

II-890 – LIMITAÇÕES E POTENCIALIDADES PARA A REMOÇÃO DE NITROGÊNIO AMONIAICAL NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO ESTADO MINAS GERAIS

Thiago Bressani Ribeiro ⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Fundação Mineira de Educação e Cultura (FUMEC). Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais e em Engenharia de Bioprocessos pela Universidade de Gent (Bélgica). Sócio-diretor do Centro de Referência em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto.

Lariza dos Santos Azevedo ⁽¹⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Mestre e Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Sócia-diretora do Centro de Referência em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto.

Isaac Volschan Junior ⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Santa Úrsula. Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Professor Titular do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica da UFRJ.

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo ⁽¹⁾

Engenheiro Civil e Sanitarista pela Universidade Federal de Minas Gerais. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle (Inglaterra). Professor titular aposentado da UFMG. Sócio-diretor do Centro de Referência em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto.

Endereço ⁽¹⁾: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Campus Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31270-901 - Brasil - e-mail: thiago.bressani@cretes.com.br; ⁽²⁾: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica. Centro de Tecnologia UFRJ, bloco D, sala 204. Cidade Universitária CEP 21941-972 - Rio de Janeiro, RJ – Brasil

RESUMO

Padrões restritivos de lançamento de nitrogênio no efluente de sistemas de tratamento de esgotos sanitários têm sido adotados no contexto mundial. No Brasil, embora não haja padrão de lançamento de nitrogênio amoniacal, legislações estaduais têm sido promulgadas, tal como ocorrido recentemente em Minas Gerais (DN COPAM-CERH/MG nº08/2022). Tendo em vista a premente necessidade de implantação de unidades de tratamento ou adequação das ETES implantadas em Minas Gerais a fim de se alcançar o limite de nitrogênio amoniacal estabelecido (20 mg.L^{-1}), este trabalho avaliou as limitações e potencialidades das diferentes tipologias de tratamento empregadas no estado e eventuais alternativas conceituais para o *retrofitting* das ETES existentes. Foi realizado o levantamento das tipologias de tratamento de esgoto adotadas em Minas Gerais, seguido da análise crítica das limitações e potencialidades do parque de ETES do estado. Das 627 estações identificadas, observou-se que 434 (69%) são baseadas em reatores anaeróbios do tipo fluxo ascendente e manta de lodo (reator UASB), seguidos (329) ou não (105) de etapas de pós-tratamento. As demais ETES empregam diferentes configurações de lagoas de estabilização (68), lodos ativados (9) e tanques sépticos (54). Devido ao expressivo número de ETES baseadas em tecnologias exclusivamente anaeróbias (35%), verificou-se a necessidade de inclusão de unidades de pós-tratamento aeróbias que promovam a oxidação do N-amoniacal. Uma importante parcela das ETES implantadas (34%) consistindo de reatores UASB seguidos de filtros biológicos percoladores possui potencial para atender ao novo padrão de lançamento, não obstante, há que se avaliar as cargas orgânicas aplicadas e demais condições operacionais de modo a assegurar que a eficiência requerida seja alcançada. Diversas intervenções e alternativas tecnológicas podem ser incorporadas no parque de ETES do estado a fim de garantir a adequada remoção de nitrogênio amoniacal, sejam elas simplificadas, complexas, compactas ou extensivas. Todavia, é imprescindível a inclusão de rotinas de monitoramento adicionais a fim de garantir a operação adequada das unidades onde ocorre a remoção de nitrogênio amoniacal. Por fim, destaca-se que o cotejo tecnológico de alternativas deve contemplar as peculiaridades de cada localidade, considerando as diversidades regionais do estado, maturidade tecnológica, robustez operacional e capacidade de implantação e de operação do prestador de serviço, garantindo que a adequação/tecnologia escolhida seja eficiente e aderente à realidade socioeconômica do local.

PALAVRAS-CHAVE: reator UASB, pós-tratamento, padrão de lançamento, nitrificação

INTRODUÇÃO

A eutrofização tem sido reportada como uma das principais consequências negativas associadas ao lançamento excessivo de nitrogênio em cursos d'água (RAHIMI; MODIN; MIJAKOVIC, 2020). A ocorrência deste fenômeno e impactos relacionados poderiam ser reduzidos significativamente a partir do controle da carga de nutrientes lançada nas bacias hidrográficas (HEISLER et al., 2008). Nesse cenário, padrões restritivos de lançamento de nitrogênio têm sido aplicados no contexto mundial (DELGADO VELA; DICK; LOVE, 2018; RAHIMI; MODIN; MIJAKOVIC, 2020). A China, por exemplo, estabelece que as concentrações de nitrogênio amoniacal (N-amoniacal) e total no esgoto tratado devem ser inferiores a 5 e 15 mg.L⁻¹, respectivamente (GB18918-2002) (DU et al., 2015). No que se refere ao cenário brasileiro, em âmbito federal, a Resolução CONAMA 430/2011 não estabelece padrões de lançamento para o nitrogênio total, determinando somente que a concentração de N-amoniacal deve ser inferior a 20 mg.L⁻¹ para efluentes de origem exclusivamente industrial. Não obstante, a efetiva concentração de N-amoniacal no esgoto sanitário tratado não deve ferir os níveis toleráveis para a classe de enquadramento do corpo receptor, conforme diretrizes estabelecidas na Resolução CONAMA 357/2005.

Alguns entes federativos têm promulgado legislações para restringir o lançamento de N-amoniacal proveniente de estações de tratamento de esgoto (ETEs) em coleções hídricas (p.ex.: Santa Catarina, São Paulo e Rio de Janeiro). Em dezembro de 2022, o estado de Minas Gerais publicizou a Deliberação Normativa (DN) COPAM-CERH/MG n°08/2022, que define a concentração máxima de N-amoniacal de 20 mg.L⁻¹ para o lançamento de efluente oriundo de sistemas de tratamento de esgotos sanitários.

Tendo em vista a iminente necessidade de adaptação de processos de tratamento de esgoto das ETEs situadas no estado de Minas Gerais com o objetivo de promover a remoção sistemática de N-amoniacal prevista na resolução ora vigente, faz-se necessária a análise crítica das tecnologias implantadas, especialmente pelo fato da referida resolução estabelecer um prazo entre 5 e 7 anos (a depender do porte da ETE) para adequação e atendimento aos padrões estabelecidos.

OBJETIVO

O presente trabalho avaliou as limitações e potencialidades das diferentes tipologias de tratamento de esgoto sanitário adotadas no estado de Minas Gerais à luz da resolução vigente e eventuais alternativas para o *retrofitting* de ETEs existentes, considerando os contextos ambientais e socioeconômicos do estado de Minas Gerais.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi constituída de duas etapas: (i) levantamento das tipologias de tratamento de esgoto sanitário adotadas no estado de Minas Gerais e (ii) análise crítica das limitações e potencialidades do parque de ETEs do estado de Minas Gerais tendo em vista o padrão de lançamento estabelecido para nitrogênio amoniacal na referida DN COPAM-CERH/MG n°08/2022. A etapa inicial foi desenvolvida a partir da análise dos dados divulgados no Plano Estadual de Saneamento Básico do Estado (PESB) de Minas Gerais (COBRAPE, 2021), ao passo que a segunda etapa foi baseada em dados disponíveis na literatura (Von Sperling *et al.*, 2019).

RESULTADOS

No levantamento realizado pela COBRAPE (2021) para a elaboração do PESB/MG foram identificadas 627 ETEs. Destas, 62 não tiveram a tipologia de tratamento identificada. Os resultados são apresentados na Figura 1. Observa-se que 69% das ETEs existentes no estado de Minas Gerais, ou 434 estações, são baseadas em reatores anaeróbios do tipo fluxo ascendente e manta de lodo (reator UASB), seguidos (329) ou não (105) de etapas de pós-tratamento. As demais ETEs são baseadas em diferentes configurações de lagoas de

estabilização (68), lodos ativados (9) e tanques sépticos (54), sendo estes seguidos de infiltração no solo (2) ou filtro anaeróbio (52).

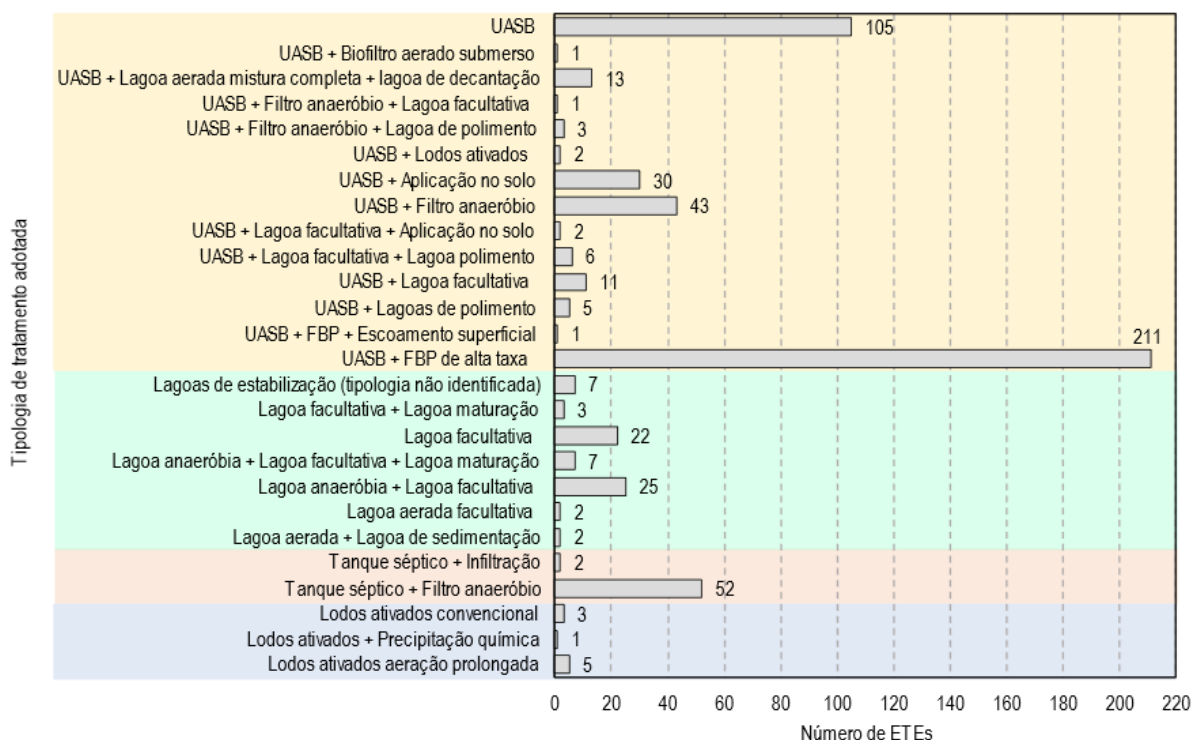


Figura 1: Distribuição de tecnologias adotadas no parque de ETEs do estado de Minas Gerais, segundo levantamento realizado pela COBRAPE (2021) para a elaboração do PESB/MG.

Diante das diversas tipologias de tratamento observadas nas ETEs do estado, a análise do potencial desempenho das tecnologias em relação à remoção de nitrogênio amoniacal foi realizada considerando três agrupamentos em função das principais conversões biológicas presentes nas unidades, a saber: (i) sistemas preponderantemente anaeróbios, (ii) sistemas anaeróbio-aeróbios e (iii) sistemas preponderantemente aeróbios.

Potencial desempenho das tecnologias adotadas em relação à remoção de N amoniacal

Sistemas preponderantemente anaeróbios

Os arranjos tecnológicos com processos exclusivamente anaeróbios referem-se aos reatores UASB, reatores UASB seguidos por filtros anaeróbios, e tanques sépticos seguidos por filtros anaeróbios. Trata-se de 32% das ETEs do estado de Minas Gerais (200 das 627 estações que foram identificadas – vide Figura 1). No que tange à possibilidade de conversão de compostos nitrogenados, há uma limitação intrínseca a esses processos em razão da natureza exclusivamente anaeróbia. Logo, estas ETEs demandariam a inclusão de unidades de pós-tratamento aeróbias que viabilizassem a oxidação da amônia para o atendimento ao novo padrão de lançamento de N-amoniacal estabelecido na DN COPAM-CERH/MG n°08/2022.

Sistemas anaeróbio-aeróbios

De forma global, os sistemas anaeróbio-aeróbios apresentam potencial para remoção de N-amoniacal em diferentes níveis, a depender da tipologia empregada para a etapa aeróbia, a qual tende a ditar a qualidade final do efluente tratado. Todavia, condições operacionais muito bem definidas devem ser garantidas, sob pena de perda de confiabilidade do processo de nitrificação (conversão de N-amoniacal a nitrato). Dentre as tipologias de pós-tratamento de reatores UASB adotadas no parque de ETEs de Minas Gerais, nota-se que apenas os sistemas compostos por reatores UASB seguidos de biofiltro aerado submerso e lodos ativados apresentam potencial de atingir elevadas eficiências de remoção de N-amoniacal (superiores a 70%). Os sistemas de biofiltro aerado submerso e lodos ativados têm como característica comum o suprimento de oxigênio à massa

líquida através de aeração mecanizada, assegurando de forma mais efetiva o atendimento às demandas para oxidação de matéria orgânica carbonácea e nitrogenada.

O arranjo tecnológico composto por reatores UASB seguidos de lagoas de polimento, particularmente as de baixa profundidade, tende a assegurar eficiências de remoção de nitrogênio amoniacal entre 50 e 65%, o que eventualmente poderia atender ao padrão de lançamento de 20 mg/L, considerando concentrações de N-amoniacal no esgoto bruto inferiores a 60 mg/L (valor tipicamente elevado considerando esgoto de origem doméstica). Comparativamente, as lagoas de maturação em série tendem a ser mais eficientes (von Sperling, 2017). As lagoas de maturação são utilizadas com o objetivo principal de remoção de organismos patogênicos, e a remoção de compostos nitrogenados é considerado um benefício complementar.

Os sistemas de tratamento compostos por reatores UASB seguidos de aplicação no solo ou filtros biológicos percoladores tendem a assegurar apenas uma nitrificação parcial do efluente (eficiências de remoção de N-amoniacal < 50%). Quanto aos primeiros, os mecanismos associados à conversão de compostos nitrogenados associam-se principalmente à absorção pelas plantas e à oxidação por microrganismos aeróbios na camada superficial do solo. Aspectos de projeto e controle operacional associados às taxas de aplicação por metro linear e regime de alimentação (ciclo de operação e períodos de repouso), além de condições ambientais como temperatura, tendem a influenciar sobremaneira o desempenho deste processo (Couracci Filho et al., 2001). No que tange ao sistema de reatores UASB seguidos de filtros biológicos percoladores, a referida nitrificação parcial do efluente é sobretudo associada aos critérios de projeto tipicamente utilizados para essas unidades considerando o pós-tratamento de efluentes anaeróbios, a saber: cargas orgânicas volumétricas entre 0,5 e 1,0 kg DBO/m³.d e preenchimento com meio suporte baseado em pedra britada. Sob tais condições, prioriza-se o desenvolvimento de microrganismos associados à remoção de carbono orgânico (fração de DBO remanescente do processo anaeróbio precedente), em detrimento àqueles relacionados à nitrificação.

Complementarmente aos sistemas anaeróbio-aeróbios, inclui-se os sistemas de lagoas de estabilização (lagoas facultativas primárias ou lagoas anaeróbias seguidas de lagoas facultativas), considerando ainda a presença de lagoas de maturação. A menos que estas últimas, que são lagoas mais rasas (profundidade usualmente menor que 1,0 m), estejam presentes no fluxograma de processo, esperam-se eficiências de remoção de N-amoniacal inferiores a 50%, o que traria riscos para obtenção de um efluente com concentração máxima de 20 mg/L.

Sistemas preponderantemente aeróbios

Os sistemas predominantemente aeróbios implantados no parque de ETEs de Minas Gerais são compreendidos especialmente pelos lodos ativados, considerando suas variantes. Potencialmente tendem a assegurar elevada eficiência de nitrificação (> 80%), desde que atendidos os requisitos de idade mínima de lodo (usualmente acima de 7 dias) e suprimento adequado de oxigênio à massa líquida. Todavia, representam uma fração diminuta das alternativas tecnológicas atualmente em operação em termos do número de estações (9 das 565 ETEs cujas tipologias de tratamento foram identificadas).

Aprimoramentos e intervenções tecnológicas passíveis de serem implementados no parque de ETEs do estado de MG

Tendo em vista as limitações mencionadas em função da natureza das tecnologias de tratamento empregadas no estado de Minas Gerais ou das condições operacionais tradicionalmente empregadas, foram elencadas adequações e intervenções passíveis de serem adotadas a fim de promover a melhoria da eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal nas ETEs que integram o parque tecnológico do estado. Trata-se de apontamentos de natureza conceitual, os quais obviamente carecem de maior detalhamento executivo para efetivamente serem julgados como economicamente viáveis para implantação.

Adequações relacionadas a sistemas preponderantemente anaeróbios

Como explicitado anteriormente, a ausência de remoção de nitrogênio amoniacal está associada à impossibilidade de se estabelecer o processo de nitrificação sob condições de ausência de oxigênio. Sendo assim, a implantação de uma unidade aeróbia de pós-tratamento do efluente anaeróbio ou conversão de unidades existentes é imprescindível para que a oxidação do nitrogênio amoniacal possa ocorrer.

Diferentes soluções são passíveis de serem adotadas, seja em termos de área requerida (unidades extensivas ou compactas) ou em relação ao sistema de aeração (natural ou mecanizado). No caso das 105 ETEs que empregam exclusivamente o reator UASB, a implantação de uma unidade aeróbia de pós-tratamento é indispensável para que a remoção de nitrogênio amoniacal seja viabilizada. Todavia, há que se considerar a possibilidade de conversão de unidades anaeróbias em aeróbias como uma alternativa para ETEs constituídas de reatores UASB ou tanques sépticos seguidos de filtros anaeróbios (totalizando 95 das 627 ETEs identificadas). Nesse caso, além da implantação de uma unidade aeróbia a jusante dos filtros anaeróbios, é possível o aproveitamento da estrutura existente para alcançar a remoção de nitrogênio amoniacal.

Cabe destacar que projetos de novas unidades ou eventuais adequações em unidades existentes devem considerar diretrizes, boas práticas operacionais e melhorias de processo a fim de garantir a remoção satisfatória de nitrogênio amoniacal. A definição da escolha tecnológica a ser adotada (p.ex.: ventilação natural ou aeração mecanizada) deve ainda considerar a realização do diagnóstico técnico em campo, contemplando a área disponível e demais aspectos de relevância do local.

Adequações relacionadas a sistemas anaeróbio-aeróbios

Em adição à adequada operação das unidades aeróbias necessária a fim de assegurar a remoção de nitrogênio amoniacal (p.ex.: fornecimento de oxigênio, alcalinidade etc.), é fundamental atentar-se à operação da unidade anaeróbia precedente (reator UASB ou tanque séptico). A operação inadequada da etapa anaeróbia de tratamento pode acarretar a perda de sólidos com o efluente e, conseqüentemente, o aumento da carga orgânica no efluente. A carga orgânica excessiva efluente favorece o desenvolvimento de microrganismos degradadores de matéria orgânica em detrimento aos responsáveis pela nitrificação, impactando negativamente a remoção de nitrogênio amoniacal na unidade de pós-tratamento (von Sperling *et al.*, 2019). Ademais, elevadas concentrações de sólidos tendem a prejudicar a transferência de massa (Bressani-Ribeiro *et al.*, 2018) e, conseqüentemente, a atividade nitrificante.

Reatores UASB seguidos de filtros biológicos percoladores (FBPs)

O incremento da nitrificação em FBPs pós-reatores UASB pode ser obtido considerando a operação sob cargas orgânicas volumétricas inferiores a 0,5 kg DBO/m³.d, ainda que se utilizem preenchimentos convencionais (britas n.º 4 e 5). Não obstante, há significativa literatura técnico-científica internacional acerca de experiências com filtros percoladores destinados à nitrificação pós-decantadores primários, considerando a utilização de meios suportes de natureza sintética (especialmente plástico) (Parker *et al.*, 1989), ou ainda experiências nacionais pós-reatores UASB, considerando avanços na última década associados ao emprego de espumas de poliuretano (Almeida *et al.*, 2011; Bressani-Ribeiro *et al.*, 2018). Nessa perspectiva, a nitrificação em FBPs pós-reatores UASB considerando o *retrofitting* das unidades existentes poderia alcançar patamares da ordem de 80 a 90%.

Complementarmente, possibilidades aventadas no meio técnico e inclusive já praticadas na concepção de projetos de FBPs pós-reatores UASB consideram a operação sob regime submerso e a utilização de aeração mecanizada para o incremento de remoção de N-amoniacal, em um processo alusivo aos biofiltros aerados submersos.

Reatores UASB seguidos de aplicação no solo

As experiências nacionais acumuladas no âmbito do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB) apontaram para este sistema com uma importante eficiência de remoção de N-amoniacal (superior a 50%) e, eventualmente, nitrogênio total (Couracci Filho *et al.*, 2001). Além da qualidade do efluente anaeróbio, atenção deve ser dada às taxas de aplicação hidráulica, períodos, frequência de aplicação e à cobertura vegetal adotada. No caso de ETEs que empregam a disposição no solo como forma de tratamento, deve-se avaliar a possibilidade de utilizar o efluente tratado para fins agrícolas na região circunvizinha à ETE, a depender da realidade local e vocação econômica da região. Tal configuração tende a eliminar excedentes de vazão a serem lançados em corpo receptor.

Reatores UASB seguidos de lodos ativados ou biofiltros aerados submersos

As ETEs dotadas de reatores UASB seguido por lodos ativados (2) ou biofiltro aerado submerso (1) pertencem à categoria de processos cuja eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal permite atender, com boa confiabilidade, ao padrão de lançamento previsto pela DN COPAM-CERH/MG nº08/2022 ($< 20 \text{ mg NH}_4^+\text{-N/L}$). Nestes casos, deve-se atentar para que o monitoramento das unidades seja realizado de forma a permitir condições operacionais adequadas ao processo de nitrificação (p.ex.: fornecimento de oxigênio, alcalinidade etc.). Especificamente quanto ao processo de lodos ativados, recomenda-se assegurar a idade do lodo superior a 8 dias (von Sperling *et al.*, 2019).

Reatores UASB seguidos de lagoa de polimento ou sistema de lagoas com lagoa de maturação

As lagoas de polimento pós-reatores UASB ou as lagoas de maturação pós-conjunto de lagoas de estabilização são capazes de assegurar eficiências de remoção de N-amoniacal que resultam em efluentes com concentrações potencialmente inferiores a $20 \text{ mg NH}_4^+\text{-N/L}$. Todavia, a inexistência de mecanismos de retenção da biomassa algal é um fator limitante ao melhor desempenho destas unidades.

Nesse caso, uma possível melhoria para o parque de ETEs de Minas Gerais baseado em lagoas de polimento ou lagoas de maturação é a utilização de filtros grosseiros de pedra no terço final das lagoas (von Sperling, 2017) ou a adoção de processos físico-químicos (p.ex.: coagulação/floculação e flotação por ar dissolvido) para efetivamente promover a remoção de algas do efluente tratado e, conseqüentemente, do nitrogênio associado. No entanto, é fundamental que o diagnóstico das ETEs em operação seja realizado previamente à realização de intervenções a fim de verificar as condições operacionais das lagoas (como profundidade e tempo de detenção hidráulica, por exemplo).

Lagoas de estabilização

No caso de sistemas de tratamento baseados em lagoas de estabilização que não compreendem a lagoa de maturação, intervenções devem ser realizadas a fim de promover a remoção satisfatória de nitrogênio amoniacal. Dentre as possibilidades existentes, pode-se citar: (i) a implantação de lagoa de maturação dotada de filtro de pedra, caso haja área disponível; (ii) a conversão de unidades existentes, a partir da incorporação de sistemas mecanizados de aeração; (iii) o aproveitamento do efluente para fins agrícolas, a depender da realidade local.

Adequações relacionadas a sistemas preponderantemente aeróbios

Uma vez que os sistemas preponderantemente aeróbios implantados nas ETEs de Minas Gerais são representados pelos lodos ativados e suas variantes, as adequações possíveis de serem adotadas são exclusivamente inerentes a aspectos operacionais. Elevadas eficiências de remoção de nitrogênio amoniacal são esperadas em sistemas de lodos ativados, com propensão para a remoção de nitrogênio total, a depender da configuração do sistema adotada. Para tanto, deve-se assegurar uma idade de lodo mínima e que os requisitos de oxigênio dissolvido sejam satisfeitos. Destaca-se a importância do adequado monitoramento dos tanques de aeração, a fim de garantir que parâmetros operacionais tais como alcalinidade não sejam fatores limitantes ao processo de nitrificação.

CONCLUSÕES

Considerando o expressivo número de ETEs cuja tipologia de tratamento é exclusivamente anaeróbia (35% das ETEs implantadas), verifica-se a necessidade de inclusão de unidades de pós-tratamento aeróbias que viabilizem a oxidação do N-amoniacal. Em contraponto, as ETEs que possuem elevada capacidade de remoção de N-amoniacal são minoria (2% das ETEs implantadas), notadamente representadas pelos sistemas com aeração mecanizada (lodos ativados e filtros biológicos aerados submersos). Não obstante, a possibilidade de remoção parcial de N-amoniacal pode ser suficiente a depender das concentrações afluentes de nitrogênio total. Neste caso, uma importante parcela das ETEs implantadas (34%), representadas pelos sistemas anaeróbio-aeróbios (p.ex.: UASB + FBPs de alta taxa), possui potencial para atender ao novo padrão de lançamento definido pela DN COPAM-CERH/MG nº08/2022. Neste caso, a confiabilidade dos processos deve ser analisada, sob pena de falha sistemática do processo de nitrificação.

Diversas intervenções e alternativas tecnológicas são passíveis de serem incorporadas a fim de garantir que a remoção de nitrogênio amoniacal esteja de acordo o padrão estabelecido na legislação ora vigente (20 mg $\text{NH}_4^+\text{-N/L}$). Todavia, a adoção de tecnologias que compreendam processos e condições suficientes para a ocorrência da nitrificação por si só não é garantia de obtenção da eficiência desejada. É imprescindível a inclusão de rotinas de monitoramento adicionais às necessárias ao atendimento de critérios de lançamento (p.ex.: monitoramento do afluente às unidades de remoção de nitrogênio, para além do monitoramento da entrada e saída da ETE), a fim de garantir que a operação das unidades onde ocorre a remoção de nitrogênio amoniacal seja realizada de forma adequada.

Por fim, cumpre destacar que as intervenções e aprimoramentos sugeridos como alternativas para o alcance da remoção de N-amoniacal para os fluxogramas de tratamento atualmente implantados em Minas Gerais não devem ser realizadas sem a realização prévia de diagnósticos técnicos, construtivos e operacionais detalhados para cada ETE. O cotejo tecnológico e econômico de alternativas deve ser realizado caso a caso, levando em conta as peculiaridades de cada localidade, notadamente considerando as diversidades regionais presentes no estado. Além de maturidade tecnológica e robustez operacional, deve-se atentar ainda para a capacidade de implantação e de operação do prestador de serviço, garantindo assim que a adequação/tecnologia escolhida seja eficiente e aderente à realidade socioeconômica do local.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Regulatório de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais – ARSAE-MG e à Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, P.G.S. DE, OLIVEIRA, S.C., CHERNICHARO, C.A. DE L., 2011. Operação de filtros biológicos percoladores pós-reactores UASB sem a etapa de decantação secundária. *Eng. Sanit. e Ambient.* 16, 271–280. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000300010>
2. BRESSANI-RIBEIRO, T., ALMEIDA, P.G.S., VOLCKE, E.I.P., CHERNICHARO, C.A.L., 2018. Trickle filters following anaerobic sewage treatment: state of the art and perspectives. *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 4, 1721–1738. <https://doi.org/10.1039/C8EW00330K>
3. COBRAPE. Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. Plano Estadual de Saneamento Básico – Produto 4. Diagnóstico Situacional Consolidado. Volumes 20 a 26. Belo Horizonte, 2021.
4. COURACCI FILHO, B. ANDRADE NETO, C. O., MELO, H.N.S., SOUSA, J.T., NOUR, E.A.A., FIGUEIREDO, R.J. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de aplicação no solo. In: Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, Capítulo 02. Carlos Augusto Lemos Chernicharo (coord.). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. PROSAB. Programa de Saneamento Básico, 2001. Disponível em <http://www.finep.gov.br/apoio-e-financiamento-externa/historico-deprograma/prosab/produtos>. Acesso em 23 de dezembro de 2022.
5. DELGADO VELA, J.; DICK, G. J.; LOVE, N. G. Sulfide inhibition of nitrite oxidation in activated sludge depends on microbial community composition. *Water Research*, v. 138, p. 241–249, 2018.
6. DU, R. et al. Advanced nitrogen removal from wastewater by combining anammox with partial denitrification. *Bioresource Technology*, v. 179, p. 497–504, 2015.
7. HEISLER, J. et al. Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus. *Harmful Algae*, v. 8, n. 1, p. 3–13, 2008.
8. RAHIMI, S.; MODIN, O.; MIJAKOVIC, I. Technologies for biological removal and recovery of nitrogen from wastewater. *Biotechnology Advances*, v. 43, n. June, p. 107570, 2020.
9. von Sperling, M. Lagoas de estabilização. 2017. 3ª ed. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, vol. 3. Editora UFMG.
10. VON SPERLING, M., ALMEIDA, P.G.S., BRESSANI-RIBEIRO, T., CHERNICHARO, C.A. DE L., 2019. Post-treatment of anaerobic effluents, in: *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation*. IWA Publishing, pp. 275–338. https://doi.org/10.2166/9781780409238_0275