



A REMOÇÃO DE NITROGÊNIO NO TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS UTILIZANDO O SISTEMA DE LODOS ATIVADOS: ESTUDO DE PERSPECTIVAS

Patrícia Beatriz Baréa⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR (PPGERHA/UFPR). Doutoranda pelo PPGERHA/UFPR.

Bárbara Zanicotti Leite⁽²⁾

Pesquisadora da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR). Engenheira de Alimentos pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Mestre em Tecnologia Química pela UFPR e Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR (PPGERHA/UFPR).

Miguel Mansur Aisse⁽¹⁾

Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) e Professor Permanente do PPGERHA/UFPR.

Endereço⁽¹⁾: PPGERHA – UFPR. Centro Politécnico – Bloco V – Primeiro andar – Jd. das Américas – Curitiba – Paraná – CEP: 81.531.990 – Tel: +55 (41) 3361-3144 – E-mail: barea.patricia@gmail.com

RESUMO

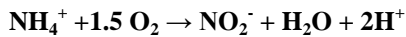
Com padrões de lançamento em corpos hídricos cada vez mais restritivos, torna-se importante a remoção de compostos nitrogenados em sistemas de tratamento de esgotos. Tradicionalmente as estações de tratamento de efluentes sanitários que buscam a remoção de nitrogênio utilizam os processos de nitrificação e desnitrificação. Apesar de ser caracterizado pela alta eficiência na remoção de carga orgânica, além da remoção de frações de nitrogênio, aspectos como o alto gasto energético, principalmente para manter a aeração do sistema, e elevada produção de lodo, que demanda estabilização para posterior destino final, fazem com que pesquisadores busquem alternativas. O presente trabalho teve como objetivo apresentar algumas possibilidades, como o processo de nitrificação e desnitrificação simultâneas (NSD), a utilização de lodo granular aeróbio (LGA), o processo *anammox* (oxidação anaeróbia da amônia) e mais recentemente o processo *comammox* (oxidação completa da amônia). Como resultado, foi observado que muitas tecnologias já tem aplicação em escala plena, porém com alguns desafios a serem superados, enquanto outras ainda precisam de mais estudos.

PALAVRAS-CHAVE: Anammox; Remoção de Nitrogênio; Tratamento biológico.

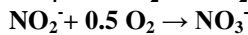
INTRODUÇÃO

O nitrogênio é um dos contaminantes presentes em esgotos sanitários. Sua presença nos corpos hídricos pode causar eutrofização, que leva ao crescimento excessivo de algas, perda da biodiversidade e a diminuição do oxigênio dissolvido, propiciando a morte de organismos aquáticos, prejudicando assim a qualidade das águas (HU *et al.*, 2013; LE MOAL *et al.*, 2019).

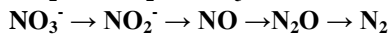
Um dos tratamentos para esgotos sanitários mais utilizados é o sistema de lodos ativados. Esse processo é caracterizado pela alta remoção de demanda química de oxigênio (DQO) e, dependendo da configuração adotada, pode remover frações do nitrogênio. Usualmente são adotados processos de nitrificação e desnitrificação, juntamente com o sistema de lodos ativados. A nitrificação (Equação 1 e 2) consiste na oxidação da amônia a nitrito pelas bactérias oxidantes de amônio (BOA), e depois a nitrato pelas bactérias oxidantes de nitrito (BON). Em condições anóxicas, o nitrato é convertido em nitrogênio gasoso pelas bactérias heterotróficas. Devido às baixas taxas de crescimento dos organismos responsáveis pela nitrificação, esse processo é o limitante para a remoção biológica de nitrogênio convencional. Alguns fatores podem restringir a reação como a concentração de amônia e óxido nítrico, além da temperatura e concentração de oxigênio dissolvido (OD) (CHANG *et al.*, 2011; HU *et al.*, 2013; ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2016; BUENO *et al.*, 2018).



equação (1)



equação (2)



equação (3)

Na desnitrificação (Equação 3) ocorre a conversão do nitrato a gás nitrogênio, que então é liberado para a atmosfera. As reações citadas precisam de condições ambientais diferentes para que ocorram. A nitrificação demanda a presença de oxigênio e longo tempo de detenção de sólidos (TDS). Já a desnitrificação ocorre em ambiente sem oxigênio disponível. Outra característica desses processos é a elevada produção de biomassa e a emissão de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2) e óxido nitroso (N_2O) (CHANG *et al.*, 2011; HE; XUE; WANG, 2011; HU *et al.*, 2013; BUENO *et al.*, 2018).

O processo de lodos ativados convencional é caracterizado pela alta remoção de matéria orgânica carbonácea e também por elevada remoção de amônia no processo de nitrificação (BUENO *et al.*, 2018). Os principais custos de operação para a utilização desse processo são a aeração na etapa de nitrificação e a adição de fonte de carbono externa ao processo para a reação de desnitrificação. Alguns parâmetros que exercem influência na remoção de nitrogênio são a concentração de oxigênio dissolvido (OD), a relação carbono/nitrogênio, temperatura e pH (ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2016).

Além da nitrificação e desnitrificação citadas anteriormente, a utilização do processo *anammox* para a remoção de nitrogênio (N) em sistemas de tratamento de efluentes está sendo adotada com mais frequência, principalmente para tratamento de águas residuárias com altas concentrações de N. No entanto, existe uma série de aspectos que devem ser melhor compreendidos para que ocorra a aplicação no tratamento de efluentes sanitários. Um esquema dos processos de conversão de nitrogênio citados pode ser observado na Figura 1.

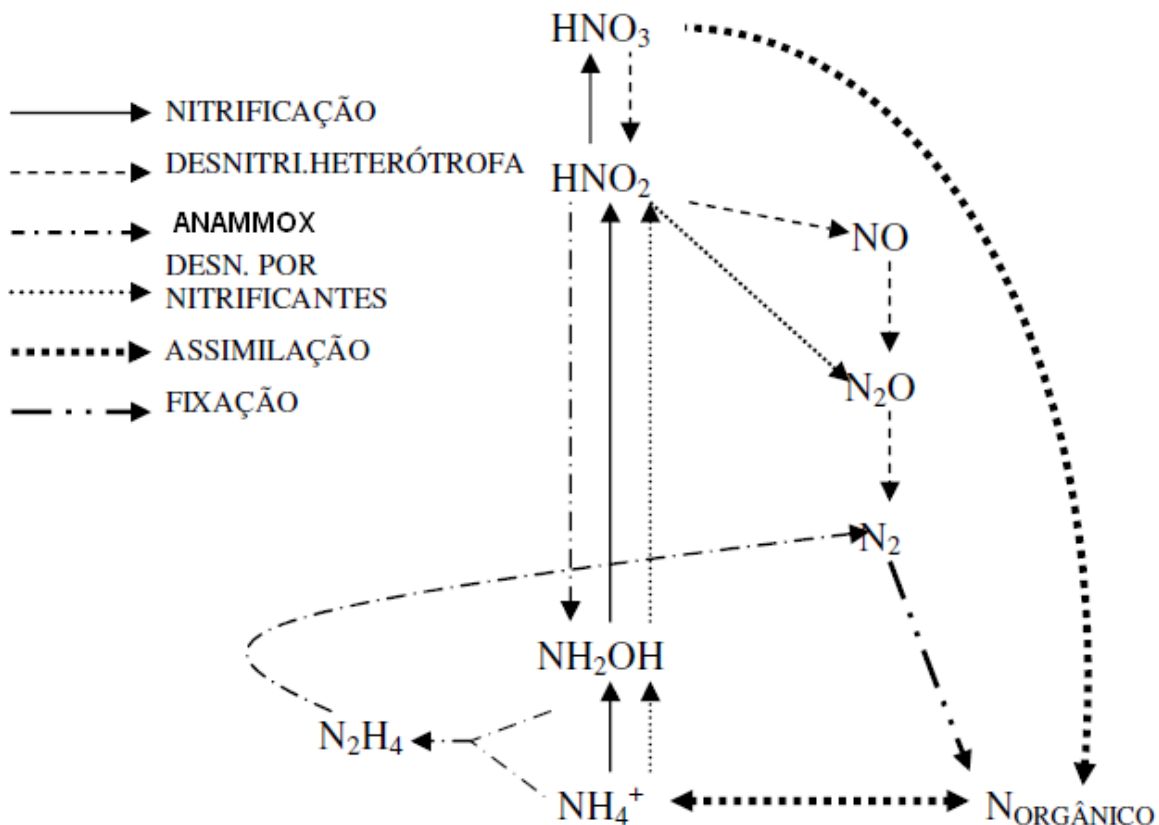


Figura 1: Ciclo do Nitrogênio Simplificado

Fonte: VICTORIA (2006) *apud* van LOOSDRECHT e JETTEN (1998)



Outra tecnologia com grande aplicação em sistemas em escala plena para tratamento de esgoto sanitário e industrial é o lodo granular aeróbio (LGA). Essa alternativa dispensa o uso de decantadores secundários, além de reduzir o consumo de energia elétrica, com obtenção de elevadas eficiências de remoção em nitrogênio total, fósforo e demanda química de oxigênio (ROLLEMBERG *et al.*,2020). Também existe a possibilidade de recuperação de recursos como energia (na forma de biogás) e fósforo, entre outros (HAMZA *et al.*,2022).

Outra descoberta recente, possibilitada pelo aperfeiçoamento das tecnologias de detecção, foi a de organismos com a capacidade de realizar a nitrificação completa, chamados de *comammox*. Assim, como os organismos *anammox*, existe a possibilidade de aplicação em sistemas de tratamento de esgotos, o que demandará mais pesquisas.

OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é apresentar perspectivas mais recentes sobre os processos de remoção de nitrogênio em sistemas de lodos ativados, como a nitrificação e desnitrificação simultânea (NDS), lodo granular aeróbio e a utilização do processo *anammox*. Também foi abordado brevemente o tópico *comammox*, que por ser uma descoberta recente, possibilitada pelo avanço tecnológico, demanda mais estudos.

MATERIAL E MÉTODOS

Esse estudo é uma pesquisa bibliográfica, e utiliza como fonte de dados publicações recentes, tanto em periódicos nacionais quanto internacionais. Foram procurados artigos com os temas nitrificação e desnitrificação simultânea, lodo granular aeróbio, *anammox* e *comammox*, priorizando aqueles com algum aspecto relacionado ao tratamento de efluentes sanitários.

NITRIFICAÇÃO E DESNITRIFICAÇÃO SIMULTÂNEAS (NDS)

Uma alternativa ao processo convencional de nitrificação e desnitrificação é a nitrificação e desnitrificação simultâneas (NDS), que consiste na ocorrência das reações de nitrificação e desnitrificação na mesma estrutura e sobre as mesmas condições de operação. Para a ocorrência são necessárias estratégias de controle das condições anóxicas e aeróbias. Apresenta como vantagens a economia na construção de mais uma câmara (anóxica) ou no mínimo a redução no tamanho do reator (MUNCH; LANT; KELLER, 1996; WEISSENBACHER *et al.*, 2007).

Bueno *et al.* (2018) realizaram estudo em escala piloto de sistema de lodos ativados operando com NDS. Os pesquisadores observaram que a limitação de OD em cerca de 0,5 mg O₂/L não prejudicou o crescimento nem de bactérias heterotróficas, bem como das bactérias autotróficas nitrificantes, obtendo valores próximos daqueles de sistemas convencionais de lodos ativados. A remoção de DQO manteve-se acima de 90% ao longo do estudo, mesmo com a diminuição da idade do lodo ao longo da pesquisa, iniciando com 37,2 dias, passando para 27,8 dias e 19 dias.

Em outro estudo realizado em escala plena, com idade do lodo de cerca de 12 dias e tempo de detenção hidráulico (TDH) médio de 16,6 horas e concentrações de OD em torno de 0,5 mgO₂/L, obteve-se boa remoção de nitrogênio do esgoto representado pela concentração média da amostragem composta menor que 10 mg N-NO₃/L, padrão para águas classe 2 pela Resolução CONAMA 357/2005. Outro resultado foi a melhora na remoção da matéria orgânica, passando de média de remoção de DQO e demanda biológica de oxigênio (DBO) de 61% e 75%, respectivamente, para valores médios de 84% para DBO e 88% para DQO, apenas com maior controle operacional e melhora na retirada de sólidos no tanque de aeração. A melhora na eficiência de remoção para DQO e DBO foi significativa, porém com qualidade inferior se comparado a sistemas de lodos ativados com aeração prolongada, devido à manutenção do padrão de formação dos flocos, com fração solúvel elevada e perda excessiva de sólidos em suspensão no efluente. Também foi obtida economia de 34% com o gasto de energia elétrica para aeração, apenas regulando esse sistema para as características propostas (BUENO *et al.*,2020).



LODO GRANULAR AERÓBIO

Uma outra alternativa ao tratamento de lodos ativados convencional é a utilização do lodo granular aeróbio (LGA). Essa tecnologia é caracterizada por grânulos com estrutura microbiana compacta e apresenta altas velocidades de decantação. Com isso é possível obter altas concentrações de biomassa, além da sua retenção nos reatores, o que possibilita a ocorrência simultânea de nitrificação, desnitrificação e remoção de fosfato em uma única estrutura (NANCHARAI AH; SARVAJITH, 2019).

Alguns benefícios apontados na escolha desse processo são a diminuição de necessidade de área para instalação do sistema (diminuição de 25 a 75%) e redução das necessidades energéticas (em 20 a 50%) (PRONK *et al.*, 2017; NANCHARAI AH; SARVAJITH, 2019).

Alguns dos problemas relatados em sistemas que adotaram o LGA são a instabilidade da biomassa, longo tempo para a formação dos grânulos, formação de grânulos com tamanho menor do que o esperado, acúmulo de nitrito (ROLLEMBERG *et al.*, 2020).

PROCESSO ANAMMOX

Uma alternativa muito estudada aos processos convencionais de remoção de nitrogênio é a utilização de organismos *anammox*. Com a utilização deles é possível converter a amônia em nitrogênio gasoso em condição anóxica, utilizando nitrito como aceptor de elétrons (STROUS *et al.*, 1997). A escolha por esse processo é considerada eficaz em termos de custos, eficiente e demanda menos energia que o processo convencional de remoção de N (ALI; OKABE, 2015).

Existem duas formas de obtenção de nitrito: a partir do processo de nitrificação (oxidação da amônia a nitrito) ou pela desnitrificação parcial (redução do nitrato a nitrito) (MA *et al.*, 2017). A primeira é pela nitrificação parcial em conjunto com anammox (NP-AMX) e a segunda desnitrificação parcial e anammox (DP-AMX). Pesquisadores estão estudando a aplicação das duas formas de obtenção do nitrito para a utilização dos organismos anammox em sistemas de tratamento de esgotos sanitários.

- **PROCESSO NITRIFICAÇÃO PARCIAL-ANAMMOX (NP-AMX)**

A nitrificação parcial ocorre em condições aeróbias, na qual se realiza a oxidação de metade da amônia afluente. A seguir, em condições anaeróbias, as bactérias anammox utilizam a outra metade da amônia e o nitrito para conversão em gás nitrogênio (GONZALEZ-MARTINEZ *et al.*, 2018). O processo NP-AMX não necessita de uma fonte de carbono orgânico, diminui em mais de 50% a energia requerida para a aeração e reduz em cerca de 90% a produção de lodo, quando comparado ao processo convencional de nitrificação e desnitrificação (MULDER, 2003; SIEGRIST *et al.*, 2008). As equações 4 a 6 apresentam os compostos envolvidos nas reações.

Nitrificação Parcial (NP): $1,32 \text{ NH}_4^+ + 1,98 \text{ O}_2 \rightarrow 1,32 \text{ NO}_2^- + 1,4 \text{ H}_2\text{O} + 2,64 \text{ H}^+$ equação (4)

Anammox (A): $1 \text{ NH}_4^+ + 1,32 \text{ NO}_2^- + 0,13 \text{ H}^+ \rightarrow 1,02 \text{ N}_2 + 0,26 \text{ NO}_3^- + 2,03 \text{ H}_2\text{O}$ equação (5)

Geral (NP/A): $1 \text{ NH}_4^+ + 0,85 \text{ O}_2 \rightarrow 0,45 \text{ N}_2 + 0,11 \text{ NO}_3^- + 1,08 \text{ H}^+ + 1,44 \text{ H}_2\text{O}$ equação (6)

A aplicação desse processo para tratamento do efluente líquido clarificado de digestores com alta concentração de nitrogênio já está consolidado e ocorre em linhas secundárias de tratamento de efluentes não domésticos, por isso são denominados *side-stream anammox process* (SIEGRIST *et al.*, 2008; MCCARTY, 2018). No entanto, a utilização na linha principal de tratamento ainda apresenta alguns desafios a serem superados, como a dificuldade para separar as bactérias oxidantes de nitrito (BON), as altas relações carbono orgânico nitrogênio (C/N), retenção das bactérias anammox no sistema, a influência de compostos com alta concentração de amônia e nitrito (TRINH *et al.*, 2021), as variações de qualidade e quantidade dos esgotos sanitários (WANG *et al.*, 2019), baixa qualidade no efluente final (ALI; OKABE, 2015) e a maior facilidade de oxidar a NO_3^- do que a NO_2^- os esgotos que passaram por tratamento aeróbio, o que dificulta o acúmulo do segundo composto, necessário para os organismos anammox (CAO *et al.*, 2016).

A dificuldade na realização da nitrificação parcial é a supressão dos organismos BON. Vários estudos indicam alguns parâmetros que devem ser controlados, tais como a baixa concentração de oxigênio dissolvido combinada com a alta concentração de amônia livre e a aeração intermitente (LOTTI *et al.*, 2014; PATHAK; WANG; JANKA, 2022). Uma técnica aplicada com sucesso para o controle desses organismos foi o acúmulo de ácido nitroso livre. Com essa estratégia, os pesquisadores conseguiram manter o processo de nitrificação em reator RBS (reator de bateladas sequenciais) tratando esgoto sanitário após passar por decantador primário na temperatura de 15°C. A pesquisa relatou eficiência média de remoção de matéria orgânica de 80% (PEDROUSO, *et al.*, 2021).

Para temperaturas maiores ou iguais a 25°C, a qualidade do efluente não atinge os requisitos de padrões de descarga mais exigentes, porém o desempenho de remoção de nitrogênio é similar ao processo tradicional. No entanto, quando as temperaturas são inferiores a 20°C, tanto a eficiência de remoção de nitrogênio como a qualidade do efluente são baixas. Esses resultados são atribuídos a dificuldade na supressão da atividade dos organismos BON e a manutenção de atividade anammox suficiente (QIU *et al.*, 2020).

Chen *et al.* (2021, b) avaliaram a viabilidade e o desempenho da utilização da regulação da aeração, por meio do uso de um compressor para promover a contínua aeração e mistura pelo processo de *air lift*. O estudo mostrou que com a adoção dessa estratégia promoveu a granulação no sistema, melhorou o controle do OD, além de melhorar a atividade de organismos anammox e suprimir a atividade de BON. Os pesquisadores enfatizam que a otimização do controle de OD é um fator relevante para a recuperação do desempenho do processo.

Driessen e Hendrickss (2021) apresentaram trabalho relatando a experiência de 20 anos na utilização da NP-AMX em efluentes industriais. Como resultados, foi obtido até 90% de remoção de nitrogênio amoniacal, para cargas baixas e altas (chegando a 2,5 kgNH₄-N/m³.d) e índice volumétrico de lodo (IVL) entre 20 a 25 mL/g, sem mencionar a relação A/M (alimento microrganismo). Outro aspecto foi a temperatura de operação dos sistemas, entre 30° a 39°C. Os pesquisadores ressaltam que para temperaturas menores deve ser ou aumentada a concentração de biomassa no reator, pelo aumento da quantidade de grânulos anammox, ou aumentar o volume do reator. Os casos abordados trataram esgotos com concentração de nitrogênio amoniacal (N-NH₄) a partir de 300 mg/L, muito acima da usualmente encontrada em esgotos sanitários.

Outra técnica utilizada para evitar a ocorrência da desnitrificação em sistemas que visam à utilização do processo de NP-AMX foi a adição intermitente de acetato e propionato. Dessa maneira ocorreu a anulação da reprodução dos organismos desnitrificantes e os organismos anammox continuaram seu ciclo de vida normalmente (Zhang *et al.*, 2021).

Por fim, o estudo de Wan *et al.* (2021) avaliou algumas estratégias de controle com relação à eficiência de remoção de N e emissões de óxido nitroso (N₂O), gás com elevado potencial de efeito estufa, em reator operando com NP-AMX. As estratégias avaliadas foram: manejo do oxigênio dissolvido (OD), vazão de ar constante e controle da amônia efluente. Os pesquisadores observaram que o controle da amônia efluente foi o aspecto com os melhores resultados, atingindo maiores médias de remoção de N, a supressão dos organismos BON e as menores emissões de N₂O. Também foi observado que nessas condições, o consumo de energia para aeração foi menor mesmo em condições de variação da concentração dos flocos no reator.

- **PROCESSO DESNITRIFICAÇÃO PARCIAL-ANAMMOX (DP-AMX)**

O processo DP-AMX combina a desnitrificação parcial com a oxidação anaeróbia da amônia (*anammox*). Nesse processo o nitrato é reduzido a nitrito por organismos desnitrificantes, a seguir ocorre a redução do nitrito a N₂ pelos organismos *anammox* que utilizam a amônia como doador de elétrons. Como também pode ocorrer o processo de denitrificação (transformação de NO₂⁻ em N₂), essa reação deve ser controlada para a ocorrência de DP-AMX. Quando comparado com o processo convencional de nitrificação e desnitrificação, o DP-AMX reduz a demanda por oxigênio em 45%. Também ocorre redução na matéria orgânica necessária para a ocorrência desse processo biológico, que chega a 79%. Outro benefício é a redução na produção de lodo, o que acarreta em economia nos custos com a disposição do lodo. Uma das dificuldades enfrentadas por muitos pesquisadores ao utilizar os organismos *anammox* é a competição com os organismos BON, porque tem seu crescimento favorecido em baixas temperaturas (MA *et al.*, 2016; CAO *et al.*, 2016; MA *et al.*, 2020).



Chen *et al.* (2021, a) ressaltam que a adoção desse processo possibilita alta taxa de remoção de N e o acúmulo de NO_2^- de maneira eficiente. Além dessas características, o processo pode acontecer em baixas cargas de DQO, diminuir os gastos energéticos com aeração e produzir baixa quantidade de lodo. As equações 7 e 8 apresentam os compostos envolvidos nas reações.

Desnitrificação Parcial: $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$ equação (7)

Anammox: $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}_3^-$ equação (8)

A utilização desse processo em um reator de bateladas sequenciais com biofilme atingiu eficiências de remoção de DQO e nitrogênio amoniacal de 78,7% e 93,4%, respectivamente. A utilização do processo DP-AMX levou ao aumento na eficiência de remoção de N, passando de 50,8% para 72,3%. A utilização desse processo melhorou a eficiência de remoção de N do sistema, bem como não necessitou de fonte de carbono e economizou energia de aeração, além de reduzir a produção de lodo (ZHAO *et al.*, 2022).

No estudo de Cao *et al.* (2016) foi possível a coexistência dos organismos desnitrificantes e bactérias *anammox* ao mesmo tempo que foi alcançada alta remoção de nitrogênio, com a redução da fonte de carbono, o que restringiu a reação de desnitrificação completa. O estudo aconteceu em RBS utilizando como inóculo lodo de desnitrificação parcial e acetato de sódio como doador de elétrons. Como resultados, o reator operou de maneira estável por 114 dias, e para razão DQO/ NO_3^- de 3 e concentrações iniciais de NH_4^+ de 25 mg/L e NO_3^- de 30 mg/L, a concentração média de N no efluente foi de 5 mg/L e a eficiência de remoção de N chegou até 97%.

Du *et al.* (2019) utilizaram o processo DP-AMX para tratar uma combinação de esgoto com alta concentração de nitrato (1000 mg/L) e esgoto sanitário (com concentrações: DQO 182,5 mg/L e amônia 58,3 mg/L) em escala de bancada. O sistema é formado por dois reatores, um RBS para a desnitrificação parcial seguido pelo reator *UASB* (*upflow anaerobic sludge blanket*) para o processo *anammox*. A eficiência de remoção de nitrato atingiu 95,8% e a de remoção de amônia 92,8%.

Como pode ser visto nos parágrafos anteriores, as pesquisas relacionadas a esse processo estão em fases iniciais, com muitos experimentos em escala de bancada, sem ainda ter ocorrido o relato da aplicação em sistemas em grande escala e de lodos ativados. Porém, devido às vantagens apresentadas quando o sistema é comparado ao processo convencional de nitrificação e desnitrificação, como a menor necessidade de fontes de carbono, baixa produção de lodo e diminuição da energia necessária para a aeração, pesquisas utilizando DP-AMX mostram-se promissoras.

COMAMMOX

Por muito tempo acreditou-se que o processo de nitrificação ocorria em duas etapas, com organismos que oxidavam ou a amônia ou o nitrito. Porém, mais recentemente, foram descobertos organismos capazes de realizar a nitrificação completa, pertencentes ao gênero *Nitrospira*, chamados de *comammox* (DAIMS *et al.*, 2015; LAWSON; LÜCKER, 2018). Um estudo realizado em ETE na Áustria constatou que entre 43 a 71% da população de *Nitrospira* era formada por organismos *comammox* (DAIMS *et al.*, 2015).

Como em toda descoberta recente, muitos aspectos precisam de mais esclarecimentos. Por exemplo, alguns estudos identificaram sinais de cooperação entre organismos *comammox* e bactérias *anammox*, no tratamento de efluentes com diferentes concentrações de amônia. Também se presume que a utilização de *comammox* poderia diminuir os custos com aeração em sistemas de tratamento de esgotos, quando comparados a processos tradicionais de nitrificação. Mas ainda não há conhecimento suficiente para aplicação em sistemas de tratamento (ZHU *et al.*, 2022).

Outra questão relevante é a produção de óxido nitroso (N_2O), um gás causador de efeito estufa. Não há relatos sobre a produção desse gás pelos organismos *comammox*, apesar de já se ter conhecimento de que eles possuem enzimas e genes funcionais relacionados à produção do N_2O (ZHU *et al.*, 2022).



CONCLUSÕES

Como pode ser observado no decorrer desse trabalho, várias perspectivas são apresentadas em relação à remoção de nitrogênio em sistemas de lodos ativados, como a nitrificação e desnitrificação simultâneas (NDS), o lodo granular aeróbio, a utilização de processos com organismos *anammox* (nitrificação parcial e desnitrificação parcial) e mais recentemente a descoberta dos organismos *comammox*.

O processo de nitrificação e desnitrificação simultânea e a tecnologia de lodo granular aeróbio já são utilizadas em sistemas de tratamento de efluentes sanitários em escala plena. Os dois possibilitam a obtenção de eficiências elevadas na remoção de matéria orgânica e economia de energia. O primeiro processo requer controle acurado para a manutenção das condições anóxicas e aeróbias. Já o segundo, pode ser prejudicado pelo longo período para formação dos grânulos.

A utilização do processo *anammox* para o tratamento de efluentes industriais já está consolidada, enquanto que em sistemas para tratamento de efluentes sanitários, ainda permanecem inúmeras questões a serem resolvidas. Por fim, os organismos *comammox* foram identificados recentemente, demandando mais estudos para sua possível utilização em sistemas de tratamento de efluentes.

Esta revisão abordou brevemente algumas alternativas para a remoção de nitrogênio no tratamento de efluentes sanitários. Apesar de ser amplamente utilizado, o sistema de lodos ativados convencional apresenta inúmeras desvantagens, que levam a busca de outras soluções, principalmente com relação à economia de energia elétrica. Por isso, justifica-se o grande número de pesquisas abordando os mais diferentes aspectos, na busca de um sistema de tratamento mais sustentável quando comparado com sistemas convencionais que englobam nitrificação e desnitrificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALI, M.; OKABE, S. *Anammox-based technologies for nitrogen removal: Advances in process start-up and remaining issues*. *Chemosphere*. p. 144-153, 2015.
2. BUENO, R.F.; CAMPOS, F.; ALÉM SOBRINHO, P.; PIVELLI, R.P. Remoção biológica de nitrogênio por meio de processo de nitrificação e desnitrificação simultâneas (NDS) em lodo ativado e fluxo contínuo. *Revista DAE*, v.68, p. 65-87, 2020.
3. BUENO, R. F.; PIVELI, R. P.; CAMPOS, F. ALÉM SOBRINHO, P. *Simultaneous nitrification and denitrification in the activated sludge systems of continuous flow*. *Environmental Technology*, v.39, p. 2641-2652, 2018.
4. CAO, S.; PENG, Y.; DU, R.; WANG, S. *Feasibility of enhancing the DENitrifying AMmonium OXidation (DEAMOX) process for nitrogen removal by seeding partial denitrification sludge*. *Chemosphere*, v.148, p. 403-407, 2016.
5. CHANG, CH.; TANONG, K.; XU, J.; SHON, H. *Microbial community analysis of an aerobic nitrifying-denitrifying MBR treating ABS resin wastewater*. *Bioresource Technology*, v.102, p. 5337-5344, 2011.
6. CHEN, H.; TU, Z.; WU, S.; YU, G.; DU, C.; WANG, H.; TANG, E.; ZHOU, L.; DENG, B.; WANG, D.; LI, H. *Recent advances in partial denitrification-anaerobic ammonium oxidation process for mainstream municipal wastewater treatment*. *Chemosphere*, v.278, p. 1-16, 2021, a.
7. CHEN, H.; WANG, H.; CHEN, R.; CHANG, S.; YAO, Y.; JIANG, C.; WU, S.; WEI, Y.; YU, G.; YANG, M.; LI, Y.Y. *Unveiling performance stability and its recovery mechanisms of one-stage partial nitrification- anammox process with airlift enhanced micro-granules*. *Bioresource Technology*, v. 330, p. 1-9, 2021, b.
8. DAIMS, H.; LEBEDEVA, E.V.; PJEVAC, P.; HAN, P. HERBOLD, C.; ALBERTSEN, M.; JEHLICH, N.; PALATINSZKY, M.; VIERHEILIG, J.; BULAEV, A.; KIRKEGAARD, R.H.; VON BERGEN, M.;



- RATTEI, N.; BENDINGER, B.; NIELSEN, P.H.; WAGNER, M. *Complete nitrification by Nitrospira bacteria. Nature*, v. 528, p. 504 – 509, 2015.
9. DRIESSEN, W.; HENDRICKX. *Two decades of experience with the granular sludge-based anammox process treating municipal and industrial effluents. Processes*, p. 1-15, 2021.
 10. DU, R.; CAO, S.; PENG, Y.; ZHANG, H.; WANG, S. *Combined partial denitrification (PD) – anammox: a method for high nitrate wastewater treatment. Environmental International*, v. 126, p. 707-716, 2019.
 11. GONZALEZ-MARTINEZ, A.; MUÑOZ-PALAZON, B.; RODRIGUEZ-SANCHEZ, A.; GONZALEZ-LOPEZ, J. *New concepts in anammox process for wastewater nitrogen removal: recent advances and future prospects. FEMS Microbiology Letters*, v. 365, p. 1-10, 2018.
 12. HAMZA, R.; RABII, A.; EZZAHRAOUI, F.; MORGAN, G.; IORHEMEN, O.T. *A review of the state of development of aerobic granular sludge technology over the last 20 years: Full-scale applications and resource recovery. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, v. 5, p. 1-12, 2022.
 13. HE, SB.; XUE, G.; WANG, B.Z. *Factors affecting simultaneous nitrification and de-nitrification (SND) and its kinetics model in membrane bioreactor. Journal of Hazardous Materials*, v.168, p. 704-710, 2009.
 14. HU, Z.; LOTTI, T.; de KREUK, M.; KLEEREBEZEM, R.; van LOOSDRECHT, M.; KRUIT, J.; JETTEN, M.S.M.; KARTAL, B. *Nitrogen removal by a nitrification-anammox bioreactor at low temperature. Applied and Environmental Microbiology*, v.79, p. 2807-2812, 2013.
 15. LAWSON, C.E.; LÜCKER, S. *Complete ammonia oxidation: an important control on nitrification in engineered ecosystems? Current Opinion in Biotechnology*, v.50, p. 158-165, 2018.
 16. LE MOAL, M.; GASCUEL-ODOUX, C.; MÉNESGUEN, A.; SOUCHON, Y.; ÉTRILLARD, C.; LEVAIN, A.; MOATAR, F.; PANNARD, A.; SOUCHU, P.; LEFEBVRE, A.; PINAY, G. *Eutrophication: a new wine in an old bottle? Science of the Total Environment*, v.651, p. 1-11, 2019.
 17. LOTTI, T.; KLEEREBEZEM, R.; HU, Z.; KARTAL, B.; JETTEN, M.S.M.; VAN LOOSDRECHT, M.C.M. *Simultaneous partial nitrification and anammox at low temperature with granular sludge. Water Research*, v. 66, p. 111-121, 2014.
 18. MA, B.; WANG, S.; CAO, S.; MIAO, Y.; JIA, F.; DU, R.; PENG, Y. *Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances. Bioresource Technology*, v. 200, p. 981-990, 2016.
 19. MA, B.; QIAN, W.; YUAN, Z.; PENG, Y. *Achieving mainstream nitrogen removal through coupling anammox with denitrification. Environmental Science & Technology*, v.51, p. 8405-8413, 2017.
 20. MA, B.; XU, X.; WEI, Y.; GE, C.; PENG, Y. *Recent advances in controlling denitrification for achieving denitrification/anammox in mainstream wastewater treatment plants. Bioresource Technology*, v.299, p. 1-7, 2020.
 21. MCCARTY, P. L. *What is the Best Biological Process for Nitrogen Removal: When and Why? Environmental Science Technology*, v.52, p. 3835 – 3841, 2018.
 22. MULDER, A. *The quest for sustainable nitrogen removal technologies. Water Science and Technology*, v. 48, p.67-75, 2003.
 23. MUNCH, E.V.; LANT, P.; KELLER, J. *Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors. Water Resources*, v.30, p. 277-284, 1996.



24. NANCHARAI AH, Y.V.; SARVAJITH, M. *Aerobic granular sludge process: a fast growing biological treatment for sustainable wastewater treatment. Current Opinion in Environmental Science & Health*, v.12, p. 57-65, 2019.
25. PATHAK, S.; WANG, S.; JANKA, E. *Achieving partial nitrification in anammox start-up environment. Water*, p.1-12, 2022.
26. PEDROUSO, A.; CORREA-GALEOTE, D.; MAZA-MÁRQUES, P. JUÁREZ-JIMENEZ, B.; GONZÁLEZ-LÓPEZ, J.; RODELAS, B.; CAMPOS, J.L.; MOSQUERA-CORRAL, B.; del RIO, A.V. *Understanding the microbial trends in a nitrification reactor fed with primary settled municipal wastewater. Separation and Purification Technology*, v. 256, p.1-13, 2021.
27. PRONK, M.; GIESEN, A.; THOMPSON, A.; ROBERTSON, S.; VAN LOOSDRECHT, M. *Aerobic granular biomass technology: advancements in design, applications and further developments. Water Practice & Technology*, v. 12, p. 987-996, 2017.
28. QIU, S.; LI, Z.; HU, Y.; SHI, L.; LIU, R.; SHI, L.; CHEN, L.; ZHAN, X. *What's the best way to achieve successful mainstream partial nitrification- anammox application? Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, p. 1-33, 2020.
29. ROLLEMBERG, S.L.S.; OLIVEIRA, L.Q.; FIRMINO, P.I.M.; SANTOS, A.B. *Tecnologia de lodo granular aeróbio no tratamento de esgoto doméstico: oportunidades e desafios. Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, p. 439-449, 2020.
30. SIEGRIST, H.; SALZGEBER, D.; EUGSTER, J.; JOSS, A. *Anammox brings WWTP closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal. Water Science & Technology*, p. 383-388, 2008.
31. STROUS, M.; VAN GERVEN, E.; ZHENG, P.; KUENEN, J.G.; JETTEN, M.S.M. *Ammonium removal from concentrated streams with the anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) process in different reactor configurations. Water Resource*, v. 31, n. 8, p. 1955-1962, 1997.
32. TRINH, H.P.; LEE, H-S.; JEONG, G.; YOON, H.; PARK, H-D. *Recent developments of the mainstream anammox processes: Challenges and opportunities. Journal of Environmental Chemical Engineering*, p. 1-13, 2021.
33. VICTORIA, J.A.R. *Filtro biológico aeróbio-anóxico para remoção de nitrogênio de efluentes de reatores UASB. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.*
34. WAN, X.; BAETEN, J.E.; LAURENI, M.; VOLCKE, E.I.P. *Ammonium-based aeration control improves nitrogen removal efficiency and reduces N₂O emissions for partial nitrification-anammox reactors. Chemosphere*, v.274, p. 1-9, 2021.
35. WANG, S.; ZHU, G.; LI, Y.; WANG, X.; ZHOU, J. PENG, Y. *Robustness of anammox granular sludge treating low-strength sewage under various shock loadings: microbial mechanism and little N₂O emission. Journal of Environmental Sciences*, p. 141-153, 2019.
36. WEISSENBACHER, N.; LODERER, C.; LENZ, K.; MAHNIK, S.N.; WETT, B.; FUERHACKER, M. *NO_x monitoring of a simultaneous nitrifying- denitrifying (SND) activated sludge plant at a different oxidation reduction potentials. Water Research*, v. 41, p. 397-405, 2007.
37. ZHANG, T.; YIN, Q.; SHI, Y.; WU, G. *Microbial physiology and interactions in anammox systems with the intermittent addition of organic carbons. Bioresource Technology*, v.319, p. 1-10,2021.



38. ZHAO, W.; WANG, M.; BAI, M. TIAN, Z.; WANG, S.; WANG, Z. *Nitrogen removal improvement by denitrifying ammonium oxidation in anoxic/oxic-sequence batch biofilm reactor system. Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, p. 1-8, 2022.
39. ZHU, G.; WANG, X.; WANG, S.; YU, L.; ARMANBEK, G.; YU, J.; JIANG, L.; YUAN, D.; GUO, Z.; ZHANG, H.; ZHENG, L.; SCHWARK, L.; JETTEN, M.S.M.; YADAV, A.K.; ZHU, Y.G. *Towards a more labor-saving way in microbial ammonium oxidation: A review on complete ammonia oxidation (comammox). Science of the Total Environment*, v. 829, p. 1 -11, 2022.
40. ZOPPAS, F.M.; BERNARDES, A. M.; MENEGUZZI, A. Parâmetros operacionais na remoção biológica de nitrogênio de águas por nitrificação e desnitrificação simultânea. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, p. 29-42, 2016.