

II-1287 – ANÁLISE DA REMOÇÃO DE NITROGÊNIO EM UMA ETE DE LODO ATIVADO AUTOMATIZADA PARA OPERAR SOB BAIXA CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO

Guilherme Santos Sousa⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental e Urbano pela Universidade Federal do ABC.

Mestrando em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal do ABC.

Rodrigo de Freitas Bueno⁽²⁾

Doutor em Engenharia Civil – Área – Engenharia Hidráulica e Ambiental pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Professor Adjunto ao Centro de Engenharia Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas da Universidade Federal do ABC.

E-mail: rodrigo.bueno@ufabc.edu.br

Matheus Ribeiro Augusto⁽³⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas.

Mestrado em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá.

Doutorado em Ciências, na área de Engenharia Hidráulica e Ambiental pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

E-mail: matheus.augusto047@gmail.com

Endereço⁽¹⁾: Av. João Firmino, 1520 – Bairro Assunção – São Bernardo do Campo - SP - CEP: 09812-450 - Brasil -
Tel: (11) 95153-4732 - e-mail: sousa.guilherme@aluno.ufabc.edu.br

RESUMO

Os efluentes sanitários têm sido crescentemente notados como uma fonte valiosa de recursos a serem recuperados mediante tratamento, de tal forma que as Estações de Tratamento de Esgoto passam a ser concebidas como Instalações de Recuperação de Recursos Hídricos. A remoção de nitrogênio é fundamental não apenas para o controle da poluição hídrica, como também para possibilitar a recuperação de nutrientes. Sendo assim, o desenvolvimento de processos para remoção de nitrogênio é fundamental para atender os princípios de economia circular, e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. A remoção de nitrogênio por nitrificação e desnitrificação simultâneas em um único reator em sistemas de lodo ativado de fluxo contínuo é viabilizada em ambientes com teor reduzido de oxigênio dissolvido, e permite reduções de custo operacional devido ao menor consumo energético. Este trabalho tem por objetivo a produção de elementos para a avaliação da viabilidade de se agregar novas tecnologias a uma estação de tratamento de esgoto sanitário pelo processo de lodo ativado, sendo desenvolvido em escala real na ETE Itatinga, localizada no Município de São Sebastião do Estado de São Paulo. Serão avaliadas a idade do lodo e as condições de alternância de aeração necessárias para a remoção de nitrogênio, identificando as principais condições operacionais de possibilidade de nitrificação e desnitrificação simultâneas em um único sistema biológico. Esta pesquisa é também parte constituinte de um projeto fomentado pelo acordo de cooperação SABESP – FAPESP, pela modalidade de Programa de Apoio à Pesquisa em Parceria para Inovação Tecnológica (PITE), e que visa contribuir para não só avançar nos conhecimentos teóricos e dos aspectos operacionais que permitem a remoção de nitrogênio, de forma a possibilitar a adequação de Estações de Tratamento de Esgoto, reduzindo o consumo de recursos e viabilizando sua adaptação e concepção enquanto Instalações de Recuperação de Recursos Hídricos.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo ativado, Remoção biológica, Nitrificação, Desnitrificação, Aeração Intermitente.

INTRODUÇÃO

O volume excessivo e a composição de efluentes sanitários e industriais constituem um expressivo problema de saúde pública e ambiental, exigindo um gerenciamento eficiente de sua coleta, tratamento e descarte, que objetive minimizar os impactos ambientais (VILLARÍN e MEREL, 2020). O manejo dos recursos hídricos é um tópico vital em todo o mundo, estando vinculado ao Objetivo do Desenvolvimento Sustentável de número 6, que aspira garantir a disponibilidade de água potável para todos. O Brasil permanece aquém da infraestrutura necessária. Em todo o país apenas 55% da população total é atendida pela rede de esgotamento, e só 50% do total de esgoto gerado é tratado (SNIS, 2021). Uma das consequências desse déficit é o lançamento excessivo de nutrientes nos corpos d'água, mudando suas características no que é conhecido por eutrofização antrópica. Aliado ao uso de fertilizantes e outras atividades industriais as emissões têm resultado na fixação de 150 toneladas de nitrogênio por ano nos oceanos, muito acima do limite de suporte planetário de 62 toneladas por ano indicado por Steffen *et. al.* (2015).

Os nutrientes presentes nos efluentes, como amônia, quando liberados em águas superficiais ou subsuperficiais intensificam o processo de eutrofização, com a potencial floração de algas e cianobactérias que liberam substâncias tóxicas. O nutriente com maior impacto para desencadear a eutrofização é o fósforo, e a melhor forma de impedir e até reverter esse processo é restringir o seu lançamento, bem como do nitrogênio (SMITH e SCHINDLER, 2009; VILLARÍN e MEREL, 2020). Contudo, de 3.667 ETEs, localizadas em 2.007 municípios, apenas 25 são planejadas para remoção de nutrientes, valor que sobe para 69 se wetlands construídas forem consideradas. Dentre as ETEs de lodo ativado, que são as mais apropriadas para atender grandes populações em áreas adensadas, ou seja, as mais adequadas para áreas urbanas, menos de 20% das unidades incorporam etapas de remoção de nitrogênio e fósforo (ANA, 2020).

Os métodos de tratamento por reatores anaeróbios, que compõem a maior parte das ETEs no Brasil (ANA, 2020), não removem nutrientes (HASAN *et. al.*, 2021). Comparado aos métodos físico-químicos a remoção biológica de nutrientes é a mais difundida por apresentar custos reduzidos e não gerar subprodutos poluentes (VILLARÍN e MEREL, 2020; ZHANG *et. al.*, 2017). O tratamento biológico é considerado um dos métodos mais baratos de remoção de poluentes. Organismos como fungos, algas e bactérias já estão presentes nos efluentes, e utilizam os poluentes como fonte de nutrientes para seu crescimento (AI-GHOUTI *et. al.*, 2019). Assim sendo, o metabolismo microbiano é capaz de simultaneamente decompor e absorver os resíduos do efluente, permitindo atender tanto o objetivo de controle da poluição, quanto de reuso de recursos (JIN *et. al.*, 2023). Por outro lado, os tratamentos biológicos convencionais fornecem pouca eficiência na remoção de nutrientes (HASAN *et. al.*, 2021). Sendo assim, o desenvolvimento de tecnologias que removam os nutrientes dos efluentes de forma eficiente e barata é fundamental ao controle da poluição hídrica, e uma área com grande foco de pesquisa científica. Urge a necessidade de tecnologias eficientes, que ao mesmo tempo tenham baixo custo energético, baixo impacto ecológico, e, portanto, alto custo-benefício para a remoção de nutrientes.

É comum a adaptação e adequação de ETEs existentes e de operação tradicional para este novo cenário de necessidades tecnológicas (ARABI e LYNNE, 2018). No entanto, não há uma adequação sistemática em todas as ETEs, por razões diversas: necessidade de viabilidade do investimento; necessidade de incorporação de inovação; e em alguns casos, tecnologias não disponíveis no mercado nacional (MIKI, 2019). Os processos biológicos em si, ou em combinação com processos químicos, ainda são preferidos a tratamentos puramente físico-químicos devido a seu custo reduzido em relação à performance de tratamento (HASAN *et. al.*, 2021). Contudo, são necessários processos biológicos aprimorados para atender os requisitos de remoção de nutrientes como o nitrogênio (SUN *et. al.*, 2017). Uma das tecnologias predominantes para remoção de nitrogênio em sistemas de lodo ativado é a pré-desnitrificação por um estágio anóxico a montante do tanque de aeração. Contudo, esse é um método muito vulnerável às variações do efluente que chega a uma estação de tratamento de esgoto (CAPODAGLIO *et. al.*, 2016).

A remoção biológica convencional do nitrogênio é derivada do ciclo biogeoquímico padrão do nitrogênio, constituído por uma primeira fase de oxidação da amônia a nitrito, e do nitrito a nitrato, ou seja, pela nitrificação em condições aeróbicas, realizada por organismos quimiolitotróficos. Segue-se a essa etapa a desnitrificação produzindo óxido nitroso e gás nitrogênio por organismos heterotróficos em condições anóxicas. Tipicamente, uma quantidade relevante de carbono orgânico é necessária para uma desnitrificação eficiente (SUN *et. al.*, 2017; HASAN *et. al.*, 2021). O tratamento avançado para remoção de nitrogênio pode ser via nitratação parcial, nitrificação e desnitrificação simultâneas, ou pela oxidação anaeróbica de amônia (ANAMMOX) diretamente em gás nitrogênio consumindo nitrito como aceptor de elétrons. Também é possível combinar esses diferentes processos (HASAN *et. al.*, 2021). A nitratação parcial combinada ao processo ANAMMOX consegue uma remoção eficiente de amônia, mas requer fontes externas de carbono (FAN *et. al.*, 2023).

Entre vários processos de remoção biológica avançada de nitrogênio, a aeração intermitente se mostra eficiente e aplicável com baixos níveis de carbono orgânico (SUN *et. al.*, 2017). Trata-se de um sistema em que a nitrificação e desnitrificação ocorrem em um único reator, implementada através da alternância entre períodos com e sem aeração. Também pode ser equivalente a uma operação com controle do teor de oxigênio dissolvido (SUN *et. al.*, 2017; SRB *et. al.*, 2022). Esse método apresenta vantagens por aprimorar a nitrificação e desnitrificação simultâneas, com uso eficiente de carbono orgânico para desnitrificação (SUN *et. al.*, 2017).

Os principais fatores que afetam a eficiência da remoção de nitrogênio compreendem a razão do tempo de duração das fases anóxica e aeróbia, a concentração de oxigênio dissolvido, a fonte de carbono orgânico e sua proporção com a concentração de nitrogênio, a idade do lodo, a temperatura, e pH e alcalinidade (SRB *et. al.*, 2022; WU *et. al.*, 2023). Os desafios operacionais consistem em controlar o teor de oxigênio dissolvido, ou manter ciclos de períodos anóxico e aeróbio com duração suficiente para uma nitrificação e desnitrificação eficientes. Ciclos com razão de fase anóxica para aeróbia iguais a 2:1 se mostraram mais eficientes. O teor de oxigênio dissolvido comumente aplicado é da faixa de 0,2 a 0,5 mg/L (SUN *et. al.*, 2017). A temperatura mais elevada, além de aumentar a atividade metabólica também permite maiores taxas de transferência de gás. Em geral, isso pode significar uma vantagem para locais de clima temperado (ZOPPAS *et. al.*, 2016). Já o teor de carbono orgânico, se muito reduzido, pode prejudicar a desnitrificação heterotrófica, demandando maiores tempos de idade do lodo (SUN *et. al.*, 2017).

Sendo assim, o presente trabalho busca operar de forma automatizada uma ETE em escala real de lodo ativado de alta taxa, visando avaliar a eficiência de remoção de nitrogênio e confiabilidade do processo em função dos ciclos de aeração intermitente e do teor de oxigênio dissolvido. O objetivo é responder quais condições de oxigenação e idade do lodo garantem a remoção otimizada do nitrogênio no efluente sem prejudicar a remoção de matéria orgânica. Pretende avaliar se maiores idades do lodo, teores de oxigênio dissolvido abaixo de 0,5 mg/L e razão de fase anóxica para aeróbia de 2:1 permitiriam aprimorar a eficiência de remoção de nitrogênio. Serão monitorados o teor e concentração de carbono orgânico afluente à ETE para avaliar sua influência sobre as melhores faixas de operação de idade do lodo. Dessa forma, esse estudo busca contribuir para alternativas simples de adaptação de ETEs de operação tradicional, visando um tratamento de terceiro grau, adaptado para remoção de nutrientes.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho será desenvolvido na Estação de Tratamento de Esgoto da Sabesp, denominada ETE Itatinga, localizada no município de São Sebastião do Estado de São Paulo. A estação se insere na zona climática *Koppen Cfb*, úmida subtropical, de clima oceânico e verão temperado (ALVARES *et. al.*, 2014). Trata-se ainda de um município litorâneo marcado pela ocupação de veraneio, com grande população flutuante.

A estação é de lodo ativado de alta taxa por fluxo contínuo, possuindo dois tanques de aeração alimentados em paralelo. O esgoto efluente do tratamento preliminar é encaminhado até uma caixa divisora de vazão, onde é dividido em duas parcelas iguais, e é então encaminhado por gravidade para os tanques de aeração. A caixa divisora, além de receber o esgoto, recebe também o lodo que é removido dos decantadores e enviado para a Estação Elevatória de Recirculação de Lodo. Nos tanques de aeração a mistura do lodo e o fornecimento de oxigênio para o processo biológico é feita por um conjunto de 04 sopradores de ar, os quais são responsáveis também pelo fornecimento de ar para os digestores aeróbios de lodo de excesso.

CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

A ETE opera normalmente com idade do lodo variável, não regulada, dentro da faixa de 4 a 6 dias. Para avaliar a influência dessa variável na eficiência de remoção de nutrientes, será feito o controle da operação com idade do lodo (θ_c) em sua condição mínima, isso é de 4 dias, e máxima, ou seja, de 6 dias. Já as condições de aeração serão controladas pelos sopradores, comandados por oxímetros, instalados nas zonas finais dos tanques de aeração, onde serão estabelecidas concentrações de trabalho do oxigênio dissolvido (OD), e os valores monitorados permitirão a abertura ou fechamento das válvulas dos sopradores.

Para avaliar o efeito do oxigênio dissolvido, a ETE será operada em três fases distintas. A primeira mantendo o padrão histórico, com OD superior a 2,0 mg/L. A segunda fase irá com OD entre 0,3 e 0,8 mg/L, e a terceira e última fase com aeração intermitente, contando com períodos de desligamento dos aeradores, com 4 ciclos diários de fase anóxica de 4 horas e fase aeróbia de 2 horas. Combinando as condições de operação de idade do lodo e aeração, a ETE será operada sobre 5 cenários. O primeiro cenário com OD superior a 2,0 mg/L e sem controle da idade do lodo; o segundo cenário com OD entre 0,3 e 0,8 mg/L e θ_c de 4 dias; o terceiro com OD ainda entre 0,3 e 0,8 mg/L e θ_c de 6 dias; o quarto com aeração intermitente e θ_c de 4 dias; e o quinto e último cenário com aeração intermitente e θ_c de 6 dias.

AMOSTRAGEM E RESPIROMETRIA

Para cada um dos cenários serão mensurados por sensores *online* e análises de laboratório, as concentrações de Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), Nitrogênio Amoniacal, Nitrito e Nitrato. As medições serão realizadas tanto no esgoto afluente ao tanque de aeração, quanto no efluente, perpassando os pontos P1, afluente aos tanques de aeração, P2 no efluente reunido à saída dos decantadores secundários, P3 no interior do tanque de aeração e permitindo o controle dos difusores de oxigênio, e P4 no digestor anaeróbio de lodo. A Tabela 1 sintetiza as variáveis, frequências e locais de monitoramento e amostragem.

Tabela 1: Plano de monitoramento e amostragem das variáveis de interesse

VARIÁVEIS	PONTOS DE AMOSTRAGEM	FREQUÊNCIA	PONTOS DE SENSORES
Temperatura	-	-	P1, P2, P3
Ph	-	-	P1, P2, P3
Alcalinidade	P1, P2	3 por semana	-
Oxigênio Dissolvido	-	-	P3
Taxa de utilização de oxigênio	P3, P4	1 por mês	-
DQO	P1, P2	2 por semana	P1, P2
DQO solúvel	P2	2 por semana	-
DQO rapidamente biodegradável	P1	1 por mês	P1
DBO _{5,20}	P1, P2	2 por semana	-
DBO _{5,20} solúvel	P2	2 por semana	-
Série completa de sólidos	P1, P2	2 por semana	-
Sólidos sedimentáveis	P1, P2	2 por semana	-
Concentração de sólidos	-	-	P3, P4
Nitrogênio total kjeldahl	P1, P2	3 por semana	-
Nitrogênio amoniacal	P1, P2	3 por semana	P1, P2
Nitrito	P2	3 por semana	-
Nitrato	P2	3 por semana	P2

As metodologias de análise laboratorial seguirão as recomendações da 21ª Edição do Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005). As análises de Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) e Nitrogênio amoniacal serão realizadas em cromatógrafo de íons. A DQO rapidamente biodegradável serão determina de acordo com procedimentos recomendados por Ekama *et. al.* (1995).

Para a determinação dos coeficientes cinéticos da desnitrificação, os testes respirométricos serão conduzidos para comparar a taxa de oxidação de material orgânico tendo como oxidante o oxigênio dissolvido e o nitrato. Para tanto, serão utilizadas bateladas do licor misto, determinando a TCO e a TCO equivalente (via nitrato) com acetato de sódio, simulando uma DQO rapidamente biodegradável, suspensão de amido comercial, simulando uma DQO lentamente biodegradável, e com o próprio esgoto sanitário afluente. Nos testes de TCO equivalente será adicionada solução de Nitrato de Potássio (KNO_3) de forma a perfazer a concentração de 10 mg/L de nitrogênio. Os testes serão realizados conforme os procedimentos recomendados por (VAN HAANDEL, CATUNDA, 1982), ao longo de todas as fases operacionais do experimento.

Para realização dos testes respirométricos e avaliação da atividade das bactérias autotróficas no licor misto granular, serão utilizados substratos específicos para cada grupo de bactérias. O consumo do substrato adicionado será traduzido pelo consumo de oxigênio dissolvido, registrado pelo respirômetro, calculando-se também a TCO. Serão utilizados como substratos o Cloreto de Amônio (NH_4Cl), para as bactérias nitritantes, e Nitrito de Sódio, ($NaNO_2$), para as bactérias nitratantes. Para a determinação das taxas de consumo de oxigênio (TCO), e a consequente estimativa dos coeficientes cinéticos da nitrificação, será usado, em laboratório, um respirômetro acoplado a um aerador e um agitador, com medições semi-contínuas, ligadas a um computador. Os dados de TCO, oxigênio dissolvido e temperatura serão registrados, gerando arquivos de planilha do Excel.

A confiabilidade do sistema em diferentes condições operacionais será calculada conforme roteiro proposto por NIKU *et. al.* (1979). Para tanto, os dados serão ajustados a uma curva de distribuição lognormal, e serão extraídas estatísticas como média amostral (\bar{x}) e coeficiente de variação (CV). A variável padronizada (Z) será então calculada em comparação com a meta de qualidade, dada pelo padrão de lançamento estabelecido em legislação. Com base em tabelas de distribuição normal padronizada será identificada a área acumulada sobre a curva normal associada à variável Z calculada, indicando o percentual de atendimento do sistema à meta de qualidade, e correspondendo à sua confiabilidade em uma determinada condição de operação.

RESULTADOS INICIAIS

A Figura 1 apresenta em Diagramas Box-Whiskers as medidas de vazão de esgoto afluente e efluente à ETE Itatinga, constituídos a partir de médias diárias dos registros horários. Já a Tabela 2 caracteriza outras variáveis de interesse, como DBO, DQO, NTK, e sólidos em suspensão, também para o esgoto afluente e efluente à ETE.

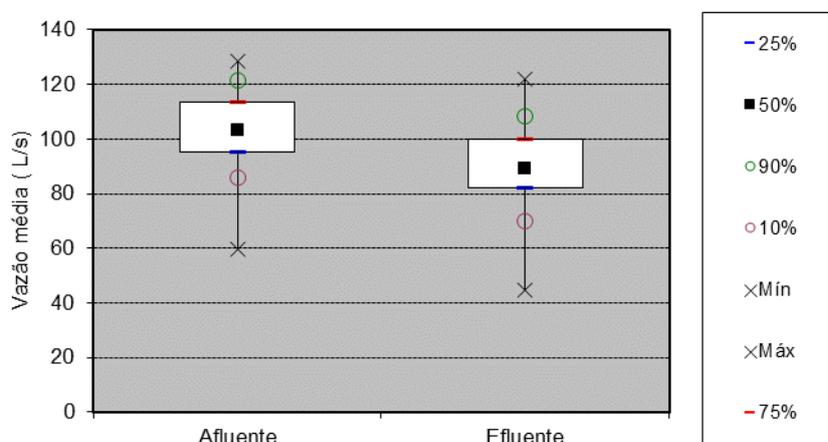


Figura 1: Diagramas Box-Whiskers das vazões afluente e efluente à ETE Itatinga.

Tabela 2: Caracterização do esgoto afluente e efluente à ETE

VARIÁVEL	ESGOTO AFLUENTE	ESGOTO EFLUENTE
Vazão Média [L/s]	103	90
Vazão Média [m ³ /d]	8,9	7,8
Concentração de DBO	605 mg/L	56 mg/L
Carga de DBO	5.384 kg/d	435 kg/d
Concentração de DQO	1.100 mg/L	187 mg/L
Carga de DQO	9.789 kg/d	1454 kg/d
Concentração de NTK	43,2 mgN/L	12,6 mgN/L
Carga de NTK	384 kgN/d	98 kgN/d
Concentração de Sólidos em Suspensão	670 mg/L	12 mg/L
Carga de Sólidos em Suspensão	5.962 kg/d	93 kg/d

Compondo-se a vazão média com as concentrações de DBO₅ e DQO do esgoto afluente, as quais são de 605 mg/L e 1.100 mg/L, respectivamente, resultam-se cargas de 5.384 kg DBO₅ por dia, e 9.789 kg DQO por dia, no esgoto afluente à ETE. A eficiência do sistema na remoção de DBO₅ foi de 90,7%, enquanto a remoção de NTK foi da ordem de 70,8%.

RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se identificar os valores de concentração de NTK e DQO no esgoto afluente e efluente sobre as condições operacionais, para obter a eficiência de remoção de nitrogênio e de matéria orgânica sobre cada condição, e ser avaliado a significância estatística com que a remoção foi mais ou menos eficiente sobre cada cenário. Também espera-se calcular a confiabilidade da remoção de matéria orgânica a partir destes mesmos valores de medições de DQO no esgoto afluente e efluente para cada cenário, e que novamente serão comparados e terão sua significância estatística avaliada.

Com os testes respirométricos espera-se estimar valores de coeficiente cinético de nitrificação, a serem comparados e estatisticamente avaliados para cada cenário operacional. Espera-se também avaliar os valores de pH, temperatura, e composição do carbono orgânico afluente para avaliar como esses parâmetros influenciam a operação à luz da literatura científica.

CONCLUSÕES

As condições prévias de operação da ETE estão de acordo com os padrões esperados para um sistema de lodo ativado de alta taxa, já partindo de uma remoção de NTK razoável, o que se pode explicar pelo grande acúmulo de lodo e, portanto, de carbono orgânico que retorna ao tanque de aeração. O processo poderá ser profundamente beneficiado com aeração intermitente e baixos teores de oxigênio dissolvido, o que pode ser facilmente executado mediante aplicação de sensores automatizados. A adaptação e monitoramento das condições da ETE deverá ser razoavelmente simples em função dos já instalados sensores. A continuidade do estudo da ETE também permitirá aprofundar o entendimento de como as características diversas do esgoto afluente, particularmente de uma cidade litorânea com alta população variável, podem impactar os processos biológicos de remoção de nutrientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA. Brasil). 2020. Atlas esgotos: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil. 44p. Disponível em <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/encarteatlasesgotos_etes.pdf> Acesso em 10 de abril de 2023.
2. AL-GHOUTI, M. A.; AL-KAABI, M. A.; ASHFAQ, M. Y., DA'NA, D. A. 2019. Produced water characteristics, treatment, and reuse: a review. *Journal of Water Process Engineering*, v. 28, p. 222–239, 2019.
3. ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. 2013. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, pp. 711-728, 2014.
4. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). *Standard Methods for the examination of Water and Wastewater*. 21st Edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington DC, 2005.
5. ARABI, S.; LYNNE, E. Leveraging the Existing Infrastructure to Achieve Sidestream Enhanced Biological Phosphorus Removal and Energy Efficiency Upgrades. *Proceedings of the Water Environment Federation*, v. 7, p. 5329-5343, 2018.
6. CAPODAGLIO, A. G.; HLAVÍNEK, P.; RABONI, M. Advances in wastewater nitrogen removal by biological processes: state of the art review. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 11, n. 2, 2016.
7. EKAMA, G. A.; MBEWE, A.; WENTZEL, M. C. Batch test for measurement of readily biodegradable COD and active organism concentrations in municipal waste waters. *Water SA*, v. 21, n. 2, p. 117-124, 1995.
8. FAN, Z.; ZENG, W.; JIA, Y.; MENG, Q.; LIU, H.; LIU, H.; PENG, Y. A novel process for simultaneous biological nutrient removal and waste activated sludge reduction in one-stage system without aeration. *Chemical Engineering Journal*, v. 454, 2023.
9. HASAN, M. N.; ALTAF, M. M.; KHAN, N. A.; KHAN, A. H.; KHAN, A. A.; AHMED, S.; KUMAR, P. S.; NAUSHAD, M.; RAJAPAKSHA, A. U.; IQBAL, J.; TIRTH, V.; ISLAM, S. Recent technologies for nutrient removal and recovery from wastewaters: A review. *Chemosphere*, v. 277, 2021.
10. JIN, L.; SUN, X.; REN, H.; HUANG, H. Hotspots and trends of biological water treatment based on bibliometric review and patent analysis. *Journal of Environmental Sciences*, v. 125, p. 774-785, 2023.
11. MIKI, R. E.; MIKI, M. K. Estação de Tratamento de Esgoto como Instalação de Recuperação de Recursos. AESABESP - Associação dos Engenheiros da Sabesp, Encontro Técnico, In: Anais 30º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, 2019.
12. NIKU, S.; SCHROEDER, E. D.; SAMANIEGO, F. J. Performance of activated sludge process and reliability-based design. *Journal Water Pollution Control Association*, v. 51, n. 12, p. 2841 – 2857, 1979.
13. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS), 2021. Diagnóstico Temático: Serviços de Água e Esgoto. Visão Geral: Ano de referência 2020. Disponível em <http://antigo.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2021.pdf> Acesso em 10 de abril de 2023.
14. SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution*, v. 24, n. 4, p. 201-207, 2009.
15. SRB, M.; LÁNSKÝ, M.; CHARVÁTOVÁ, L.; KOUBOVÁ, J.; PECL, R.; SÝKORA, P.; ROSICKÝ, J. Improved nitrogen removal efficiency by implementation of intermittent aeration. *Water Science & Technology*, v. 86, n.9, 2022.
16. STEFFEN, W. et. al. Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, v. 347, 2015.
17. SUN, Y.; GUAN, Y.; PAN, M.; ZHAN, X.; HU, Z.; WU, G. Enhanced biological nitrogen removal and N₂O emission characteristics of the intermittent aeration activated sludge process. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v.16, p. 761-780, 2017.
18. VAN HAANDEL, A.C.; CATUNDA, P.F.C. Determinação da taxa de consumo de oxigênio. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 4, p. 481-488, 1982.
19. VILLARÍN, M. C.; MEREL, S. Paradigm shifts and current challenges in wastewater management. *Journal of Hazardous Materials*, v. 390, p. 122-139, 2020.
20. WU, T.; YANG, S.S.; ZHONG, L.; PANG, J.W.; ZHANG, L.; XIA, X.F.; YANG, F.; XIE, G.J.; LIU, B.F.; REN, N.Q.; DING, J. Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal: What have we done so far and how do we need to do in the future? *Science of the Total Environment*, n. 856, 2023.



21. ZHANG, Z.; PAN, S.; HUANG, F.; LI, X.; SHANG, J.; LAI, J.; LIAO, Y. Nitrogen and Phosphorus Removal by Activated Sludge Process: A Review. *Mini-Reviews in Organic Chemistry*, v. 14, p. 99-106, 2017.
22. ZOPPAS, F. M.; BERNARDES, A. M.; MENEGUZZI, A. Parâmetros operacionais na remoção biológica de nitrogênio de águas por nitrificação e desnitrificação simultânea. *Revista da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 1, p.29-42, 2016.