ESTUDO DE CASO: HIBERNAÇÃO DE REATORES LGA - DINÂMICA DE FÓSFORO E ESTRATÉGIAS DE RETOMADA OPERACIONAL

Rodrigo Alves dos Santos Pereira [(1)]
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 [(2)]
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.
Matheus de Paula Penna Franca [(3)]
Pós-Graduado Latu Sensu, Especialização em Engenharia Ambiental pela Universidade Paulista – UNIP. Formado em Engenharia Química pela Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio. Possui 8 anos de experiência no setor de saneamento, tendo atuado com operação e manutenção. Ocupa a posição de Coordenador de Operações em uma concessionária privada de saneamento.
Fábio Moreira dos Santos Cardoso [(4)]
Formado em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio. Possui 12 anos de experiência na área de saneamento, passando por operação de sistemas de tratamento e manutenção. Atualmente, ocupa a posição de Gerente de Operações em uma concessionária privada de saneamento.
Pedro Henrique Xavier Alves [(5)]
Técnico em Química formado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro. Possui 4 anos de experiência na área de saneamento. Atualmente ocupa a posição de Técnico Químico em uma concessionária privada de saneamento.

Endereço[(1)]: Laan 1914, No. 35 – Amersfoort – 3818 EX – Holanda – Tel.: +55 21 991 399 834 – e mail: rodrigo.pereira@haskoning.com.

RESUMO

A tecnologia de lodo granular aeróbio (LGA), implementada em uma ETE na cidade do Rio de Janeiro por meio do processo Nereda®, demonstra estabilidade operacional mesmo sob condições de hibernação — estratégia adotada desde dezembro de 2024, dado que a estação opera com aproximadamente 50% da vazão nominal e 30% da carga orgânica projetada. O presente trabalho integra dados de monitoramento de campo obtidos entre 27 e 30 de abril de 2026 sobre a prática de hibernação e reativação de LGA, com o objetivo de caracterizar a dinâmica de liberação e absorção de fósforo durante ciclos de hibernação e a transição de retomada. Os resultados revelam acúmulo progressivo de fosfato total (PT), atingindo 7,1 mg P/L no 6.º pulso de aeração, seguido de recuperação efetiva, sendo que as concentrações de PT retornaram a valores inferiores a 1,0 mg/L já no primeiro ciclo pós-retomada. A distribuição granulométrica manteve-se estável durante toda a hibernação. Esses resultados indicam a viabilidade da hibernação como estratégia operacional e contribuem para a construção de um protocolo de referência para outras plantas com tecnologia LGA, devendo ser consideradas as especificidades de cada estação de tratamento.

PALAVRAS-CHAVE: lodo granular aeróbio; hibernação; fósforo.

INTRODUÇÃO

O lodo granular aeróbio (LGA) é reconhecido como uma das tecnologias mais promissoras no tratamento biológico de esgotos, caracterizando-se pela formação de agregados microbianos densos e altamente sedimentáveis, capazes de remover simultaneamente matéria orgânica, nitrogênio e fósforo em um único reator sequencial em batelada (Pronk, M. et al.,2015 e ZENG, P. et al., 2024). Entre suas principais vantagens destacam-se a elevada retenção de biomassa, menor área requerida e dispensa de decantação secundária (Dababat, S. et al, 2023).

A ETE em estudo, localizada no Rio de Janeiro, foi projetada com janela operacional de 43.200 m³/d e carga de 19.871 kg DQO/d. Após três anos de operação, a estação ainda opera em torno de 50% da vazão nominal e 30% da carga esperada. Esse cenário de carga inferior a esperada/projetada motivou a implementação da estratégia de hibernação de reatores desde dezembro de 2024, com ciclos de 3 a 7 dias, concentrando toda a carga afluente no reator em operação.

A estratégia de hibernação pode ser entendida como um estado de "manutenção em repouso" de um sistema, no qual suas funções principais não são interrompidas, mas operam em um nível mínimo necessário para preservar sua integridade e capacidade de retomada. Ou seja, durante o período que o reator se encontra em repouso, não há a aplicação de novas cargas para tratamento (alimentação), sendo criado um ambiente controlado para a manutenção da atividade da biomassa. Ao contrário de uma parada total, a hibernação mantém o sistema em condições de prontidão para retornar à sua condição normal quando requisitado. Além disso, essa estratégia adiciona uma camada de flexibilidade operacional facilitando a operação da ETE com menos reatores e auxilia no caso de recebimento de efluentes fora dos padrões usuais de esgotos sanitários.

Embora a hibernação tenha sido aplicada com sucesso — mantendo qualidade estável do efluente —, a dinâmica de liberação e absorção de fósforo (P) durante esses períodos e na transição de retomada permanecia pouco documentada em escala plena. A compreensão desses mecanismos é fundamental tanto para o ajuste operacional quanto para subsidiar a disseminação da tecnologia LGA em outras plantas (Ekholm, J. et al., 2022).

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a dinâmica do fósforo durante ciclos de hibernação e na recuperação operacional, com base em dados de campo coletados entre 27 e 30 de abril de 2026, integrados a uma revisão da literatura sobre armazenamento e reativação de LGA.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os grânulos aeróbios consistem em consórcios microbianos organizados em camadas com gradientes de oxigênio, possibilitando a coexistência de zonas aeróbias, anóxicas e anaeróbias (Zeng, P. et al., 2024). A remoção biológica de fósforo (RBF) ocorre pelo ciclo metabólico das bactérias acumuladoras de polifosfato (PAOs): em condições anaeróbias, degradam polifosfatos internos (poli-P) para absorver ácidos graxos voláteis e sintetizar PHA; sob aeração subsequente, oxidam o PHA acumulado e regeneram o poli-P, absorvendo P do meio em quantidade superior à liberada (Pronk, M. et al.,2015).

A interrupção da alimentação pode ocorrer por manutenção, variações sazonais de carga ou gerenciamento de múltiplos reatores com carga abaixo do esperado (Shameem, K.S.,2023). Estudos indicam que estratégias com pulsos intermitentes de aeração resultam em recuperação mais rápida e menor comprometimento da atividade nitrificante em comparação ao armazenamento totalmente inativo (Shameem, K.S.,2023 e Liu, J. et al., 2023). No protocolo aplicado a ETE em estudo, o reator fica em condições anaeróbias por 8 horas intercaladas com pulsos de 20 minutos a 60% da capacidade de aeração, visando romper periodicamente as condições anaeróbias e promover absorção parcial do P liberado.

METODOLOGIA

Os ensaios foram conduzidos na ETE em estudo entre 27 e 30 de abril de 2026. O Reator 01 foi submetido à hibernação de 3 dias enquanto o Reator 02 permaneceu em operação normal com a totalidade da carga afluente. O protocolo de hibernação consistiu em: (i) condições anaeróbias por 8 horas; (ii) pulsos de aeração de 20 minutos a 60% da capacidade instalada a cada 8 horas; e (iii) pulso final de aeração antes da retomada para absorção do P residual no licor misto.

O plano de amostragem foi estruturado para capturar o perfil completo de P durante a hibernação e a retomada (Tabela 1). As coletas foram realizadas a 5 m de profundidade, com filtração imediata das amostras para evitar liberação adicional de P nos frascos. pH, OD e redox foram registrados por medidores online confirmados por portáteis. P-PO_4, N-NH_4 e DQO foram determinados com cubetas Hach (faixas alta e baixa). A distribuição granulométrica foi avaliada por peneiramento úmido (frações 0,212 a >2,0 mm) com determinação do MLSS por gravimetria.

Tabela 1 - Plano de amostragem durante a hibernação (● = parâmetro coletado).

Amostra	P-PO_4	pH	OD	Redox	N-NH_4	DQO	MLSS
Efluente do lote anterior	●	●			●	●	
Fim 1º pulso de aeração	●	●	●	●	●	●	●
Fim 2º pulso de aeração	●	●	●	●			
Fim 3º pulso de aeração	●	●	●	●			
Fim 4º pulso de aeração	●	●	●	●	●	●	●
Fim 5º a 7º pulsos de aeração	●	●	●	●			
Fim 8º pulso de aeração	●	●	●	●	●	●	●
Fim 9º pulso de aeração	●	●	●	●			
5 min após início da aeração (retomada)	●	●	●	●	●	●	●
Fim da aeração (recuperação)	●	●	●	●	●	●	
Efluente 1º ciclo pós-retomada	●	●	●	●	●	●	
Efluente 2º ciclo pós-retomada	●	●	●	●	●	●	
Efluente 3º ciclo pós-retomada	●	●	●	●	●	●	

Adicionalmente, o efluente tratado da planta foi monitorado desde o início da prática de hibernação em dezembro de 2024, sendo realizadas análises periódicas de DBO, NH4 e Fósforo Total (TP), a fim de assegurar a manutenção da qualidade do efluente tratado. Durante o ano de 2025 o período de hibernação utilizado foi de 3 dias e é a configuração utilizada até a execução dos testes.

RESULTADOS

Ao longo do período de aplicação do modo de hibernação de reatores de lodo granular aeróbio, foi mantido o acompanhamento da qualidade final do efluente, de forma a promover ajustes no tempo máximo de hibernação e na frequência dos pulsos. Os resultados obtidos no período podem ser observados nas **Figura 1**, **2 e 3**, sendo importante mencionar que os respectivos limites de lançamento são DBO5< 40 mg/l, NH4 < 20 mg/l e TP< 4 mg/l.

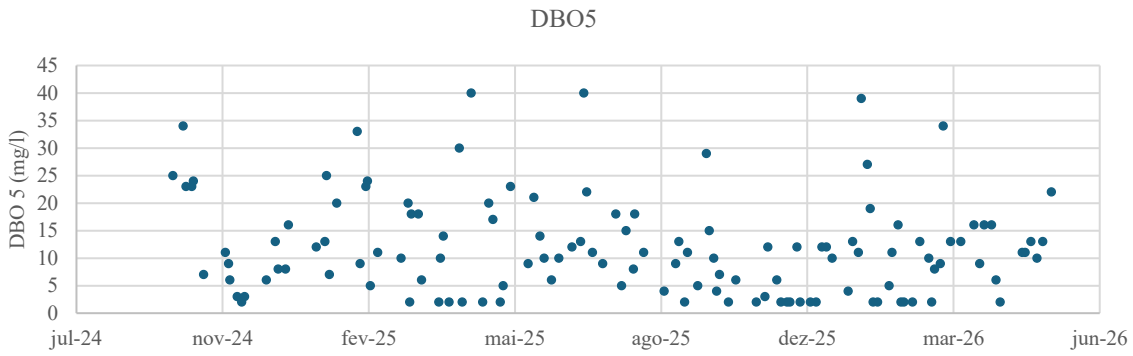


Figura 1 - Resultados de DBO durante o período de hibernação de reatores
Fonte: elaboração própria a partir de dados coletados na ETE, 2026

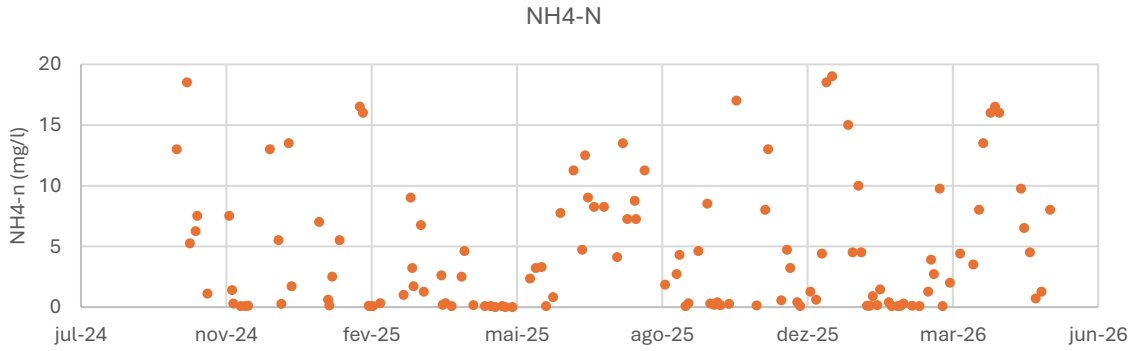


Figura 2 - Resultados de NH4 durante o período de hibernação de reatores
Fonte: elaboração própria a partir de dados coletados na ETE, 2026

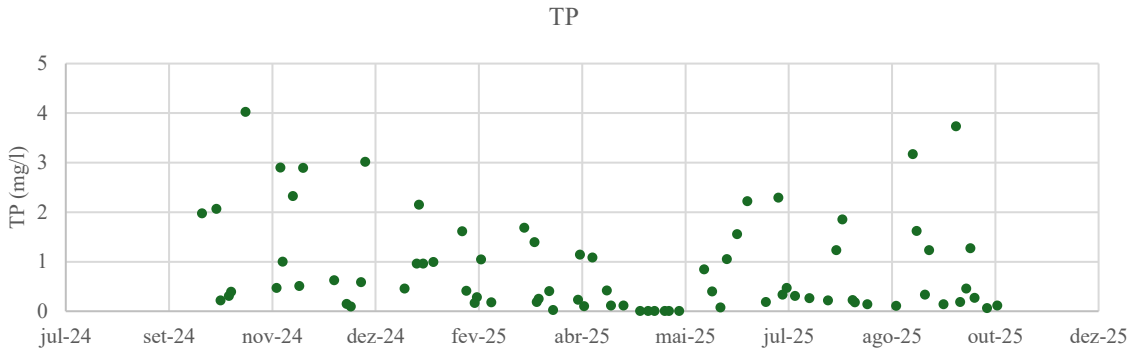


Figura 3 - Resultados de Fósforo Total (TP) durante o período de hibernação de reatores
Fonte: elaboração própria a partir de dados coletados na ETE, 2026

Para a ETE em estudo, os parâmetros se mantiverem dentro dos seus respectivos limites e com variações esperadas em razão da sazonalidade de volumes e concentrações afluentes a planta. Mais além, frequentemente o processo de tratamento atingiu concentrações inferiores a 1 mg P/l no efluente final, sendo um fator importante para a manutenção da estratégia de hibernação de reatores na ETE.

Na Tabela 2a apresenta os dados de monitoramento obtidos durante os 9 pulsos de aeração da hibernação (27–29/04/2026). A Tabela 2b apresenta os dados dos três primeiros ciclos após a retomada operacional (30/04/2026).

Tabela 2a - Monitoramento durante hibernação – pulsos de aeração

Pulso	Data	Horário	P-PO_4 (mg/L)	PT (mg/L)	DQO (mg/L)	N-NH_4 (mg/L)	pH
–	27/04/26	15:07	>3,08	4,70	24	<1	6
1	27/04/26	22:40	>3,08	2,90	62	4,0	6
2	28/04/26	04:50	>3,08	4,80	–	–	7
3	28/04/26	11:15	>3,08	4,30	–	–	6
4	28/04/26	17:45	–	5,70	27	<1	6
5	29/04/26	00:00	–	5,90	–	–	6
6	29/04/26	06:20	–	7,10	–	–	6
7	29/04/26	12:42	–	6,10	–	–	6
8	29/04/26	17:35	–	5,90	41	–	6
9	29/04/26	23:35	–	6,60	–	–	6

Fonte: elaboração própria a partir de dados coletados na ETE, abr/2026

Tabela 2b - Monitoramento pós-retomada – ciclos após transição.

Pulso	Data	Horário	P-PO_4 (mg/L)	PT (mg/L)	DQO (mg/L)	N-NH_4 (mg/L)	pH
1	30/04/26	–	<0,15	<1,0	9	<1,0	6
2	30/04/26	–	1,35	<1,0	9	<1,0	6
3	30/04/26	–	1,36	<1,0	28	<1,0	7

Fonte: elaboração própria a partir de dados coletados na ETE, abr/2026

O fosfato total (PT) no licor misto aumentou progressivamente ao longo dos pulsos, partindo de 2,90 mg/L (pulso 1, 22:40 de 27/04) e atingindo 7,10 mg/L no 6.º pulso (06:20 de 29/04). Esse comportamento é consistente com a liberação contínua de P pelos PAOs sob as condições anaeróbias frequentes entre os pulsos de aeração, sem substrato externo suficiente para promover absorção completa a cada intervalo.

O pH manteve-se estável (6–7) ao longo de toda a hibernação, indicando ausência de desequilíbrios metabólicos significativos. Os valores de DQO, mensurados nos pulsos 1, 4 e 8, variaram de 27 a 62 mg/L. A concentração de N-NH_4 foram predominantemente inferiores ao limite de detecção (<1 mg/L), exceto no pulso 1 (4 mg/L).

As análises de sólidos no licor misto (MLSS) e a distribuição granulométrica não apresentaram variações expressivas, sem indícios de impactos significativos na biomassa ou ao processo de granulação. Contudo, é importante mencionar que a ausência de mistura e capacidade reduzida de ressuspensão dos grânulos pode criar erros analíticos em períodos mais longos.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O padrão de acúmulo progressivo de P ao longo dos pulsos é explicado pela dinâmica metabólica dos PAOs: nas fases de espera anaeróbia (8 h), ocorre hidrólise do poli-P e liberação de ortofosfato para o meio líquido. Os pulsos de aeração de 20 minutos, embora suficientes para interromper a anaerobiose e permitir absorção parcial, não são longos o suficiente para absorção completa do P acumulado — o que é intencional no protocolo, pois pulsos mais longos acelerariam o decaimento endógeno, além de implicar em um maior consumo energético. O resultado é um acúmulo líquido de P ao longo dos dias, conforme observado.

A estabilidade do pH e a manutenção do MLSS ao longo da hibernação sugerem que o protocolo preservou adequadamente a viabilidade da biomassa, em linha com os achados de Shameem & Sabumon e Liu et al., que recomendam pulsos intermitentes de aeração como estratégia superior ao armazenamento anóxico contínuo.

A recuperação da qualidade do efluente após a retomada — $P\text{-}PO_4 < 0{,}15$ mg/L e PT < 1,0 mg/L já no primeiro ciclo — distingue a ETE em estudo de cenários descritos na literatura onde a recuperação demandou dias a semanas (Costa, R. C., 2020 e Nguyen, L. X. et al., 2023). Esse desempenho pode ser atribuído à curta duração da hibernação (3 dias), à manutenção da estrutura granular e à eficácia do pulso final de aeração pré-retomada.

Estudos futuros devem investigar se ciclos mais longos (>7 dias) afetam a distribuição granulométrica de forma mais significativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PRONK, M. et al. Effect and behavior of different substrates in relation to the formation of aerobic granular sludge. Applied Microbiology and Biotechnology, v.99, p.5257 – 5268, Jun. 2015.

2. ZENG, P. et al. The Aerobic Granules Process for Wastewater Treatment: From Theory to Engineering. Processes, v. 12, p.707, Mar. 2024.

3. DABABAT, S. et al. Aerobic Granular Sludge: Perspectives for Excess Sludge Management and Resource Recovery. Wiley, v.95, n.12, p. 1881-1896, Dec. 2023.

4. EKHOLM, J. et al. Full-Scale Aerobic Granular Sludge for Municipal Wastewater Treatment – Granule Formation, Microbial Succession, and Process Performance. Environmental Science: Water Research & Technology, v.8, n.12, p. 3138-3154, Dec. 2022.

5. SHAMEEM, K. S.; SABUMON, P. C. A Review on the Stability, Sustainability, Storage and Rejuvenation of Aerobic Granular Sludge (AGS). Water, v.15, n.5, p.950, Mar. 2023.

6. COSTA, R. C. Avaliação de estratégias de armazenamento do lodo granular aeróbio visando o tratamento de águas residuárias. UFRJ, 2020.

7. LIU, J. et al. A Systemic Evaluation of Aerobic Granular Sludge Among Granulation, Operation, Storage, and Reactivation Processes in an SBR. Environmental Research, v.235, Article 116594, Oct.2023.

8. NGUYEN, L. X. et al. Evaluation of the Recovery of Stored Granules to Promote Practical Wastewater Treatment by Aerobic Granular Sludge Process. Journal of Water and Environment Technology, v.21, n.6, p.297-308, Dec. 2023.