenciais das não essenciais, e da concepção dos processos e produtos, com foco na sustentabilidade e no desperdício amplamente reduzido ou totalmente eliminado (Bonciu, 2020).

Os fluxos circulares dos processos e produtos são melhores do ponto de vista ambiental, uma vez que apresentam o potencial de reduzir as necessidades de energia, evitando que recursos energéticos e resíduos sejam descartados. A reciclagem, a reutilização, a substituição de materiais, os *designs* mais eficientes e o uso de recursos sustentáveis fazem parte deste conceito (Kalchenko *et al.*, 2019).

Dentro deste contexto, segundo Bonciu (2020), o hidrogênio limpo é considerado essencial pela União Europeia para o cumprimento da meta de emissões zero para 2050, além de apresentar uma multiplicidade de utilizações, permitindo a implementação de um verdadeiro mecanismo de economia circular em que os insumos são provenientes da natureza (água, energia solar e eólica, biomassa).

O hidrogênio possui tecnologias de produção e uso amplamente disponíveis e diversificadas, com uma infinidade de recursos a serem utilizados (Bonciu, 2020). Para se tornar um combustível verdadeiramente sustentável e limpo, contudo, o hidrogênio deve ser produzido a partir de fontes de energia renováveis ou com emissões mínimas e alta eficiência (Nadaleti, *et al.*, 2020).

Neste sentido, destaca-se o processo de captura e armazenamento de carbono, denominado CCUS (do inglês *Carbon Capture, Utilization and Storage*),

uma tecnologia capaz de converter quimicamente o CO<sub>2</sub> em produtos de maior valor agregado e, assim, descarbonizar até mesmo os setores fortemente emissores de gases de efeito estufa.

O CCUS pode ser atrelado à produção de hidrogênio, dando origem ao chamado hidrogênio azul, gerado a partir da reforma do gás natural, um combustível fóssil, com o dióxido de carbono emitido capturado para usos posteriores. Uma dessas aplicações é a produção de *e-fuels*, na qual o CO<sub>2</sub> é combinado com hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V) para a criação de combustíveis caracterizados neutralidade carbônica.

Assim, a economia circular nos mostra que os hidrocarbonetos possuem o potencial de continuar a desempenhar um papel importante, mesmo com a transição para baixas emissões, desde que as tecnologias de CCUS sejam implantadas e opções de reutilização e reciclagem sejam incentivadas.

Deve-se mencionar que, além da produção de hidrogênio, as tecnologias de CCUS podem ser adaptadas às indústrias siderúrgicas, cimenteiras, petroquímicas e de produtos químicos, bem como à produção de combustíveis sintéticos para transporte de longa distância ou, ainda, às usinas elétricas a carvão, evitando a emissão de bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> atreladas ao setor de energia. O CCUS também pode estimular a criação de *clusters* industriais, por meio da combinação de fluxos de CO<sub>2</sub> para geração de energia, gerenciamento de resíduos e fabricação de produtos.

Ademais, observa-se que alguns processos biológicos para a produção de hidrogênio também têm ganhado atenção nos últimos anos, devido à sua natureza comparativamente favorável ao meio ambiente e ao fluxo circular (Sharma *et al.*, 2019). Neste sentido, tem-se o exemplo da utilização de bio-resíduos para produzir o bio-hidrogênio, de modo a substituir a produção convencional de hidrogênio, que ocorre através da reforma do gás natural, pela reforma do metano. O bio-hidrogênio é uma excelente alternativa para resolver simultaneamente questões relacionadas à demanda de energia e ao gerenciamento de resíduos (Lee, 2020).

Vários países em desenvolvimento já produzem hidrogênio a partir de esgoto e resíduos agrícolas, de laticínios, pecuários e industriais (Nizami *et al.*, 2017). Sua produção, especialmente por fermentação escura, é segura, econômica, reciclável, fechada e sustentável (Lee, 2019). O bio-hidrogênio configura-se, portanto, como a força motriz na transição para uma economia circular e ao desenvolvimento sustentável.

Vale destacar, ainda, o hidrogênio branco, produzido pela gaseificação de fontes renováveis, como biomassa ou plásticos em final de vida. A gaseificação é uma oxidação controlada, realizada com oxigênio ou ar e leva à formação do gás de síntese, um gás que contém, essencialmente, hidrogênio e monóxido de carbono (Ortigao, 2020).

Estima-se que, anualmente, 10 bilhões de Nm<sup>3</sup> de hidrogênio são perdidos em fluxos de gases residuais industriais na Europa. A captura e a recuperação desses resíduos poderiam ser aproveitados para produzir hidrogênio, além de reforçar o conceito e a necessidade da economia circular.

O processo de captura e tratamento dos gases exige a disponibilidade de tecnologias eficazes para a recuperação e a purificação do hidrogênio, bem como a avaliação técnico-econômica da integração do gás reciclado em uma cadeia de abastecimento sustentável. Entretanto, a necessidade do avanço da economia circular e do hidrogênio no mundo é inegável, uma vez que é imprescindível reduzir não só as emissões de carbono, como também as perdas econômicas e materiais (Yanez *et al.*, 2019).

Por fim, segundo a Estratégia Portuguesa para o Hidrogênio, o tratamento adequado e a reutilização da água residual tratada pode constituir uma alternativa econômica ambientalmente sustentável para a produção de hidrogênio. No documento, ressalta-se que apenas 1,2% da água residual tratada é reutilizada no país. Deste modo, o tratamento e a reutilização tornam-se interessantes para aumentar a disponibilidade de água, em países com restrição deste recurso, para produzir hidrogênio verde.

A partir das discussões apontadas aqui, conclui-se que o hidrogênio é um importante vetor para viabilizar a descarbonização, mediante soluções com

o potencial para transformar a economia linear em uma economia circular do carbono, devendo avançar nos próximos anos. Neste sentido, maiores estudos e investimentos devem ser realizados para desenvolver esse mercado sustentável, com a redução de perdas materiais e econômicas, aumentando a rentabilidade dos processos e mitigando o aquecimento global. Para isso, a captura e o armazenamento de CO<sub>2</sub> devem ser acelerados, através de incentivos econômicos e regulamentações adequados, que ajudariam a favorecer esta tecnologia e diminuir seus custos iniciais.

Combinar energia renovável, reaproveitamento de resíduos e captura, armazenamento e utilização de carbono podem ser essenciais para o sucesso da mitigação de carbono e da transição energética.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baylin-Stern, A.; Berghout, N. **Is carbon capture too expensive?** IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>. Acesso em: 20 de junho de 2021.

Bonciu, F. **The European Union Hydrogen Strategy as a significant step towards a circular economy.** Romanian Journal of European Affairs, Volume 20, nº 02, p. 36-48, 2020.

Braun, A.; Toth, R. **Circular economy: National and global policy-overview.** Clean Techn Environ Policy, Volume 23, pp. 301-304, 2020.

Kalchenko, O.; Evseeva, S.; Evseeva, O.; Plis, K. **Circular economy for the energy transition in Saint Petersburg, Russia.** EDP Sciences, 2019. Disponível em: [https://www.google.com/url?q=https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/36/e3sconf\\_spbwosce2019\\_02030.pdf&sa=D&source=editors&ust=1626302926120000&usg=AOvVaw1rpQx4qDLsBcvXT\\_jLx1Kj](https://www.google.com/url?q=https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/36/e3sconf_spbwosce2019_02030.pdf&sa=D&source=editors&ust=1626302926120000&usg=AOvVaw1rpQx4qDLsBcvXT_jLx1Kj). Acesso em: 14 de julho de 2021.

Klimes, J. J.; Varbanov, P. S.; Walmsley, T. G.; Foley, A. **Process integration and circular economy for renewable and sustainable energy systems.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 116, pp. 109435, 2019.

Lazarevic, D.; Valve, H. **Narrating expectations for the circular economy: Towards a common and contested European transition.** Energy Research & Social Science, Volume 31, pp. 60-69, 2017.

Lee, D. H. **Biohydrogen yield efficiency and the benefits of dark, photo and dark-photo fermentative production technology in circular Asian economies.** Hydrogen Energy, Volume 46, n° 27, pp. 13908-13922, 2020.

Lee, D. H. **Efficiency and economic benefit of dark-fermentative biohydrogen production in Asian circular economies: Evaluation using soft-link methodology with data envelopment analysis (DEA) and computable general equilibrium model (CGE).** Hydrogen Energy, Volume 45, n° 06, pp. 3688-3698, 2019.

Li, S. **Development status of hydrogen energy and application prospects.** Applied Mechanics and Materials, Volume 273, pp. 70-74, 2013.

Martinez-Rodriguez, A.; Abanades, A. **Comparative analysis of energy and exergy performance of hydrogen production methods.** Entropy, Volume 22, n° 11, pp. 1286, 2020.

Nadaleti, W. C.; dos Santos, G. B.; Lourenco, V. A. **Integration of renewable energies using the surplus capacity of wind farms to generate H<sub>2</sub> and electricity in Brazil and in the Rio Grande do Sul state: Energy planning and avoided emissions within a circular economy.** Hydrogen Energy, Volume 45, n° 46, pp. 24190-24202, 2020.

Ng, K. S.; Phan, A. N. **Evaluating the techno-economic potential of an integrated material recovery and waste-to-hydrogen system.** Resources, Conservation and Recycling, Volume 167, pp. 105392, 2021.

Nizami, A. S.; Rehan, M.; Waqas, M.; Naqvi, M.; Ouda, O. K. M.; Shahzad, K.; Miandad, R.; Khan, M.Z.; Syamsiro, M.; Ismail, I. M. I.; Pant, D. **Waste biorefineries: Enabling circular economies in developing countries.** Bioresource Technology, Volume 241, pp. 1101-1117, 2017.

Ortigao, F. **White Hydrogen.** Recupera - The white hydrogen company, 2020.

Disponível

em:

[https://www.researchgate.net/publication/347886720\\_White\\_Hydrogen](https://www.researchgate.net/publication/347886720_White_Hydrogen).

Acesso em: 15 de julho de 2021.

Priyadarshini P.; Abhilash P. C. **Circular economy practices within energy and waste management sectors of India: A meta-analysis**. *Bioresource Technology*, Volume 304, pp. 123018, 2020.

República Portuguesa. Ministério do Ambiente e Ação Climática. **Estratégia Nacional para o Hidrogénio**. Portugal, 2020.

Rossetti, I.; Ramis, G.; Ed Ambientale, Civile. **Photocatalytic approaches to circular economy: CO<sub>2</sub> photoreduction to regenerated fuels and chemicals and H<sub>2</sub> production from wastewater**. 2019.

Seidl, L. G. *et al.* **Concepts and sustainability assessment of the circular carbon economy: Chemical recycling for olefin production**. *Chemie Ingenieur Technik*, Volume 93, nº 03, pp. 421–437, 2021.

Sharma, S.; Basu, S.; Shetti, N. P.; Aminabhavi, T.M. **Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy**. *Hydrogen Energy*, Volume 46, nº 27, pp. 13908-13922, 2019.

Yanez, M.; Ortiz, A.; Brunaud, B.; Grossmann, I. E.; Ortiz, I. **Contribution of upcycling surplus hydrogen to design a sustainable supply chain: The case study of Northern Spain**. *Applied Energy*, Volume 231, nº 1, pp. 777-787, 2018.