EFICIÊNCIA DO AERADOR CICLONE NO TRATAMENTO DE EFLUENTES EM LAGOAS FACULTATIVAS AERADAS: ESTUDO COMPARATIVO DE CAMPO COM AERADOR DE SUPERFÍCIE DE ROTOR HORIZONTAL

Ismael Nicholas Schröer[(1)]
Engenheiro Mecânico com especialização em simulação computacional de fluidos (CFD) e ampla experiência em desenvolvimento de turbomáquinas. Atua como Head de Inovação e Tecnologia no Grupo Higra, liderando projetos de inovação em bombas, turbogeradores, aeradores e produtos digitais.

Greco Tusset de Moura[(2)]
Engenheiro de Produção Mecânica, especialista em CFD e gestão de projetos. Diretor Técnico do grupo Higra.

Endereço[(1)]: Rua Dilceu Elias de Moura, 345 – Arroio da Manteiga – São Leopoldo – Rio Grande do Sul – CEP: 93135-390 – Brasil – Tel: +55 (51) 3778-2929 – e-mail: ismael.schroer@gmail.com / ismael.schroer@higra.com.br

RESUMO

Os aeradores mecânicos são determinantes para a eficiência das lagoas facultativas aeradas, influenciando a transferência de oxigênio, a hidrodinâmica e a qualidade do efluente tratado. Este trabalho apresenta um estudo comparativo de campo entre o Aerador Ciclone, tecnologia de aeração superficial submersa, e um aerador de superfície convencional, de rotor horizontal tipo escova. O estudo foi conduzido na ETE Lins (SABESP) entre janeiro e fevereiro de 2026, com 1.008 medições em sete pontos de coleta e sete parâmetros (oxigênio dissolvido, pH, temperatura, DBO, DQO, sólidos suspensos totais e nitrogênio amoniacal). Como as lagoas operaram com cargas iniciais distintas, a comparação baseou-se na eficiência de remoção interna de cada lagoa, sob potência nominal instalada equivalente nos dois sistemas. O Ciclone apresentou desempenho superior em oxigenação (OD de saída 27,8% maior; incremento interno de +80,1% contra +61,4%), em remoção de DBO (24,6% contra 15,6%) e, sobretudo, em nitrificação, com remoção de nitrogênio amoniacal cerca de 7 vezes maior (12,0% contra 1,7%). Os resultados são atribuídos ao padrão de fluxo radial em 360° do Ciclone, que reduz zonas mortas e promove distribuição mais uniforme do oxigênio dissolvido, evidenciando, em campo, seu melhor desempenho de tratamento na aeração de lagoas facultativas aeradas.

Palavras-chave: Aerador Ciclone, Lagoas aeradas, Nitrificação.

INTRODUÇÃO

O tratamento de efluentes por lagoas facultativas aeradas é uma das tecnologias mais amplamente adotadas no saneamento básico brasileiro, combinando a resiliência operacional das lagoas de estabilização com a intensificação do processo aeróbio proporcionada pelos aeradores mecânicos (VON SPERLING, 2014). Nesse contexto, a seleção do equipamento de aeração exerce papel central na eficiência do sistema, influenciando diretamente a taxa de transferência de oxigênio, a dinâmica hidráulica da lagoa e, consequentemente, a qualidade do efluente tratado.

Os aeradores de superfície convencionais, equipamento composto por um rotor horizontal tipo escova, flutuante, operando em baixa rotação, produzem uma intensa correnteza unidirecional, eficaz na região próxima ao equipamento, porém tendente a criar zonas de baixa agitação nas extremidades da lagoa, as chamadas zonas mortas, onde o oxigênio dissolvido (OD) decresce e predominam processos anaeróbios indesejáveis (CHERNICHARO, 1997). A eliminação dessas zonas mortas é, muitas vezes, mais impactante para a qualidade do efluente do que o simples incremento do OD médio.

O Aerador Ciclone, lançado comercialmente em 2025 (HIGRA INDUSTRIAL, 2025), é o primeiro aerador superficial submerso do mercado nacional. Acionado por um motor molhado submerso, sem óleo (sistema oil free), o equipamento promove uma redistribuição radial do fluxo em 360°, criando um padrão de circulação que alcança toda a área da lagoa de forma mais uniforme, com potencial de minimizar zonas mortas (HIGRA

INDUSTRIAL, 2026). Este trabalho apresenta a avaliação dessa tecnologia em condições reais de campo, comparada ao aerador de superfície, com base em monitoramento sistemático realizado na ETE Lins da SABESP.

OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo comparar quantitativamente, em condições reais de operação, a eficiência de aeração, a remoção de carga orgânica e a nitrificação do Aerador Ciclone frente ao aerador de superfície em lagoas facultativas aeradas, avaliando a hipótese de que o padrão de fluxo radial em 360° reduz zonas mortas e promove distribuição mais uniforme do oxigênio dissolvido (OD).

METODOLOGIA

O estudo foi conduzido na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de Lins, no interior do Estado de São Paulo, operada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). Foram selecionadas duas lagoas facultativas adjacentes, com características construtivas semelhantes de profundidade e área: uma operada com o Aerador Ciclone (10 equipamentos de aproximadamente 3 cv) e outra com o aerador de superfície (20 equipamentos de aproximadamente 1,5 cv), resultando em potência nominal total instalada equivalente nos dois sistemas (10 × 3 cv = 30 cv; 20 × 1,5 cv = 30 cv). Ressalta-se que a potência elétrica real absorvida não foi medida neste estudo; a comparação refere-se, portanto, ao desempenho de tratamento sob mesma potência nominal instalada, sendo a comparação energética objeto de estudo subsequente. A caracterização física individual das lagoas (volume e tempo de detenção hidráulica) não foi detalhada, assumindo-se a semelhança construtiva como premissa, limitação a ser endereçada em estudos futuros.

O monitoramento ocorreu de 19 de janeiro a 25 de fevereiro de 2026, em três horários diários (10h, 14h e 18h), totalizando 1.008 registros válidos. As análises de campo (OD, pH e temperatura) foram realizadas in situ com sondas multiparamétricas, e os parâmetros laboratoriais (DBO_5, DQO, SST e nitrogênio amoniacal) foram processados pelo laboratório da própria SABESP, conforme os métodos padronizados de análise de águas e efluentes (APHA, 2017), conferindo rastreabilidade aos dados (SABESP, 2026). Os pontos de coleta foram distribuídos ao longo do percurso de cada lagoa (início, meio e fim), além do ponto de entrada do efluente bruto, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Pontos de coleta, respectivas lagoas e parâmetros monitorados

Ponto	Descrição	Lagoa	Parâmetros coletados
P1	Entrada de efluente bruto	—	DBO, DQO, NH_3
P2	Início da Lagoa Ciclone	Ciclone	OD, pH, Temp. (3x/dia); DBO, DQO, SST, NH_3
P3	Meio da Lagoa Ciclone	Ciclone	OD, pH, Temp. (3x/dia)
P4	Saída da Lagoa Ciclone	Ciclone	OD, pH, Temp. (3x/dia); DBO, DQO, SST, NH_3
P5	Início da Lagoa Superfície	Superfície (Convencional)	OD, pH, Temp. (3x/dia); DBO, DQO, SST, NH_3
P6	Meio da Lagoa Superfície	Superfície (Convencional)	OD, pH, Temp. (3x/dia)
P7	Saída da Lagoa Superfície	Superfície (Convencional)	OD, pH, Temp. (3x/dia); DBO, DQO, SST, NH_3

Fonte: elaboração própria, 2026.

Como as duas lagoas operaram sob cargas orgânicas iniciais distintas, adotou-se como métrica principal de comparação a eficiência de remoção interna de cada lagoa, calculada como a variação percentual dos parâmetros entre os pontos de entrada (P2 para o Ciclone; P5 para o aerador de superfície) e de saída (P4 e P7, respectivamente). Essa abordagem permite comparar a eficiência intrínseca de cada tecnologia de forma justa, independentemente das condições iniciais.

RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO

Oxigênio Dissolvido (OD). O OD é o parâmetro mais diretamente relacionado à função primária de um aerador. Os resultados demonstraram superioridade consistente do Aerador Ciclone em todos os pontos de monitoramento, com uma característica relevante: a vantagem cresce progressivamente da entrada para a saída da lagoa, de +14,6% no ponto inicial para +27,8% no ponto de saída (Tabela 2). O incremento interno do OD ao longo da lagoa foi de +80,1% para o Ciclone, contra +61,4% para o aerador de superfície. Diferença de 18,7 pontos percentuais a favor da nova tecnologia.

Tabela 2 - Oxigênio dissolvido médio por ponto de coleta (Ciclone vs. Superfície)

Ponto de coleta	OD Ciclone (mg/L)	OD Superfície (mg/L)	Vantagem Ciclone
Início (P2 / P5)	3,21	2,80	+14,6%
Meio (P3 / P6)	3,51	3,14	+11,8%
Saída (P4 / P7)	5,78	4,52	+27,8%
Incremento interno (Início→Saída)	**+80,1%**	**+61,4%**	**+18,7 pp**

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da SABESP (PC45/2026), 2026.

Ambas as tecnologias garantiram OD acima do limiar mínimo de 2,0 mg/L recomendado para a nitrificação (METCALF & EDDY, 2003; VON SPERLING, 2005), mas o Ciclone manteve margem operacional superior, conferindo maior resiliência do processo frente a aumentos de carga. Adicionalmente, registraram-se valores de OD acima de 12 mg/L nos horários de pico fotossintético na lagoa do Ciclone, indicando supersaturação de oxigênio, sinal de alta atividade fotossintética e de boa saúde biológica do sistema.

Carga orgânica e remoção interna (DBO, DQO e NH_3). A análise revelou uma assimetria importante: o ponto de entrada da Lagoa Ciclone (P2) apresentou DBO média de 125,4 mg/L, contra 86,4 mg/L na entrada da lagoa do aerador de superfície (P5), diferença de 45% na carga recebida. Por esse motivo, a comparação foi feita pelas taxas de remoção interna, e não por valores absolutos de saída. Os resultados consolidados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Eficiência de remoção interna por lagoa (entrada → saída)

Parâmetro	Ciclone entrada	Ciclone saída	Superfície entr./saída	Remoção (C / S)
DBO (mg/L)	125,4	94,5	86,4 → 72,9	**24,6% / 15,6%**
DQO (mg/L)	288,9	261,1	204,1 → 185,0	9,6% / 9,4%
NH_3 (mg/L)	36,63	32,25	38,07 → 37,44	**12,0% / 1,7%**

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da SABESP (PC45/2026), 2026.

O Ciclone promoveu remoção interna de DBO de 24,6%, contra 15,6% do aerador de superfície (+9,0 pp), resultado ainda mais expressivo por ter sido obtido sob carga inicial 45% superior. Em DQO verificou-se empate técnico (≈9,5%), comportamento esperado, pois a fração não biodegradável da DQO não é afetada pela eficiência de aeração. O achado mais contundente foi a nitrificação: a remoção de nitrogênio amoniacal pelo Ciclone foi de 12,0%, cerca de 7 vezes superior aos 1,7% do aerador de superfície. Como a nitrificação é um processo estritamente aeróbio, exigindo OD sustentadamente acima de 2,0 mg/L, esse resultado é forte indicador indireto de que o Ciclone mantém OD adequado mesmo nas regiões mais distantes do equipamento, reduzindo zonas mortas. A consistência entre o maior OD observado na Lagoa Ciclone e a maior taxa de nitrificação reforça a interpretação mecanicista, sendo ambos os fenômenos coerentes com a redução de zonas mortas propiciada pelo fluxo radial. A equivalência de temperatura entre as lagoas elimina a variação térmica como fator confundidor desse resultado.

pH, temperatura e SST. As temperaturas foram praticamente idênticas nas duas lagoas (diferenças máximas de 0,5 °C), o que confirma que as diferenças de desempenho observadas decorrem das tecnologias de aeração, e não de fatores ambientais. O pH manteve-se na faixa adequada (7,5–9,5) em ambos os sistemas, com maior variação interna na lagoa do Ciclone (+0,38 contra +0,13 unidade), indicando maior atividade fotossintética. Os sólidos suspensos totais aumentaram ao longo do percurso em ambas as lagoas (+33,8% no Ciclone e +18,2% no aerador de superfície); esse incremento reflete maior proliferação de biomassa algal. Fenômeno positivo, coerente com o maior OD e pH, e neutralizável em etapa posterior de polimento.

Tabela 4 - Quadro comparativo consolidado de eficiência (remoção interna)

Parâmetro	Ciclone	Superfície	Veredito
OD – incremento interno	+80,1%	+61,4%	✓ Ciclone (+18,7 pp)
OD – saída (mg/L)	5,78	4,52	✓ Ciclone (+27,8%)
DBO – remoção interna	24,6%	15,6%	✓ Ciclone (+9,0 pp)
DQO – remoção interna	9,6%	9,4%	≈ Empate
NH_3 – remoção (nitrificação)	12,0%	1,7%	✓ Ciclone (≈7×)
pH – variação interna	+0,38	+0,13	✓ Ciclone

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da SABESP (PC45/2026), 2026.

O mecanismo que explica os resultados é a diferença no padrão de escoamento induzido por cada tecnologia (KELLNER; PIRES, 1998). O aerador de superfície, com rotor horizontal unidirecional, cria uma corrente laminar que deixa regiões de menor agitação nas extremidades, onde o OD decresce e a atividade das bactérias nitrificantes é comprometida. O Aerador Ciclone, ao induzir fluxo radial em 360°, distribui a energia de mistura de forma mais uniforme por toda a área da lagoa, garantindo que o efluente passe repetidamente pela região de alta turbulência. Cabe registrar que os 10 equipamentos Ciclone foram instalados em duas fileiras de cinco unidades, aproveitando a infraestrutura elétrica existente, condição de posicionamento subótima que gerou interferência de fluxo entre equipamentos. Os resultados positivos foram, portanto, obtidos mesmo sem a distribuição espacial ideal, o que reforça o potencial de desempenho ainda superior com disposição adequada. As simulações de CFD e os ensaios de traçadores previstos como próximos passos permitirão estimar o ganho adicional esperado com uma distribuição espacial otimizada dos equipamentos.

CONCLUSÕES

Os resultados de campo obtidos na ETE Lins da SABESP indicam desempenho superior do Aerador Ciclone frente ao aerador de superfície nas condições avaliadas. Em oxigenação, o Ciclone foi superior em todos os pontos, com OD de saída 27,8% maior e incremento interno de +80,1% contra +61,4%. Na remoção interna de DBO, alcançou 24,6% contra 15,6%, mesmo operando com carga inicial 45% superior. O resultado mais expressivo foi a nitrificação, com remoção de nitrogênio amoniacal cerca de 7 vezes maior (12,0% contra 1,7%), achado de elevada relevância ambiental. Em DQO verificou-se empate técnico, comportamento esperado pela presença de fração não biodegradável.

A principal vantagem competitiva do Ciclone reside não apenas na maior transferência de oxigênio, mas na distribuição mais uniforme desse oxigênio ao longo de toda a lagoa, com consequente redução das zonas mortas, mecanismo que se traduz em melhor desempenho biológico global. Os resultados, obtidos com dados laboratoriais da própria SABESP e sob condições operacionais mais exigentes para o Ciclone, com carga orgânica 45% superior e posicionamento subótimo, adaptado às fixações pré-existentes dos aeradores de superfície nos tanques, indicam a consistência do desempenho observado da tecnologia em operação real. Os próximos passos visam aprofundar a caracterização do desempenho observado: quantificação direta do consumo energético, modelagem por CFD e ensaios de traçadores para mapear as zonas mortas, e ampliação da base de casos em diferentes aplicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd ed. Washington: APHA; AWWA; WEF, 2017.

2. CHERNICHARO, C. A. L. Reatores Anaeróbios. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 5. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1997.

3. HIGRA INDUSTRIAL S.A. Aerador Superficial Submerso Ciclone: nova solução Higra para tratamento de efluentes. Disponível em: https://higra.com.br. Acesso em: abr. 2026.

4. HIGRA INDUSTRIAL S.A. Higra lança primeiro Aerador Superficial Submerso do mercado na FITABES 2025. São Leopoldo, 2025.

5. KELLNER, E.; PIRES, E. C. Lagoas de Estabilização: projeto e operação. Rio de Janeiro: ABES, 1998.

6. METCALF & EDDY, Inc. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

7. SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Dados brutos do monitoramento da ETE Lins (Proposta Comercial PC45/2026). Lins, SP: SABESP, 2026.

8. VON SPERLING, M. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 1. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

9. VON SPERLING, M. Lagoas de Estabilização. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 3. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.