

## **732 - ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE PROCESSO PARA OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PLANTAS DE LODO GRANULAR AERÓBIO: CASO DE ESTUDO NO BRASIL**

### **Rodrigo Alves dos Santos Pereira<sup>(1)</sup>**

Mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Formado em Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense. Atua há 14 anos no setor de Água, Esgoto e Manutenção voltado para Operações de Saneamento Público. Atualmente ocupa a posição de Engenheiro de Processos Sênior, no Departamento de Tecnologia e Produtos de Água, da Royal HaskoningDHV, Holanda.

### **Joana Raquel Claudino Doutor<sup>(2)</sup>**

Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, perfil Engenharia Sanitária, na Universidade Nova de Lisboa, Portugal. Possui 18 anos de experiência profissional em projetos internacionais nas áreas de Engenharia de Processo, Start-ups e Suporte Operacional em instalações de tratamento de água e efluentes. Atualmente é Coordenadora Técnica Global da Performance de Plantas Nereda®, no Departamento de Tecnologia e Produtos de Água, da Royal HaskoningDHV, Holanda.

### **Rita Alexandra Rebelo Ramos de Almeida<sup>(3)</sup>**

Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, perfil Engenharia Sanitária, na Universidade Nova de Lisboa, Portugal. Pós-graduação em economia e gestão pela Católica Lisbon School of Business and Economics. Programa doutoral em sistemas energéticos sustentáveis pelo Instituto Superior Técnico. Atua há 24 anos na operação e manutenção de sistemas de saneamento. Atualmente é Gerente do Serviço de Suporte Operacional do Departamento de Tecnologia e Produtos de Água, da Royal HaskoningDHV, Holanda.

### **Rodrigo Calai Guimarães<sup>(4)</sup>**

Pós-Graduado Lato Sensu, Especialização em engenharia de Saneamento Básico e Ambiental – UniCatólica. Formado em Engenharia Ambiental e Sanitária – UniCatólica. Formação em Tecnólogo em Gestão Ambiental pelo Centro Universitário Católica do Tocantins – UniCatólica. Formação em Técnico em Eletrotécnica, pelo Instituto Federal do Tocantins – IFTO. Possui 08 anos de experiência em operações de saneamento, ocupando atualmente o cargo de Coordenador de Operações Água & Esgoto na BRK.

### **Rafael Campelo Martins<sup>(5)</sup>**

Pós-Graduado em Saneamento pela Faculdade Venda Nova do Imigrante – FAVENI. Formado em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos - UNITPAC. Possui 10 anos de experiência no setor de saneamento, ocupando atualmente o cargo de Engineering and Construction Manager na GEMCORP Angola.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Laan 1914, No. 35 – Amersfoort – 3818 EX – Holanda – Tel.: +55 21 991 399 834 – e mail: rodrigo.pereira@rhdhv.com.

## **RESUMO**

A otimização de recursos pelas operações de saneamento é uma abordagem essencial para a sustentabilidade do setor e viabilização de novos investimentos e crescimento do setor. Dentro deste contexto, foi realizado um estudo comparativo de estratégias de controle de aeração em uma planta de Lodo Granular Aeróbio (LGA) no Norte do Brasil, com foco na redução do consumo de energia e manutenção da remoção de matéria orgânica e nutrientes (N e P). Foram utilizadas quatro estratégias de controle de aeração desde outubro de 2023, sendo elas: capacidade fixa, *setpoint* de oxigênio dissolvido (OD), condições de parada por OD e pH, e *setpoints* por OD e nitrogênio amoniacal (NH<sub>4</sub>). Os dados operacionais de 2024 mostraram que as estratégias dinâmicas de controle de aeração resultaram em reduções significativas no consumo de energia. A modulação por OD reduziu o consumo em 47%, enquanto as estratégias combinadas de pH+OD e OD+NH<sub>4</sub> resultaram em reduções de 51% e 53%, respectivamente. A medição direta da concentração de nitrogênio amoniacal foi mais eficiente do que a taxa de decréscimo de pH, por se tratar de uma medição direta e mais assertiva. Ainda, durante o período estudado, a aeração representou entre 35% e 48% do consumo total de energia da planta. A implementação de estratégias de controle de aeração é essencial e pode resultar em economias financeiras significativas, com a redução do consumo de energia elétrica estimada entre 190 e 210 mil reais por ano.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência energética, otimização, aeração, lodo granular aeróbio

## INTRODUÇÃO

Otimizar o uso dos recursos nas operações de saneamento é uma abordagem essencial para a sustentabilidade ambiental e financeira, considerando as necessidades de expansão do setor no Brasil, principalmente no serviço de esgotamento sanitário. O indicador atual aponta para uma cobertura de tratamento de esgoto de 52,2% (TRATABRASIL, 2024), o que reforça a necessidade de implantação de novas unidades de tratamento de esgoto.

Dentre as alternativas para tratamento de efluentes, os processos aeróbios estão entre as opções mais utilizadas para atender a padrões de efluentes mais restritivos, considerando a sua capacidade de promover a remoção de compostos orgânicos e nutrientes, nomeadamente nitrogenados e fosfatados. De forma geral, o tratamento biológico costuma corresponder a uma proporção entre 50% até 80% do consumo de energia em uma estação de tratamento, conforme levantamento feito por Yong Gu et. al, 2023.

Em um cenário onde os parâmetros de lançamento estão cada vez mais restritivos, fruto de atualizações nas legislações ambientais, e da incerteza sobre os custos com energia elétrica, por conta dos mecanismos de mudanças climáticas, é necessário implementar estratégias para aumentar a eficiência energética das unidades.

A aplicação de estratégias de controle e otimização de aeração é um tema de interesse, visto que a maior parte da energia é consumida por esses processos. Sabendo que existe uma relação do oxigênio dissolvido com a remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, as estratégias mais comuns envolvem a modulação da capacidade dos sopradores em torno de um determinado setpoint de oxigênio dissolvido. Entretanto, quando existe necessidade de obter efluentes com qualidade mais restrita, podem ser combinados com outros sensores, como o de nitrogênio amoniacal e/ou pH.

A tecnologia de Lodo Granular Aeróbio (LGA), baseado em bateladas sequenciais é comercialmente designada por tecnologia Nereda® e está implementada em várias ETE a nível mundial. Esta solução facilita o processo de monitoramento e ajustes operacionais, podendo resultar em redução de 20-50% de consumo de energia, devido à redução do número de equipamentos e ao controle automatizado e em tempo real do processo de aeração (Almemark, 2007).

Neste contexto, este artigo aborda diferentes estratégias de controle de aeração aplicadas em uma planta de LGA no Norte do Brasil, com foco na redução do consumo de energia e realizando uma comparação dos potenciais ganhos com as diferentes estratégias de controle aplicadas para assegurar a remoção de matéria orgânica e nutrientes.

## OBJETIVOS

Mensurar diferentes estratégias de controle de aeração em uma planta com processo LGA, com foco na redução do consumo de energia e criando cenários comparativos com os ganhos resultantes de cada estratégia, assegurando a remoção de matéria orgânica e nutrientes (N e P).

## METODOLOGIA UTILIZADA

A estação de tratamento de esgoto em estudo teve sua operação iniciada em outubro de 2023, com capacidade de tratar 395 l/s e uma carga afluente projetada de 13.685 kgDBO<sub>5</sub>/d e Nitrogênio total (NT) de 2.681 kg/d, conta com o processo Nereda® de LGA em bateladas sequenciais, possuindo um tanque de equalização e dois reatores (R1 e R2). Ainda, a opção pelo processo de LGA tinha como premissa a remoção de nutrientes, de forma a atingir concentrações de nitrogênio total (NT) inferiores a 10 mg/l e fósforo total inferior a 1 mg/l para lançamento, dessa forma a classe do rio permanece inalterada ao longo do ano.

Para esta unidade os principais objetivos de qualidade a serem alcançados estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos de Qualidade do Efluente Tratado

Parâmetros	Unidades	Efluente
DBO <sub>5</sub>	mg/l	< 23
Nitrogênio Total	mg/l	< 10
Fósforo Total	mg/l	< 1
Sólidos Suspensos Totais	mg/l	< 20

Considerando que a unidade utiliza um processo de LGA, o reator biológico passa por diferentes etapas para tratar o efluente bruto. Estas etapas consecutivas (alimentação de efluente bruto e descarte simultâneo de efluente tratado, aeração e sedimentação) são designadas como ciclos Nereda® (Figura 1) (Chen et al, 2023).

As etapas ou fases de um ciclo Nereda® são adaptadas em função das circunstâncias do processo, nomeadamente variações de vazão e carga afluente e qualidade requerida do efluente tratado. O tempo total do ciclo é automaticamente regulado pelo software de controle do processo. Mais importante ainda, através do monitoramento online de alguns parâmetros (exemplo na Figura 2), como a amônia, o nitrato e o fosfato permitem acompanhar a evolução das reações biológicas em tempo real e, se necessário, atingir concentrações de NH<sub>4</sub>-N e PO<sub>4</sub>-P inferiores a 1 mg/l. Estes parâmetros podem ser usados como variáveis de controle de processo para ajustar as fases do ciclo. Essas condições tornam a tecnologia Nereda® altamente flexível. O processo de LGA é controlado para atender aos requisitos do efluente tratado nos diversos parâmetros de qualidade (DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, N e P), otimizar o tempo de retenção de lodos e responder a variações da vazão afluente (Chen et al, 2023).

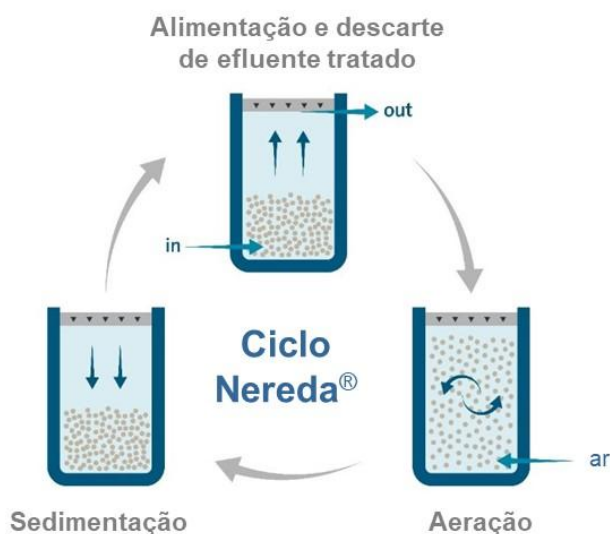


Figura 1 – Ciclo Nereda  
Fonte: Chen et al, 2023.

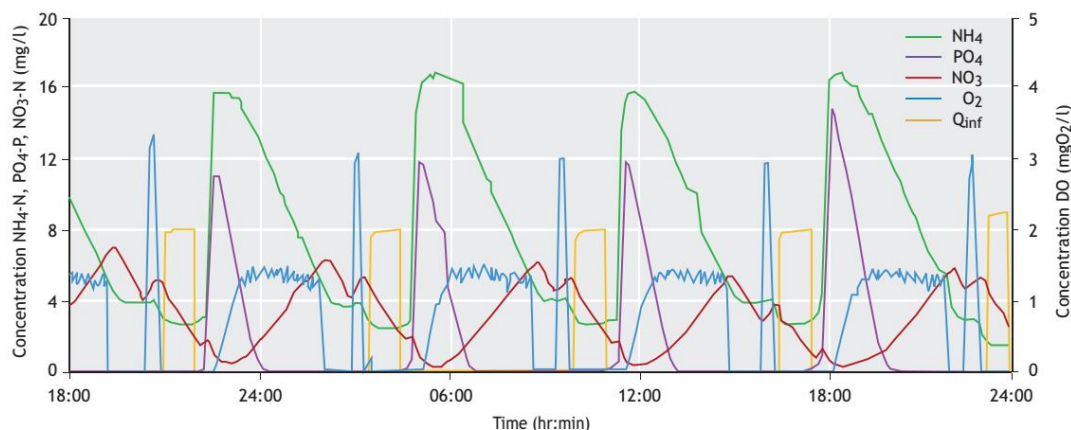


Figura 2 - Monitoramento online de amônia, fosfato, nitrato, oxigênio e vazão de alimentação numa ETE Nereda®

Fonte: Chen et al, 2023.

Na primeira etapa do ciclo Nereda® o efluente bruto é alimentado pelo fundo do reator atravessando a manta de lodo, enquanto o efluente tratado da batelada anterior é descartado pelo topo do reator. Devido às boas propriedades de sedimentação dos LGA este processo pode ocorrer com uma vazão e velocidade de alimentação relativamente elevadas, sem o risco saída de sólidos no efluente tratado. Na fase de reação, o reator é operado numa sequência de condições anaeróbias, anóxicas e aeróbias para conversão de DQO e nutrientes (amônia, nitrato, nitrito e fósforo). A fase de sedimentação permite assentar a manta de lodo para evitar a saída de sólidos quando se inicia a alimentação do ciclo seguinte. É também nesta etapa que parte dos mecanismos de seleção de LGA ocorrem (Chen et al, 2023).

O caso em estudo é focado na fase de reação do processo, em que o monitoramento em tempo real dos parâmetros de qualidade é também utilizado como estratégia de controle e otimização da aeração. Para o desenvolvimento do estudo, foram utilizadas as seguintes metodologias de controle da capacidade de aeração:

1. Capacidade de Aeração Fixa: a aeração é estabelecida com base em uma capacidade fixada no controlador, entrando em operação nos momentos que é solicitado pelo software de controle de processo. Essa condição é importante para definir a linha de base para comparações com os demais cenários.
2. Capacidade de aeração modulada por Oxigênio Dissolvido (OD): A capacidade de fornecimento ar soprado é regulada para manter a concentração de OD alinhada com o setpoint pré-definido, evitando aerações excessivas e reduzindo a potência elétrica consumida pelos sopradores.
3. Capacidade de aeração modulada por Oxigênio Dissolvido e pH (OD+pH): Com objetivo de atingir a nitrificação completa, foi utilizada o setpoint da taxa de decréscimo de pH para parada da fase de aeração em conjunto com o setpoint de oxigênio dissolvido como condição de modulação da aeração. Reforçando que a utilização da taxa de decréscimo de pH só é válida em condições que se almeja a remoção completa do nitrogênio amoniacal.
4. Capacidade de aeração modulada por Oxigênio Dissolvido e Nitrogênio Amoniacal (OD+NH<sub>4</sub>): A utilização destes analisadores de nitrogênio amoniacal permite aferir a concentração exata para parada da fase de aeração em conjunto com o setpoint de OD para modulação da capacidade de aeração. Esta estratégia permite um monitoramento quantitativo e qualitativo da remoção de nitrogênio amoniacal em todos os ciclos de operação.

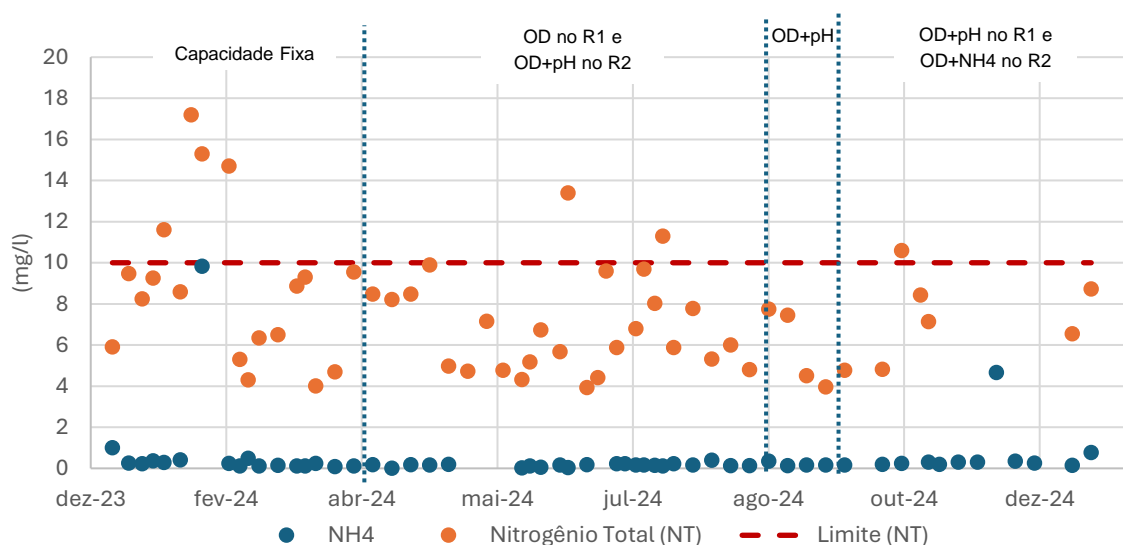
Os dados operacionais utilizados para a análise e discussão do estudo resultam das medições dos parâmetros on-line, através dos sensores de monitoramento instalados na ETE e dos resultados analíticos de qualidade provenientes de laboratório. O período analisado foi de janeiro a dezembro de 2024.

Os parâmetros on-line permitem o monitoramento contínuo da cinética do LGA através da medição de parâmetros como amônia, nitrato, fosfato, sólidos, entre outros. Os resultados analíticos provenientes de laboratório baseiam-se numa amostragem composta de 24 horas dos parâmetros de qualidade no afluente, reator e efluente.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

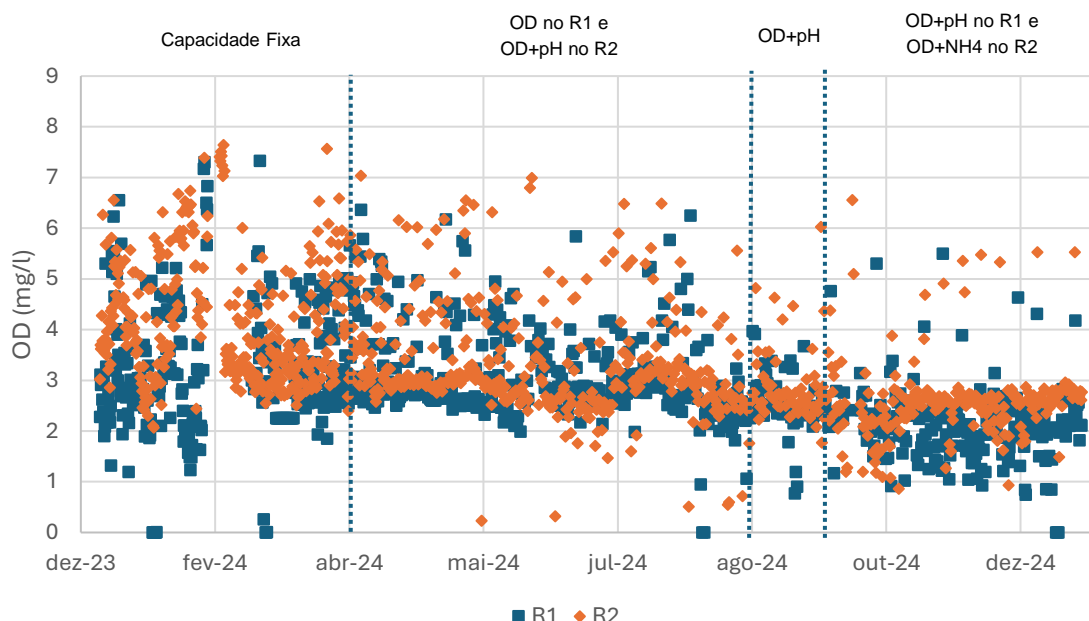
Durante o período de janeiro a dezembro de 2024 foram aplicadas as quatro estratégias de controle do sistema de aeração na fase de reação nos dois reatores da ETE, tendo sido sequenciadas da seguinte forma i) janeiro a março – Operada em Capacidade Fixa; ii) abril a julho - OD no R1 e pH+OD no R2; iii) agosto – OD+pH no R1 e R2; iv) setembro a dezembro - OD+pH no R1 e OD+NH<sub>4</sub>-N no R2. Durante todo o período foram monitorados o oxigênio dissolvido e as concentrações de nitrogênio amoniacal (apenas R2 e planta), com objetivo de manter os requisitos de qualidade durante o processo de otimização da unidade. Importante destacar, o estudo foi conduzido também com a finalidade de observar de forma simultânea o consumo de energia em diferentes estratégias.

Importante destacar que a planta desde o início de operação, ainda com controle de aeração por capacidade fixa, apresentou concentrações de nitrogênio total usualmente abaixo de 10 mg/l e nitrogênio amoniacal abaixo de 1 mg/l, conforme exibido na Figura 3. Com a alteração da metodologia de controle dinâmico de aeração em função de medições de OD e pH nos reatores, os resultados passaram a ser ainda mais estáveis e garantindo o atendimento ao padrão de lançamento, ressaltando que a concentração de nitrogênio amoniacal esteve sempre abaixo de 1 mg/l o que indica que os controles dinâmicos tornam a planta mais eficiente do ponto de vista energético. Durante o período de avaliação, a concentração média afluente a ETE foi de 71,9 mg NT/l e 45,7 mg NH<sub>4</sub>/l, sendo observadas remoções médias de 90% para NT e 94% para NH<sub>4</sub>.



**Figura 3 - Nitrogênio Total e Amoniacal no Lançamento da ETE**

A Figura 4 mostra a concentração de OD por batelada ao longo do período de estudo, sendo notável a maior oscilação nas concentrações durante o período com capacidade fixa, que durante alguns períodos estiveram próximo ao limite de saturação do meio líquido. Nos períodos seguintes, já com controle automatizado é possível observar uma maior estabilidade e consequente redução da concentração de OD para próximo de 2 mg/l, reforçando o benefício das estratégias para manutenção das condições aeróbias nos reatores.



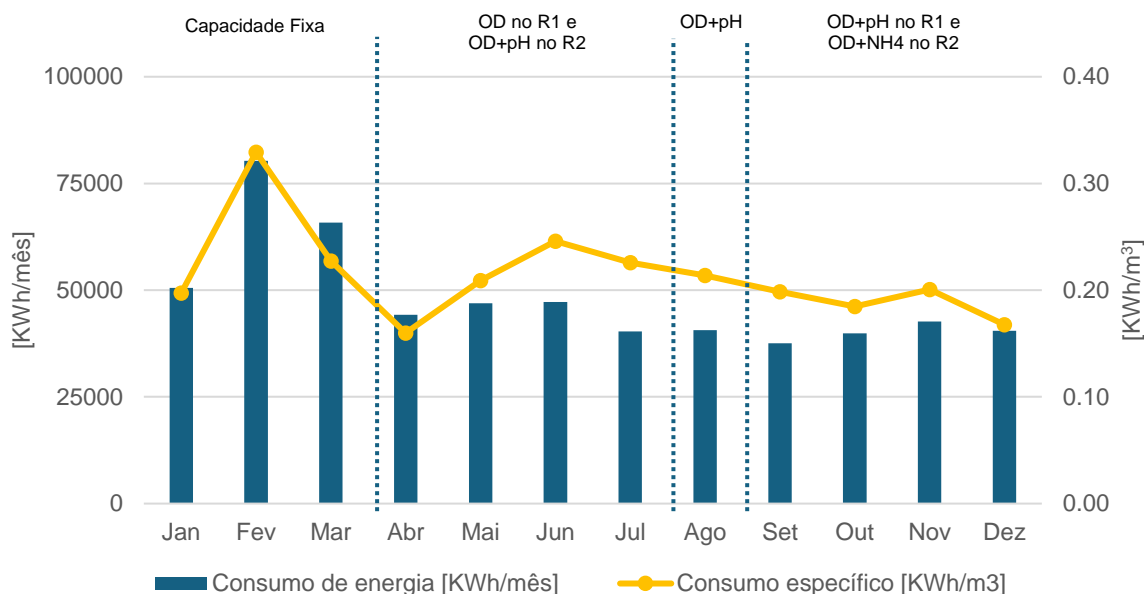
**Figura 4 - Concentração de OD por batelada**

O consumo de energia com aeração do tratamento biológico é apresentado na Figura 5, onde é possível verificar também o consumo específico por unidade de volume tratado. O controle por capacidade fixa resultou numa grande variabilidade do consumo energético, uma vez que a condição de parada da aeração era estritamente o tempo decorrido na fase de aeração e a capacidade de aeração definida manualmente. O indicador de consumo específico de energia para aeração atingiu um valor máximo de 0,33 kWh/m<sup>3</sup> tratado em fevereiro de 2024.

Na fase seguinte, com a ETE operando com o R1 com controle de OD e o R2 com OD+pH, foi observada uma redução média de 20.865 kWh/mês e o indicador específico de energia para aeração variou entre 0,16 e 0,25 kWh/m<sup>3</sup>. Além disso o consumo energético manteve-se no patamar no período de abril a julho/24, sem apresentar oscilações bruscas como no período em capacidade de aeração fixa. Durante agosto, os dois reatores foram operados com OD+pH e se mantiveram em condições semelhantes ao período anterior, onde operaram com controles diferentes.

Na última parte do estudo, entre setembro de dezembro de 2024, foram utilizados controles de OD+pH no R1 e OD+NH<sub>4</sub> no R2, resultando num indicador específico entre 0,17 e 0,20 kWh/m<sup>3</sup> tratado e uma operação mais estável. Ainda, foram comparadas as operações entre os dois reatores, sendo observado um consumo médio mensal com aeração no R1 de 20.529 kWh/mês e no R2 de 19.637 kWh/mês, sendo mais eficiente a estratégia com controle direto de nitrogênio amoniacal.

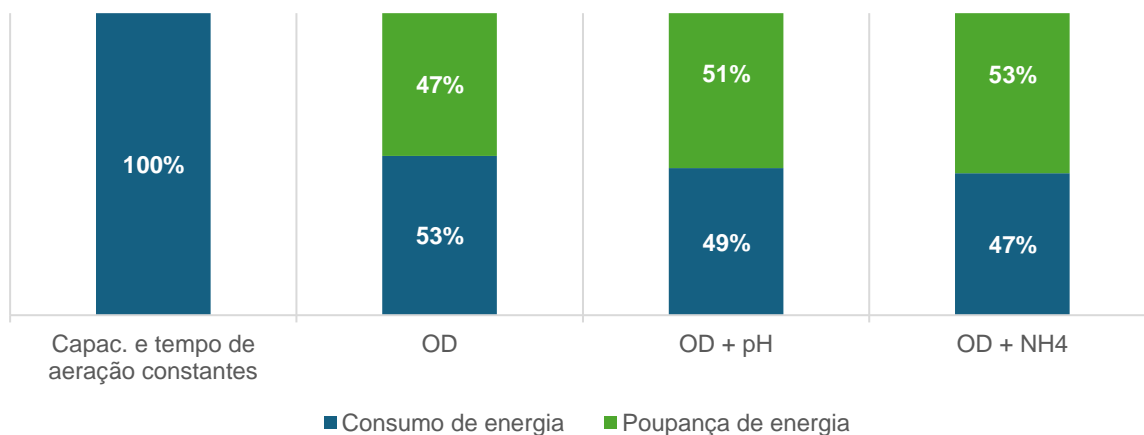




**Figura 5 - Consumo de energia total com aeração**

Os resultados indicam que a implementação de sistemas de controle de aeração dinâmicos com medições online de OD, pH e/ou nitrogênio amoniacal resultou em uma redução significativa no consumo de energia na unidade por comparação com o controle de aeração fixa, como demonstrado na Figura 6. O controle dinâmico mais simples, com apenas modulações em função do OD forneceram reduções de 47% no consumo de energia, o que deveria ser suficiente em um programa de eficiência energética para estações com foco em remoção de matéria orgânica. Entretanto, para situações com maiores requisitos de qualidade é importante ter estratégias complementares a fim de reduzir o tempo de aeração dos ciclos.

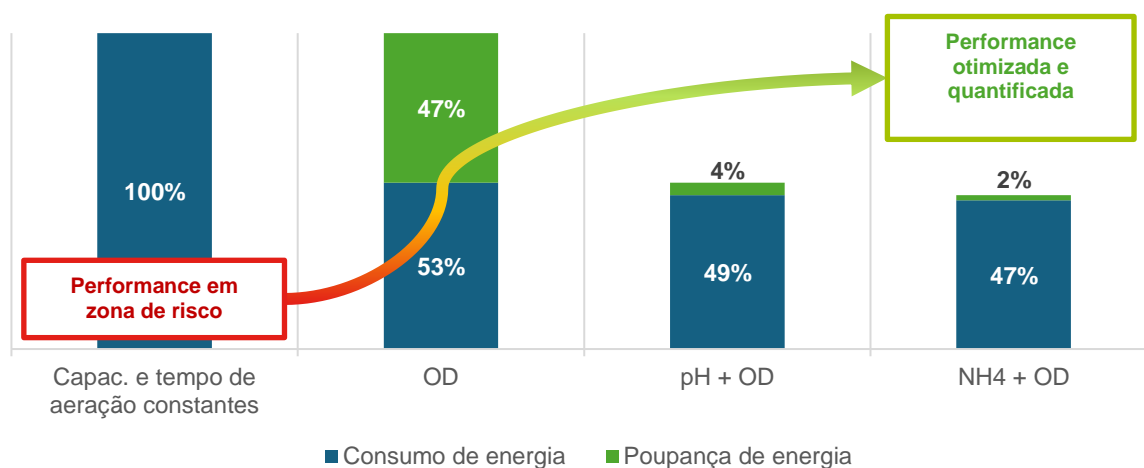
Em condições que requerem nitrificação total podem ser utilizados as estratégias combinadas de pH+ OD e OD+NH<sub>4</sub>, que resultaram em reduções de 51 e 53%, respectivamente, quando comparados com a aeração fixa. O aumento da eficiência nos dois casos está atrelado as reduções de tempo dos ciclos de reação, visto que o gatilho passa a ser ou a taxa de decréscimo de pH ou a medição direta da concentração de nitrogênio amoniacal. Sendo importante reforçar que a taxa de decréscimo de pH só é válida em cenários que necessitem da remoção completa de nitrogênio amoniacal (tipicamente inferior a 1 mgN/l), não sendo possível a utilização para definir um valor específico de amônia.



**Figura 6 - Consumo e poupança de energia vs. estratégias de aeração**

A escolha da estratégia de controle nas ETEs deve ser pautada nos requisitos necessários para o lançamento, atrelando os custos efetivos de implantação e manutenção dos sensores e circuitos de automação. Os savings totais projetados para este estudo ao progredir de uma estratégia de aeração fixa para o controle dinâmico da capacidade de aeração, e considerando uma tarifa média de 0,4 R\$/kWh, são da ordem de 190 a 210 mil reais por ano. Durante o período em que os testes foram conduzidos, a energia consumida pela aeração variou entre 35 e 48% do total da energia consumida, sendo inferior ao usualmente reportado em literatura para estações com processos similares.

Ainda, é preciso considerar que as estratégias de controle trazem ganhos incrementais quando comparadas entre si, conforme demonstrado na Figura 7. A utilização de controles com oxigênio dissolvido representa um ganho de 47% em relação a capacidade fixa. A estratégia com pH+OD melhora a performance em 4% comparado com apenas o OD, e a operação com condições de NH<sub>4</sub>+OD é 2% mais eficiente do que as condições de pH+OD. À medida que utilizamos condições de controle mais dinâmicas e robustas, temos maior previsibilidade da qualidade do efluente tratado, uma planta otimizada e os ganhos quantificados. A mensuração de parâmetros diretos no processo de tratamento traz ganhos importantes sob a ótica de manutenção das características de lançamento, além de otimizar o uso de equipamentos.



**Figura 7 - Consumo e poupança de energia entre as estratégias de aeração**

A adoção da estratégia de controle de aeração deverá estar associada com os objetivos de tratamento da planta e a capacidade utilizada, de maneira que os ganhos podem apresentar oscilações ao serem comparados com os resultados deste estudo.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A utilização de estratégias para otimizar o controle de aeração em ETEs é uma ferramenta importante para garantir a otimização dos custos de operação, nomeadamente com energia elétrica, considerando que existe uma necessidade de expansão do serviço de tratamento de efluentes no Brasil, de forma direta isso demandaria a expansão da capacidade de fornecimento de energia.

Foram avaliadas quatro estratégias de controle de processo sobre o ponto de vista do consumo de energia com aeração, manutenção das condições operacionais nos reatores e capacidade de produzir efluente tratado dentro dos padrões exigidos. Dentre as abordagens, a menos vantajosa foi o controle em capacidade fixa, pois os controles são manuais e necessitam de acompanhamento mais intensivo dos operadores.

A utilização da abordagem com controle da aeração por OD já fornece resultado satisfatório para a maior parte das plantas, garantindo uma redução de 47% no melhor cenário.



As duas estratégias de controle dinâmico da aeração acoplando ao setpoint de OD, também um setpoint de pH ou de amônia permitem resultados mais eficientes para o consumo energético com aeração assim como uma quantificação e otimização da qualidade do efluente tratado. A medição direta da concentração de nitrogênio amoniacal fornece resultados melhores do que a taxa de decréscimo de pH, tendo reduções no consumo de energia de até 53%. Salientando que a utilização da taxa de decréscimo de pH só é aplicável quando se busca obter nitrificação total, sendo a medição direta recomendada em casos que os limites sejam mais elevados.

A utilização dessas abordagens atreladas a processos de tratamento mais robustos pode produzir savings financeiros importantes para as concessionárias, sendo projetado no caso em estudo variações entre 190 e 210 mil reais por ano.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEMARK, M.. Report on simulations of scenarios for existing and emerging technologies. Part 3 Sequencing Batch Reactor (Nereda) compared to activated sludge treatment, INNOWATECH, EU Specific Targeted Research Project, Contract-No. 036882, 2007.
2. CHEN, G., VAN LOOSDRECHT M.C.M., EKAMA, G.A., BRDJANOVIC, D. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design, 2nd edition. IWA Publishing, cap.11, p. 497-522, Jul. 2023. DOI:10.2166/9781789060362.
3. TRATA BRASIL - Média de tratamento de esgoto entre as 100 maiores cidades brasileiras está longe do necessário. Disponível em: <<https://tratabrasil.org.br/media-tratamento-de-esgoto-ranking-saneamento/>>. Acesso em: 2 jan. 2025.
4. YONG GU, YU LI, FANG YUAN, QIANG YANG. Optimization and control strategies of aeration in WWTPs: A review, Journal of Cleaner Production, Volume 418, 2023.