



Amônia renovável

Pesquisadores brasileiros desenvolvem novo processo para produzir de forma sustentável insumo largamente usado na agricultura

YURI VASCONCELOS

Matéria-prima essencial para a fabricação de fertilizantes nitrogenados, empregados em larga escala no setor agrícola, a amônia é produzida a partir de gás natural em um processo industrial intensivo em energia, pois exige temperatura e pressão elevadas. Para cada tonelada (t) gerada do produto, 2 t de dióxido de carbono (CO_2) são lançadas na atmosfera. Estima-se que a produção industrial mundial de amônia responda pela liberação anual de cerca de 450 milhões de t de gases de efeito estufa, em torno de 1% a 2% das emissões totais do planeta. A fim de enfrentar esse problema, há um esforço global para tornar viáveis rotas sustentáveis de produção de amônia a partir de insumos e fontes de energia renováveis.

No Brasil, uma dessas iniciativas é liderada pelo químico Raphael Nagao, do Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas (IQ-Unicamp). À frente de um grupo de pesquisadores, ele desenvolveu um processo inovador que recorre à energia renovável para converter

nitrato, um poluente presente em águas residuais, diretamente em amônia, reduzindo a dependência do método tradicional, que depende de combustível fóssil.

“A tecnologia que criamos, patenteada no INPI [Instituto Nacional da Propriedade Industrial] e licenciada no ano passado para a startup BGEnergy, de Campinas, recorre a um processo de redução eletroquímica para transformar nitrato em amônia renovável ou verde, reduzindo custos e impactos ambientais”, informa Nagao. Nesse tipo de reação, a molécula de nitrato (NO_3^-) ganha elétrons e sofre uma alteração na estrutura atômica, possibilitando sua conversão em amônia. Iniciado em 2019, o trabalho recebeu quatro auxílios da FAPESP e foi desenvolvido no âmbito do Centro de Inovação em Novas Energias (Cine), apoiado pela Fundação e pela empresa Shell. Também fazem parte da equipe os pesquisadores Thiago de Moraes Mariano, Gabriel Floriano Costa e Manuel Edgardo Gomez Winkler, todos do IQ-Unicamp.

A redução eletroquímica de nitrato em amônia, explica Nagao, funciona como uma “reciclagem

Quantificação
colorimétrica de amônia:
quanto mais verde
o líquido, maior
é a concentração

inteligente”, que usa eletricidade para transformar um poluente comum da água em um recurso valioso – no caso, fertilizantes agrícolas. “Imagine um sistema com dois bastões metálicos mergulhados em uma solução com água poluída que contenha nitrato. Quando ligamos a energia, o eletrodo negativo [cátodo] atrai as moléculas de nitrato e começa a bombardeá-las com elétrons. Esse processo enfraquece e rompe gradualmente as ligações entre o nitrogênio e o oxigênio do nitrato, removendo os átomos de oxigênio”, descreve o pesquisador da Unicamp. Para que a transformação seja completa, o sistema busca átomos de hidrogênio presentes na própria água, unindo-os ao átomo de nitrogênio que restou.

A amônia é um composto químico formado por um átomo de nitrogênio e três de hidrogênio (NH_3). Em condições ambientais, a substância é um composto volátil, que pode existir na forma gasosa ou dissolvida em água. Quando resfriada ou comprimida, a amônia passa para o estado líquido. Cerca de 80% da produção global do insumo é destinada às fábricas de fertilizantes; o restante é usado para outras aplicações industriais, entre elas a fabricação de plásticos e explosivos.

“O grande desafio dessa técnica é garantir que o nitrogênio presente no nitrato se transforme em amônia, e não em gás nitrogênio comum [N_2], que simplesmente escaparia para a atmosfera”, diz Nagao. Para isso, o grupo desenvolveu materiais especiais, chamados catalisadores, que revestem os eletrodos (os bastões metálicos) e funcionam como guias químicos. “A molécula de nitrato adere aos materiais na posição correta, facilitando a entrada de exatamente oito elétrons e nove prótons para cada molécula. É como uma linha de montagem em escala atômica na qual cada peça precisa ser encaixada na ordem certa para que, ao final do ciclo, a amônia seja liberada de forma eficiente e pura.”

Diferentemente do método tradicional, chamado Haber-Bosch, o processo proposto pela equipe paulista pode ocorrer em temperatura ambiente e ser alimentado por fontes renováveis de energia, como painéis solares ou turbinas eólicas. “A pesquisa da Unicamp apresenta uma alternativa que rompe com o modelo tradicional da indústria petroquímica ao buscar novos caminhos mais eficientes do ponto de vista energético e ambiental

para a síntese de amônia”, avalia o químico Ernesto Pereira, do Departamento de Química da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), pesquisador principal do programa Hidrogênio de Baixo Carbono (LCH₂), do Cine. “Ao trocar combustíveis fósseis por energia limpa, reduz-se de forma direta a pegada de carbono associada à produção de fertilizantes.”

Segundo Pereira, em um contexto global marcado pela urgência climática e pela busca da segurança alimentar, a pesquisa brasileira posiciona o país na fronteira internacional do desenvolvimento de tecnologias para fertilizantes de baixo carbono, abrindo perspectivas para reduzir a dependência de insumos importados.

“Um dos diferenciais do processo coordenado por Nagao é que a produção de amônia acontece em condições muito mais simples do que as usadas pela indústria tradicional. E emprega eletricidade como principal fonte de energia”, acrescenta o pesquisador da UFSCar, que não fez parte do grupo responsável pelo estudo.

O outro diferencial do método proposto é a utilização do nitrato presente em águas residuárias e efluentes industriais. “O composto vem principalmente do escoamento de fertilizantes agrícolas e do descarte de esgotos domésticos e industriais que poluem”, esclarece Nagao. “A nova técnica ajuda a limpar o que descartamos, reaproveitando o que antes seria apenas poluição invisível, transformando o passivo ambiental em ativo econômico.”

Contudo, ainda há problemas a serem resolvidos. “Usar efluentes industriais para gerar produtos energéticos é a solução para tornar viável o custo de tratar esses resíduos. Mas um grande obstáculo para utilizar nitrato no processo de fabricação de amônia verde é a variação das características químicas desse resíduo ao longo do ano somada, em muitos casos, a uma alta carga orgânica encontrada no efluente”, alerta a química Juliana Brito, do Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista (Unesp), *campus* de Araraquara. “Conseguir otimizar de forma eficiente um processo de larga escala com variação constante da composição da matéria-prima é, certamente, o maior desafio do processo.”

Outra limitação da rota criada na Unicamp é a quantidade de nitrato necessária para a conversão em amônia. Como o volume da substância em rios e aquíferos é baixa, será preciso fazer uma concentração prévia dela. Uma alternativa, segundo o grupo da Unicamp, seria a conversão de gás nitrogênio diretamente do ar em amônia. Essa técnica já vem sendo usada pela startup australiana Jupiter Ionics, uma spin-off da Universidade Monash, de Melbourne, criada em 2021.

A oferta global de amônia verde é atualmente residual e representa menos de 1% do mercado do insumo. Dados do relatório “Green ammonia market”, da consultoria MarketsandMarkets, projetam que o setor terá um faturamento de US\$ 6,16 bilhões em 2030 ante os US\$ 290 milhões em 2024. A rota tradicional para a produção de amônia renovável utiliza o processo de síntese Haber-Bosch – o mesmo empregado na síntese da amônia oriunda do gás natural –, mas usa como insumos o hidrogênio verde, obtido a partir da eletrólise da água (ver Pesquisa FAPESP nº 333), e o nitrogênio capturado do ar. No processo convencional, o hidrogênio tem origem em um combustível fóssil. Como a energia usada no processo produtivo da amônia verde provém de fontes renováveis, não há geração de CO₂.

“Investimentos milionários vêm sendo feitos em diversos países para gerar amônia a partir de um processo ambientalmente amigável”, destaca Brito, da Unesp. “Como nossa produção de alimentos depende da amônia, rotas que sejam economicamente viáveis de fabricar esse composto de forma menos onerosa ao ambiente são de

extrema importância. Além de o Brasil ser uma potência no cenário agrícola mundial, com essa pesquisa poderemos nos destacar na produção de fertilizantes sustentáveis.”

Seis artigos do grupo de Campinas detalhando aspectos do novo processo já foram publicados em periódicos científicos internacionais. Em um deles, divulgado em janeiro de 2024 na *Chem Catalysis*, os pesquisadores identificaram que o cobre e seus óxidos são bons catalisadores para a produção de amônia. Esse trabalho motivou a patente e o licenciamento da tecnologia.

Em um artigo mais recente, elaborado com uma equipe do Imperial College, de Londres, que foi capa da revista *Advanced Science*, em agosto de 2025, o grupo mostrou como átomos isolados poderiam ser usados como catalisadores para a reação. “Utilizamos a linha Carnaúba do acelerador de partículas Sirius [espectroscopia de absorção de raios X] para comparar a eficácia de nosso processo com o Haber-Bosch. Como demonstrado, ainda não atingimos valores de conversão e eficiência tão grandes quanto o método tradicional, mas já o ultrapassamos na taxa de produção”, conta Nagao.

MATURIDADE TECNOLÓGICA

Apesar dos bons resultados obtidos em escala laboratorial, a tecnologia nascida na Unicamp ainda se encontra em fase de pesquisa e desenvolvimento (P&D), ressalta Vítor Riedel, diretor-executivo da BGEnergy, e não é um produto pronto para lançamento comercial. “Estimamos que o nível de maturidade tecnológica [TRL] dela seja 4, correspondente à validação funcional dos componentes em ambiente de laboratório”, diz. A escala de níveis de maturidade tecnológica foi criada pela agência espacial norte-americana Nasa e é empregada para avaliar o estágio de desenvolvimento de inovações tecnológicas em diferentes setores da economia. Vai da pesquisa básica (1) à operação comercial real (9).

Riedel esclarece que, no curto prazo, estimado entre dois e três anos, a expectativa é avançar em projetos de P&D colaborativos com empresas interessadas em soluções de baixo carbono para a produção de amônia, incluindo testes em escala-piloto. “Considerando os ciclos típicos de maturação tecnológica, um horizonte de médio prazo, entre cinco e oito anos, é realista para aplicações comerciais iniciais, condicionado a resultados consistentes em escala maior, integração com fontes renováveis, viabilidade econômica e interesse de parceiros industriais”, pondera o executivo da BGEnergy. ●

Os projetos e os artigos científicos consultados para esta reportagem estão listados na versão on-line.



Reator usado para converter nitrato em amônia renovável