



POR MAURO BERNI

Pesquisador das áreas de meio ambiente e energia do Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE), da Universidade de Campinas (Unicamp-SP)
E-mail: mberni@unicamp.br

TECNOLOGIAS VERDES PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES

A visão de sustentabilidade nos processos de produção consiste em buscar o máximo aproveitamento dos insumos e recursos empregados, como matérias-primas, água, energia e demais utilidades, com a menor quantidade possível de efluentes líquidos, resíduos sólidos e emissões atmosféricas.

A crise da escassez de água doce no mundo tem sido um dos principais problemas a serem enfrentados para garantir a sustentabilidade dos sistemas naturais no planeta. No Brasil, mesmo como detentor de grandes reservas deste recurso, já se pode sentir nas grandes cidades os efeitos da sobrecarga de abastecimento irregular, saneamento deficiente e poluição de mananciais, reflexos da urbanização não planejada e do mau uso das fontes de água.

A cobrança pelo uso da água de uma bacia hidrográfica, decorrente de mecanismos regulatórios que estipulam o valor econômico da água, aponta para uma tendência de aumento dos custos de produção, em função das taxas de captação, consumo e descarte de efluentes industriais.

A água é a base do desenvolvimento sustentável, isso porque provê inúmeros serviços que contribuem para a redução da pobreza e para o crescimento econômico. Ou seja, a água influencia no bem-estar e na inclusão social, afetando os meios de subsistência de bilhões de pessoas. Entretanto, há vários desvios ocasionados, muitas vezes, por falhas de governança, que afetam a qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos, comprometendo a geração de benefícios sociais e econômicos (Lopes, *et al.*, 2019).

Além do gerenciamento adequado para alocação dos recursos hídricos, a demanda global é fortemente influenciada pelo crescimento do setor industrial, dos sistemas de geração de energia, aumento populacional, entre outros. Assim, estima-se que haja um aumento da demanda hídrica mundial em torno de 55% em 2050.

Embora o Brasil seja privilegiado mundialmente com relação à disponibilidade de água doce, abrangendo em torno de 12% de sua totalidade, atualmente vive um cenário contraditório: a escassez de água e o colapso no abastecimento público (Lopes *et al.*, 2019). O problema não está associado apenas ao consumo de água, mas também ao volume e às características do efluente gerado que deverá ser tratado.

Comumente cada indústria trata seus efluentes em uma estação de tratamento própria, compreendendo somente até

o nível secundário, ou seja, com tratamento físico em grades e decantadores e, posteriormente, por tratamento biológico. Porém, tais métodos convencionais apresentam limitações na degradação de poluentes não biodegradáveis, transferindo-os apenas de fase e gerando um novo problema quanto à disposição final do efluente.

De modo geral, a remoção dos poluentes está associada aos conceitos de nível de tratamento, usualmente classificados em nível preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar tem como objetivo a remoção de sólidos grosseiros em suspensão, enquanto o primário atua na remoção de sólidos sedimentáveis, ou seja, em ambos os casos há um predomínio de tratamentos físicos.

Já nos tratamentos em nível secundário, o mecanismo de atuação predominante é o biológico, o qual visa à remoção de matéria orgânica e eventuais cargas de nutrientes específicos, como nitrogênio e fósforo, como lagoas de estabilização e variações, reatores anaeróbios, reatores aeróbios, lodos ativados etc. Já o tratamento terciário, atualmente pouco utilizado em países em desenvolvimento, é indicado para remoção de poluentes específicos tóxicos ou não biodegradáveis, como nutrientes, compostos aromáticos e micropoluentes, ou ainda na remoção complementar de poluentes residuais do tratamento secundário (Von Sperling, 2005).

Para uma estação de tratamento de efluentes industrial, os diversos componentes presentes na água e que comprometem o seu grau de pureza podem ser retratados em termos de suas características físicas, biológicas e químicas. Do ponto de vista ambiental, a água deve ser focada quanto ao consumo crítico consciente, ao seu reuso e ao conhecimento de legislação ambiental.

Nesse contexto, é promissor as tecnologias verdes para degradação de poluentes na água industrial (efluente), como as que seguem, conforme Corrêa e Zuín (2009):

■ **Método biológico:** O método convencional mais utilizado para o tratamento de efluentes contendo compostos orgânicos, devido ao seu baixo custo e à possibilidade de tratar grande volume de efluentes. O processo ocorre nas lagoas chamadas facultativas, com superfície aeróbia e fundo anaeróbio. O sistema de lodo ativado também é muito utilizado, consistindo da degradação da matéria orgânica por meio de microrganismos (bactérias, algas, protozoários e fungos) na presença de nutrientes como fósforo, enxofre e nitrogênio. Nessas con-

dições, ocorre a quebra e oxidação dos compostos orgânicos, gerando, assim, compostos mais simples como o dióxido de carbono e água, novos microrganismos e biomassa, que constituem o lodo resultante do tratamento. O lodo resultante deve sofrer tratamento adicional, geralmente compreendendo etapas de estabilização e/ou geração de energia por meio da digestão anaeróbia com a produção de biogás.

■ **Ozonização:** Um oxidante ideal, do ponto de vista ambiental, é aquele que não leva à formação de subprodutos com toxicidade igual ou superior após o tratamento de um determinado efluente e que seja de fácil obtenção. Por ser um oxidante muito forte, a aplicação de ozônio em processos de tratamento de efluentes possui grandes vantagens, pois sua decomposição não resulta em espécies nocivas, uma vez que é rápida e espontaneamente convertido em oxigênio. O processo de ozonização tem encontrado aplicação no tratamento de efluentes contendo contaminantes orgânicos, o que inclui predominantemente a transformação de poluentes tóxicos (aromáticos, cloro-aromáticos e especificamente, pesticidas), a oxidação parcial de compostos biologicamente refratários (pré-tratamento à biodegradação) e a remoção de cor.

■ **Processos fotocatalíticos:** São processos fotoquímicos em que uma espécie semicondutora é irradiada para promoção de um elétron da banda de valência, BV, para a banda de condução, BC. O semicondutor mais utilizado na degradação dos compostos orgânicos é o dióxido de titânio, na forma anatase. Seu uso é justificado com base em propriedades interessantes como: possibilidade de ativação por luz solar, estabilidade fotocatalítica, insolubilidade em água, estabilidade química em uma ampla faixa de pH, possibilidade de imobilização em sólidos, baixo custo e ausência de toxicidade.

■ **Processos eletroquímicos:** Nesses processos, compostos orgânicos podem ser convertidos em produtos biodegradáveis ou, eventualmente, em dióxido de carbono e água, em um processo também chamado de combustão eletroquímica. Configura-se como uma técnica bastante versátil onde o único reagente envolvido é o elétron, que é um reagente limpo, comumente sem a necessidade de reagentes extras. A reação de oxidação pode ocorrer por troca direta de elétrons entre o composto orgânico e a superfície do eletro-

do ou, também por troca indireta, quando há formação de uma espécie eletroativa oxidante intermediária no eletrodo. Quando a eletrólise é conduzida de tal forma que a reação de desprendimento de oxigênio ocorre simultaneamente com a reação de oxidação de interesse, a oxidação indireta parece ser o principal processo de transferência de átomos de oxigênio para o composto a ser oxidado.

■ **Processos fotoeletroquímicos:** Esses processos consistem na combinação dos processos fotocatalíticos e eletroquímicos, ou seja, a aplicação de uma densidade de corrente ou potencial juntamente com a iluminação de uma superfície semicondutora. Esta tecnologia tem sido estudada por alguns pesquisadores na degradação de poluentes orgânicos, utilizando eletrodos denominados ânodos dimensionalmente estáveis. Essa combinação de processos tem mostrado um efeito sinérgico; as velocidades de degradação de poluentes orgânicos chegam até uma ordem de grandeza maior quando comparadas com a soma daquelas dos processos individuais.

Não obstante a disponibilidade de tecnologias verdes para o tratamento de efluentes industriais, existe sempre a necessidade da redução de custos nas várias etapas de processo. No que diz respeito ao tratamento de efluentes, foram mostrados tipos que podem ser adotados, contudo, os custos visando a adequação à legislação vigente podem ser altos, de modo que é fundamental obter-se uma compreensão melhor dos processos produtivos e minimização da geração de efluentes. A Tabela 1 mostra algumas vantagens e desvantagens de tecnologias verdes para o tratamento de efluente industrial. ■

Referências:

CORRÊA, A. G., Zuín, V., Química verde: fundamentos e aplicações, São Carlos-SP, EDUFSCAR, 2009, p. 172.
LOPES, *et al.*, Meio ambiente urbano e industrial: Tecnologias Ambientais, Cap. 1 Tecnologias Avançadas de Tratamento de Efluentes Industriais, Exemplos no Brasil e Alemanha, 2019, p. 11-23.
VON SPERLING, M., Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 3 ed., 2005, p. 452.

TABELA 1

Vantagens e desvantagens de tecnologias verdes para o tratamento de efluente industrial

Tecnologia Verde	Vantagens	Desvantagens
Biológica	Baixo custo	Difícil degradação de compostos orgânicos aromáticos
Ozonização	Aplicação no estado gasoso sem alteração de volume	Baixo tempo de meia vida (20 min)
Fotocatalítico	Não há geração de lodo	Formação de subprodutos e necessidade de fontes artificiais de radiação
Eletroquímico	Facilidade de automação e não há geração de lodo	Alto custo de eletricidade
Fotoeletroquímico	Não requer a adição de produtos químicos e não há geração de lodo	Alto custo de eletricidade e necessidade de fontes artificiais de radiação

Fonte: Corrêa e Zuín, 2009