DESEMPENHO DE UMA ETE COMPACTA EM AÇO INOX COM TECNOLOGIA MBBR NA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E NITROGÊNIO DE ESGOTO DOMÉSTICO

Ana Carolina Ferrari dos Santos[(1)]
Engenheira Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP) e pós-graduada em SGI (SENAC) e em Empreendedorismo e Inovação Tecnológica nas Engenharias (UNESP/CREA). Atua como Especialista em Projetos Pleno no Departamento de Processos e Hidromecânica.
Bruno Orlando Gaudencio[(2)]
Engenheiro ambiental, mestre em Hidráulica e Saneamento (EESC-USP) e especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (POLI-USP). Atua como Diretor Geral da E-Agua.
Matheus Renato Gomes[(3)]
Engenheiro Ambiental pela UNIFAL-MG, com especializações em Gerenciamento de Projetos pela University of Adelaide e Gerenciamento de Engenharia pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT). Atua como Diretor Comercial da E-Agua Engenharia.
Bruno Dinamarco[(4)]
Engenheiro Civil pela UFSCAR, com pós-graduação em Administração e Gestão pela FGV e UNICAMP. Atua como Diretor Executivo da B&F Dias Indústria e Comércio.
Felipe da Rocha Medeiros[(5)]
Engenheiro Mecânico pela FACENS, com pós-graduação em Administração de Empresas pela Fundação Getúlio Vargas (FGV). Atua como Gerente Técnico Comercial na B&F Dias Indústria e Comércio.

Endereço[(1)]**:** Rua Sebastião de Moraes, 634 – Parque Santa Felícia – São Carlos – São Paulo - CEP: 13562-425 - Brasil - Tel: +55 (16) 3374-7025 - e-mail: anacarolina.santos@e-agua.com.

RESUMO

O presente trabalho apresenta a avaliação de uma ETE Compacta de aço inoxidável (AISI 304L), baseada na tecnologia *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR), aplicada ao tratamento de esgoto doméstico em escala real, operada em regime contínuo. O estudo teve duração de 10 meses e contemplou as etapas de instalação, operação assistida, testes de desempenho e desmobilização. Foram monitoradas as variáveis: vazão, oxigênio dissolvido (OD), consumo energético, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) e nitrogênio amoniacal ($N\text{-}NH_4$). A unidade operou com vazão média de 0,9 ± 0,3 L/s e concentração média de OD de 5,1 mg/L. As eficiências médias de remoção foram de 84,5 ± 14,1% para DBO_5 e 75,8 ± 13,4% para DQO, resultando em concentrações médias efluentes de 20,4 ± 14,3 mg DBO_5/L e 63,0 ± 26,6 mg DQO/L. Embora o sistema não tenha sido projetado para remoção de nitrogênio, foram observadas remoções médias de 62,5 ± 23,6% para $N\text{-}NH_4$ e de 46,4 ± 12,3% para NTK. O consumo energético médio foi de 52,3 kWh/d, equivalente a aproximadamente 0,5 kWh/m³ de esgoto tratado. Os resultados demonstraram a aplicabilidade da tecnologia MBBR em sistemas compactos destinados ao tratamento descentralizado de esgoto doméstico.

PALAVRAS-CHAVE: biofilme em leito móvel, ETE compacta modular de aço inoxidável, tratamento descentralizado de esgotos.

INTRODUÇÃO

O Brasil ainda enfrenta desafios relevantes para a universalização do saneamento básico. Segundo o Instituto Trata Brasil e a GO Associados (2026), em 2024, o indicador de atendimento total de esgoto (ITE) foi de 76,97%, enquanto o indicador de tratamento total de esgoto (ITR) foi de 64,42%, evidenciando lacunas significativas na prestação desses serviços (ABCON; SINDCON, 2022).

A promulgação do Marco Legal do Saneamento, por meio da Lei nº 14.026/2020, estabeleceu metas de universalização correspondentes ao atendimento de 99% da população com água potável e 90% da população com coleta e tratamento de esgotos até 31 de dezembro de 2033 (BRASIL, 2020). O alcance dessas metas impõe desafios significativos aos prestadores de serviços de saneamento, especialmente em um cenário marcado por

limitações de infraestrutura e de investimentos. Nesse contexto, observa-se a crescente necessidade de soluções tecnológicas capazes de acelerar a expansão e a universalização dos serviços.

Entretanto, a ampliação dos sistemas convencionais centralizados frequentemente enfrenta limitações técnicas e econômicas em áreas de baixa densidade populacional, regiões periurbanas, comunidades isoladas e locais com elevada complexidade topográfica. Nessas condições, os custos associados à implantação de extensas redes coletoras, estações elevatórias e linhas de recalque podem comprometer a viabilidade dos empreendimentos (ABCON; SINDCON, 2022).

Nesse cenário, soluções descentralizadas de tratamento de esgotos vêm ganhando relevância como alternativa complementar aos sistemas centralizados, especialmente pela possibilidade de implantação mais rápida, modularidade, redução de obras civis e maior flexibilidade operacional (MASSOUD; TARHINI; NASR, 2009). Contudo, a descentralização também introduz desafios relacionados à necessidade de: (i) simplicidade operacional; (ii) estabilidade frente às oscilações hidráulicas e orgânicas; (iii) baixa demanda de manutenção e (iv) redução da necessidade de acompanhamento operacional contínuo em campo (PATIL; MUNAVALLI, 2020).

Dentre as tecnologias aplicáveis ao tratamento descentralizado, os reatores do tipo os reatores de biofilme em leito móvel (*Moving Bed Biofilm Reactor* - MBBR) apresentam potencial relevante devido à elevada eficiência de remoção de matéria orgânica, ao reduzido requerimento de área, à facilidade de modularização e à maior estabilidade operacional frente às variações de carga afluente (ØDEGAARD, 1999). O processo MBBR combina as vantagens dos sistemas de crescimento aderido e suspenso, permitindo elevadas concentrações de biomassa sem necessidade de recirculação de lodo, o que simplifica a operação e reduz custos (ØDEGAARD *et al.*, 1994). Adicionalmente, sistemas compactos pré-fabricados podem contribuir para a redução do tempo de implantação e para a simplificação logística, características particularmente relevantes em aplicações descentralizadas (XIAO *et al.*, 2014).

Apesar da crescente aplicação de sistemas compactos no setor de saneamento, os estudos técnico-operacionais conduzidos em condições reais de operação contínua envolvendo sistemas modulares aeróbios em escala real ainda são limitados, principalmente no Brasil (RIBEIRO; SILVA, 2018). Nesse contexto, o monitoramento operacional dessas unidades torna-se fundamental para a avaliação de desempenho, a identificação de limitações operacionais e a consolidação de critérios de projeto, de operação e de manutenção.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho técnico-operacional de uma ETE Compacta baseada no processo MBBR, operada em escala real e em regime contínuo, em uma estação de tratamento de esgotos municipal, com ênfase na remoção de matéria orgânica, no comportamento operacional do sistema e nos aspectos relacionados à sua aplicabilidade em cenários de tratamento descentralizado.

OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho técnico-operacional de uma ETE Compacta de tratamento de esgotos sanitários, baseada no processo MBBR, operada em escala real e em regime contínuo, em uma estação de tratamento de esgotos.

De forma específica, o estudo buscou:

- Caracterizar os principais componentes da ETE Compacta avaliada;
- Descrever as etapas da pesquisa, incluindo instalação, operação assistida, testes de performance e desmobilização;
- Avaliar a remoção de matéria orgânica, por meio do monitoramento de parâmetros DBO_5 e DQO;
- Avaliar o comportamento dos compostos nitrogenados NTK e $N\text{-}NH_4$ durante a operação do sistema;
- Monitorar os parâmetros operacionais relacionados à aeração (OD e consumo energético);
- Discutir a aplicabilidade de sistemas compactos modulares baseados na tecnologia de MBBR para o tratamento descentralizado de esgotos sanitários.

METODOLOGIA

CARACTERÍSTICAS DA ETE COMPACTA

O sistema avaliado foi dimensionado para remover material carbonáceo (com o objetivo de atingir valores de DBO5 no efluente inferiores a 60,0 mg/L), com capacidade para uma vazão média de 1,25 L/s. Com dimensões de 2,3 x 4,0 metros (largura por comprimento), Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) do MBBR de 3,4 horas e Carga Orgânica Volumétrica (COV) média de aproximadamente 0,8 kg DBO5/m³.d ou 1,5 kg DQO/m³.d, a estrutura foi construída integralmente em aço inoxidável AISI 304L e o sistema foi concebido para instalação simplificada, sendo necessária apenas a conexão da entrada de esgoto bruto, da saída de efluente tratado e do descarte de lodo, além da alimentação de energia elétrica para o funcionamento de seus componentes. A ETE Compacta pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 – ETE Compacta utilizada nesta pesquisa



Fonte: elaborada pelos autores.

Os principais equipamentos e componentes da ETE Compacta podem ser verificados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais componentes da ETE Compacta

Componente	Descrição
Reator MBBR	Reator aeróbio em aço inoxidável (AISI 304L)
Decantador de Alta Taxa	Decantador lamelar de alta taxa em aço inoxidável (AISI 304L)
Medidor de Vazão	Eletromagnético instalado na linha de alimentação do sistema da marca Endress-Hauser
Peneira Estática	Aço inoxidável (AISI 304) e abertura de 3 mm
Soprador de Ar	2 sopradores de canal lateral, sendo um em operação e um reserva, ambos da marca VazFlux, modelo 2 VF 105 / 410, com potência de 2,35 cv e 60 Hz
Sistema de Aeração	Tipo bolha grossa em aço inoxidável (AISI 304)
Biomídias	700 m²/m³ de área superficial protegida em PEAD virgem
Lamela de Decantação	Perfil angular com proteção UV
Bomba de Descarte de Lodo	Centrífuga horizontal, da marca Schneider Electric, modelo BCA-40
Painel de Controle	Painel de controle em aço inox com proteção IP65, CLP modular, IHM *touchscreen*, proteção elétrica certificada pela IEC e fonte de 24 Vcc. Comunicação via Modbus RTU/TCP-IP e Wi-Fi industrial.

Fonte: elaborada pelos autores.

O processo de tratamento inicia-se com o tratamento preliminar, no qual o esgoto bruto passa por uma peneira estática para a remoção de resíduos sólidos com tamanho superior a 3,0 mm. O efluente peneirado é conduzido ao reator aeróbio MBBR, onde ocorre a degradação principal da matéria orgânica. A aeração é realizada por meio de um soprador que insufla ar por difusores de bolha grossa dispostos no fundo do tanque, garantindo a mistura adequada do licor misto, a transferência de oxigênio e o desprendimento controlado do biofilme aderido às biomídias. Na Figura 2, apresenta-se a tipologia de biomídia utilizada neste estudo.

Figura 2 - Biomídia utilizada no presente estudo



Fonte: elaborada pelos autores.

O efluente segue para o decantador secundário de alta taxa, uma unidade de separação sólido-líquido baseada em módulos lamelares com inclinação de 60°. Na Figura 3, apresentam-se as lamelas utilizadas neste estudo.

Figura 3 - Módulos lamelares do decantador secundário

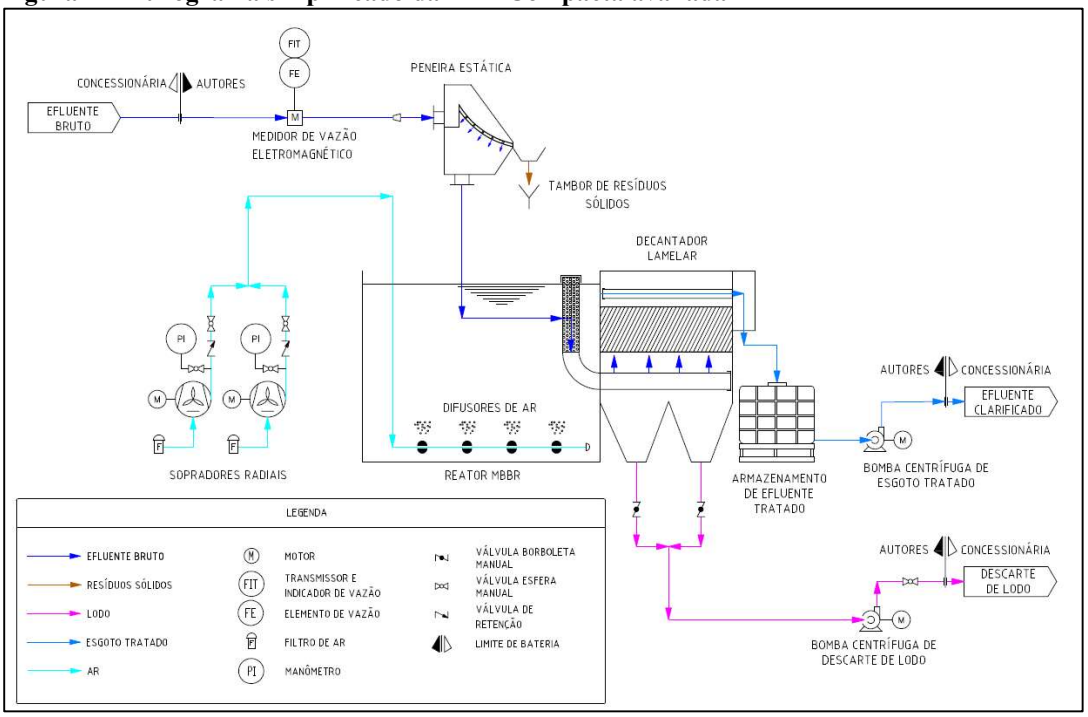


Fonte: elaborada pelos autores.

A biomassa sedimentada ao fundo do decantador é descartada periodicamente pela bomba de descarte de lodo. Já o efluente tratado é coletado por meio de canaletas localizadas na parte superior da unidade e encaminhado ao lançamento final.

O sistema foi projetado para operar sem recirculação de lodo, o que simplifica a operação e reduz a necessidade de intervenções operacionais. A concentração de oxigênio dissolvido no reator foi especificada em projeto como 3,0 mg/L, valor adequado para processos aeróbios de remoção de matéria orgânica carbonácea. O fluxograma simplificado do sistema compacto é apresentado na Figura 4.

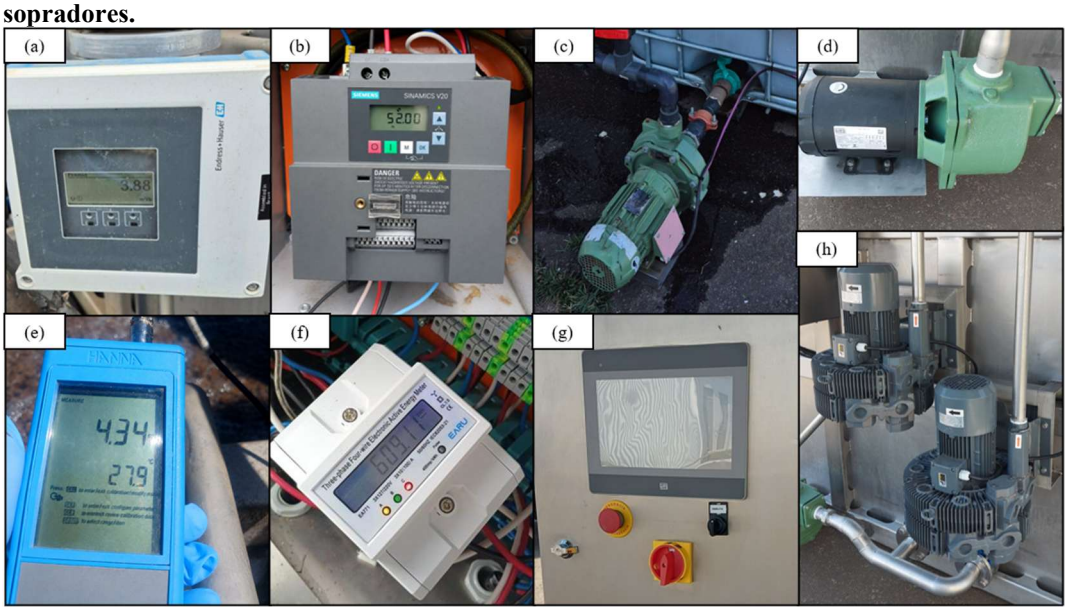
Figura 4 - Fluxograma simplificado da ETE Compacta avaliada



Nota: meramente ilustrativo e sem escalas.
Fonte: elaborada pelos autores.

Os equipamentos e componentes utilizados no funcionamento da ETE Compacta são apresentados na Figura 5. Suas especificações foram mencionadas anteriormente na Tabela 1.

Figura 5 - Instrumentos da ETE Compacta: (a) medidor de vazão na entrada do sistema; (b) inversor de frequência* da bomba de alimentação; (c) bomba de descarte do efluente tratado; (d) bomba de descarte de lodo; (e) medidor de OD portátil; (f) medidor de energia elétrica; (g) painel de controle e (h) sopradores.**

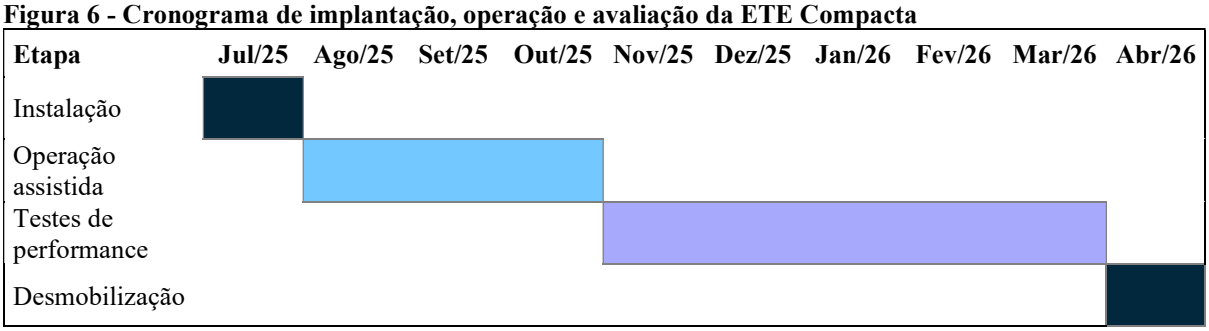


Nota: *o inversor de frequência foi instalado em 19 de janeiro de 2026, no mesmo dia em que a concessionária precisou instalar uma nova bomba submersível para alimentar a unidade, com vazão próxima da capacidade projetada para a ETE Compacta. ** As análises periódicas de OD foram realizadas pela concessionária. As especificações dos equipamentos e componentes constam na Tabela 1.
Fonte: elaborada pelos autores.

ETAPAS DA PESQUISA

O cronograma de implantação, operação e avaliação da ETE Compacta pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 - Cronograma de implantação, operação e avaliação da ETE Compacta



Fonte: elaborada pelos autores.

Instalação

A chegada do equipamento no local de instalação (município no interior do estado de São Paulo) ocorreu em 21 de julho de 2025, e o início da operação se deu em 30 de julho de 2025, quando foi ligada a bomba de alimentação de esgoto bruto. A bomba submersível foi instalada no canal após a caixa de areia da ETE, antes dos tanques de aeração, alimentando a ETE Compacta com esgoto doméstico.
O momento da instalação da ETE Compacta é apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Instalação da ETE Compacta



Fonte: elaborada pelos autores.

Como indicado na Figura 7, a ETE Compacta foi posicionada sobre uma base asfáltica já existente na unidade. A instalação foi realizada com auxílio de caminhão munck, utilizando-se dos olhais de içamento projetados na estrutura. Após o posicionamento, foram realizadas as conexões hidráulicas (entrada de esgoto bruto, saída de efluente tratado e descarte de lodo) e elétrica (alimentação do painel de controle).

O comissionamento incluiu testes de funcionamento dos equipamentos eletromecânicos (sopradores, bomba de lodo, medidor de vazão), verificação de vazamentos nas conexões e tubulações e adição gradual das biomídias conforme o nível do reator foi sendo elevado, a fim de evitar danos aos componentes e perdas por arraste decorrentes da formação de espuma no início da operação.

Operação assistida

Após a instalação da ETE Compacta, iniciou-se a etapa de operação assistida, sob responsabilidade dos autores e da concessionária responsável pela ETE na qual o equipamento foi instalado. Durante esse período, a ETE Compacta foi acompanhada com foco na identificação, avaliação e correção dos problemas observados no início da operação.

As equipes operacionais dos autores realizaram visitas periódicas para avaliar o desempenho da ETE Compacta e, em conjunto com as equipes de operação e de eletromecânica da concessionária, foram executadas as correções necessárias para que a ETE Compacta operasse de forma mais estável, com o mínimo de intervenções operacionais possível.

As rotinas operacionais da ETE Compacta, realizadas nessa etapa e na etapa de testes de performance, podem ser verificadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Rotinas operacionais da ETE Compacta avaliada (por turnos de operadores)

Local	Ação	Frequência
Entrada	Verificação da vazão de entrada	1x por turno
Peneira	Limpeza da tela da peneira	1x por turno
	Descarte dos resíduos do tambor da peneira	1x por turno
MBBR	Verificar se há zonas sem aeração no tanque	1x por turno
	Funcionamento geral dos sopradores	1x por turno
Decantador secundário	Verificar escape de sólidos	1x por turno
	Verificar zonas mortas/caminhos preferenciais	1x por turno
	Limpar lamelas	Conforme necessidade
Descarte de lodo	Acionamento da bomba de descarte de lodo	1x por turno
	Verificar se o lodo não está flutuando/escapando na canaleta	1x por turno

Fonte: elaborada pelos autores.

Durante a operação assistida, monitorou-se a concentração de OD no MBBR, a fim de identificar a quantidade de sopradores de fato necessária para manter a concentração de OD determinada em projeto (3,0 mg/L). Verificou-se o funcionamento dos sopradores por meio da detecção de ruídos anormais.

Além disso, as tubulações de ar e de líquido foram inspecionadas para detectar eventuais vazamentos e/ou entupimentos. Verificou-se também a ocorrência de escape de biomídias e avaliou-se periodicamente o estado dos filtros de retenção e da malha de retenção no fundo do reator.

Testes de performance

A etapa de testes de performance teve início em novembro de 2025 e foi concluída em abril de 2026, com duração de cerca de 130 dias. Esta etapa contemplou o monitoramento sistemático de parâmetros físico-químicos e operacionais. As principais variáveis determinadas para o monitoramento da performance da ETE Compacta são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Variáveis determinadas para o monitoramento da performance da ETE Compacta

Variável	Frequência de análise	Amostragem	Método/Instrumento de análise	Observações
Vazão[1]	Diária	Monitoramento contínuo na entrada da unidade.	Medidor de vazão eletromagnético instalado na entrada da unidade.	Valores ajustados pela operação durante o período de testes.
DBO_5[2]	Semanal	Amostra composta de afluente e efluente tratado.	5210 B (APHA, 2023).	Avaliação da eficiência de remoção de matéria orgânica.
DQO[2]	Semanal	Amostra composta de afluente e efluente tratado.	5220 D (APHA, 2023).	Avaliação da eficiência de remoção de matéria orgânica.
NTK[2]	Semanal	Amostra composta de afluente e efluente tratado.	4500-Norg B (APHA, 2023).	Avaliação do comportamento de NTK afluente e efluente à unidade.
$N\text{-}NH_4$[2]	Semanal	Amostra composta de afluente e efluente tratado.	4500-NH_3 C (APHA, 2023).	Avaliação da remoção de nitrogênio amoniacal.
OD[1]	Diária	Leitura pontual no reator aeróbio (MBBR).	Medidor portátil de oxigênio dissolvido (*Hanna Instruments*).	Monitoramento operacional do sistema de aeração.
Consumo energético	Contínua	Monitoramento contínuo no painel elétrico da unidade.	Medidor eletrônico de energia instalado na entrada do painel da unidade.	Monitoramento do consumo dos sopradores, da bomba de descarte de lodo e da bomba de recalque do efluente tratado.

Notas:
[1] Determinados em campo pela equipe de operação da concessionária.
[2] Análises realizadas no Laboratório de Saneamento (LabSan), da Universidade de São Paulo, localizado em São Carlos/SP e no laboratório da concessionária.
Fonte: elaborada pelos autores.

A vazão de operação foi ajustada manualmente pela equipe operacional da concessionária, por meio do inversor de frequência conectado à bomba de alimentação.

A concentração de oxigênio dissolvido foi medida com sonda portátil equipada com eletrodo de membrana, em ponto localizado no centro do reator MBBR, à meia profundidade. As medições foram realizadas de 3 a 4 vezes por semana, pela equipe de operação da concessionária.

A periodicidade de descarte do lodo e o volume descartado foram avaliados empiricamente, utilizando um recipiente graduado de 10 L. O descarte foi realizado uma vez por turno, com duração de 60 minutos.

O consumo energético foi monitorado continuamente por meio de um medidor de energia instalado na entrada do painel elétrico, que registrava o consumo dos sopradores, da bomba de descarte de lodo e da bomba de descarte de efluente tratado.

A forma geral de cálculo da eficiência de remoção para cada variável "X" é definida na Equação 1:

$$\eta_X = [C_{afl,X} - C_{efl,X}) \times 100]/C_{afl,X} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

- η_X: Eficiência de remoção do parâmetro X (%);
- $C_{afl,X}$: Concentração média afluente do parâmetro X (mg/L);
- $C_{efl,X}$: Concentração média efluente do parâmetro X (mg/L).

Para se determinar a carga afluente e efluente de uma variável de interesse "X" (como por exemplo, DBO_5), calculou-se como indicado na Equação 2:

$$\mathbf{Carga_X = 0{,}0864 \times Q \times C_X} \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:

- $Carga_X$: Carga da variável X (kg/d);
- Q: vazão do efluente (L/s);
- C_X: Concentração média da variável X (mg/L).

Para se determinar a Carga Orgânica Volumétrica durante o monitoramento da ETE Compacta, calculou-se como indicado na Equação 3:

$$\mathbf{COV_X = Carga_{X_{aflu}} / V_U} \qquad \text{Equação 3}$$

Onde:

- COV_X: carga orgânica volumétrica da variável "X" (DQO ou DBO_5) ($kg/m^3.d$);
- $Carga_{X_{aflu}}$: carga orgânica afluente da variável "X" (DQO ou DBO_5) (kg/d);
- V_U: volume útil da unidade (m^3).

Desmobilização

No dia 8 de abril de 2026, a unidade foi desmobilizada após o término dos testes de performance. A equipe de operação da concessionária iniciou o processo de esvaziamento da unidade, com a interrupção da alimentação de esgoto bruto, o desligamento dos sopradores e a abertura da válvula de descarte de fundo do reator. A bomba de descarte de lodo foi acionada para auxiliar no esvaziamento. Após o esvaziamento completo, os equipamentos foram desmontados e transportados pelos autores.

RESULTADOS OBTIDOS

VAZÃO

Os dados de vazão foram registrados pela equipe de operação da concessionária. Os dados médios registrados podem ser verificados na Tabela 4.

Tabela 4 - Vazões médias registradas durante os testes de performance

Data	Valores medidos (L/s)	Data	Valores medidos (L/s)
13/jan/26	0,2	25/fev/26	1,2
20/jan/26	0,8	27/fev/26	1,3
21/jan/26	0,6	02/mar/26	0,9
22/jan/26	0,8	19/mar/26	1,1
23/jan/26	0,8	23/mar/26	1,1
26/jan/26	0,9	24/mar/26	1,2
26/jan/26	0,9	25/mar/26	1,2
28/jan/26	0,7	31/mar/26	1,1
03/fev/26	0,9	**Média**	0,9

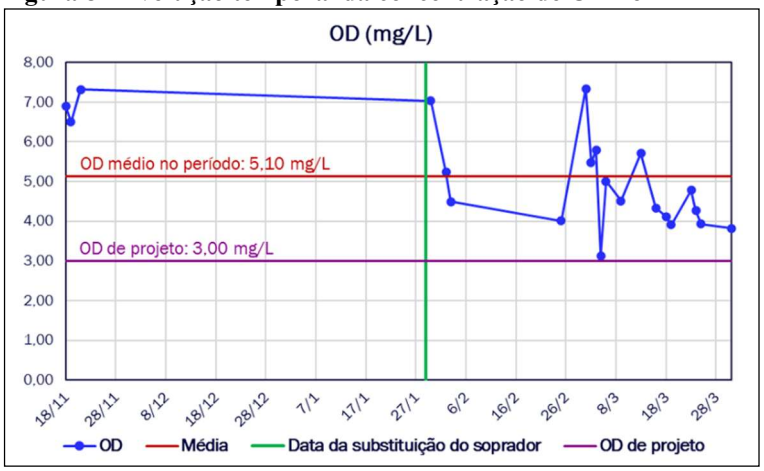
Nota: Em 19 de janeiro de 2026, foi instalado o inversor de frequência.
Fonte: elaborada pelos autores.

A vazão média de operação durante os testes de performance foi de 0,9 ± 0,3 L/s (79,5 ± 22,3 m^3/d), o que corresponde a 74% da vazão média de projeto (1,3 L/s). No período anterior à instalação do inversor de frequência, a vazão mínima registrada foi de 0,2 L/s e a máxima, de 0,9 L/s. Após a instalação do inversor, em 19 de janeiro de 2026, as vazões mínima e máxima foram, respectivamente, 0,9 e 1,3 L/s. Para fins de cálculo de carga, utilizou-se o valor de 1,0 L/s.

OXIGÊNIO DISSOLVIDO

A concentração de OD no reator MBBR foi monitorada durante os testes de performance e pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8 - Evolução temporal da concentração de OD no MBBR



Fonte: elaborada pelos autores.

A concentração de OD influencia diretamente a performance de um reator aeróbio, já que a oxidação de compostos orgânicos é limitada pela disponibilidade de oxigênio no meio (CHEN *et al.*, 1993). No presente estudo, a concentração média observada foi de 5,1 mg/L, superior à concentração definida no dimensionamento de processos, de 3,0 mg/L.

Antes da troca do soprador (em 29 de janeiro de 2026, indicada pela linha vertical verde na Figura 8), verificou-se que a concentração de OD no meio ultrapassou 6,0 mg/L, valor considerado elevado para o sistema de tratamento dimensionado. Após a troca do equipamento, houve uma queda no valor medido, mas ele permaneceu acima do valor requerido pela ETE Compacta, de 3,0 mg/L.

Mesmo com a substituição do soprador, o sistema operou com excedente de oxigênio em relação à condição ótima desejada para a remoção carbonácea e a eficiência energética, o que pode estar relacionado à baixa concentração de DBO_5 afluente, que permaneceu abaixo de 300,0 mg/L durante toda a operação.

Ainda que impacte no consumo energético (CHEN *et al.*, 1993), a manutenção de concentrações elevadas de OD é favorável aos processos de nitrificação (CHAI; WANG, 2019), embora o sistema avaliado no presente estudo não tenha sido dimensionado especificamente para a remoção de nitrogênio. Assim como demonstrado no estudo de Schopf; Delatolla; Kirkwood (2019), concentrações maiores de OD (5,5-7,0 mg/L) aumentam a disponibilidade de oxigênio para a oxidação da amônia, afetando as taxas e o perfil de oxidação no biofilme.

Além de suprir a demanda de oxigênio dos processos biológicos de remoção de matéria orgânica e conversão de compostos nitrogenados, o sistema de aeração é responsável por promover a circulação hidráulica do reator, assegurando a dispersão homogênea das biomídias em todo o volume reacional. Na Figura 9, evidencia-se a movimentação das biomídias no MBBR.

Figura 9 - Movimentação das mídias pela aeração no MBBR



Fonte: elaborada pelos autores.

Conforme apresentado na Figura 9, observou-se a distribuição das biomídias ao longo de todo o volume reacional, sem evidências visuais de acúmulos localizados ou de zonas preferenciais de concentração. Esse comportamento indica que o sistema de aeração foi capaz de promover simultaneamente o fornecimento de oxigênio e a movimentação contínua dos suportes móveis, condição considerada essencial para a operação de reatores MBBR (ØDEGAARD; RUSTEN; WESTRUM, 1994; ØDEGAARD, 1999).

A homogeneização observada favorece o contato entre o esgoto afluente, o oxigênio dissolvido e a biomassa aderida às biomídias, contribuindo para a uniformização das condições de tratamento em todo o volume do reator. Além disso, a movimentação contínua dos suportes reduz a formação de aglomerados de biomídias e auxilia no controle da espessura do biofilme por meio do cisalhamento hidráulico, preservando áreas biologicamente ativas para o crescimento microbiano e para os processos de transferência de massa (CHEN *et al*., 1993; CHAI; WANG, 2019).

As observações realizadas durante a operação indicaram que a intensidade de aeração adotada foi suficiente para manter as biomídias em suspensão contínua ao longo do período monitorado, condição associada, na literatura, ao adequado desempenho de sistemas MBBR aplicados ao tratamento de esgoto doméstico (JAVID *et al*., 2013; NHUT *et al*., 2020; LI *et al*., 2023; AL-ABOODI *et al*., 2020).

ESTABELECIMENTO DE BIOFILME

Observou-se a formação e o desenvolvimento de biofilme aderido às biomídias utilizadas no reator MBBR ao longo do período de operação. Na Figura 10, são apresentadas as biomídias retiradas do sistema, evidenciando a colonização microbiana e o estabelecimento do biofilme, responsáveis pelos processos biológicos de remoção de matéria orgânica e de nutrientes.

Figura 10 - Estabelecimento de biofilme nas biomídias utilizadas neste estudo



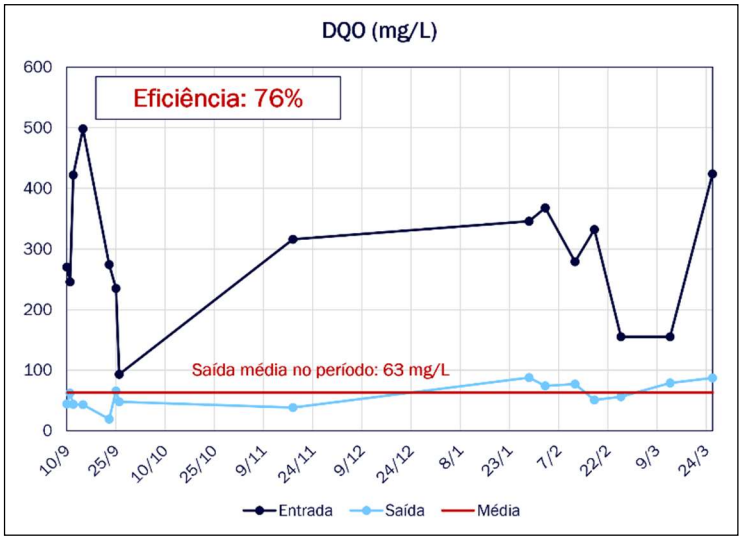
Fonte: elaborada pelos autores.

A observação das biomídias ao longo do período de monitoramento evidenciou a formação progressiva de biofilme aderido às suas superfícies, conforme apresentado na Figura 10. O aumento da cobertura biológica observado nas mídias indica o estabelecimento e a maturação da biomassa responsável pelos processos de remoção de matéria orgânica e transformação dos compostos nitrogenados, mecanismo fundamental da tecnologia MBBR (ØDEGAARD; RUSTEN; WESTRUM, 1994; ØDEGAARD, 1999). A elevada concentração de biomídias, mantida em constante movimentação pela aeração, favoreceu o contato entre o substrato, o oxigênio e a biomassa aderida, além de contribuir para o controle natural da espessura do biofilme por meio do cisalhamento hidráulico, preservando sua atividade microbiológica (CHEN *et al.*, 1993; ØDEGAARD, 1999). A consolidação do biofilme observada durante a operação está associada ao aumento da retenção de biomassa no sistema e constitui uma das principais vantagens dos processos MBBR, conferindo maior estabilidade operacional e favorecendo a remoção simultânea de matéria orgânica e de nutrientes, conforme reportado por diversos autores (JAVID *et al.*, 2013; NHUT *et al*., 2020; LI *et al*., 2023; AL-ABOODI *et al*., 2020).

MATÉRIA ORGÂNICA

A evolução temporal da concentração de DBO_5 durante os testes de performance pode ser visualizada na Figura 11.

Figura 11 - Evolução temporal das concentrações de DBO_5 (entrada e saída), com indicação do limite de lançamento



Fonte: elaborada pelos autores.

Conforme a Figura 11, as concentrações afluentes de DBO_5 variaram entre 16,0 e 281,0 mg DBO_5/L ao longo do período monitorado, com valor médio de 151,6 ± 89,0 mg DBO_5/L. As concentrações efluentes variaram entre 0,0 e 40,0 mg DBO_5/L, com média de 20,4 ± 14,3 mg DBO_5/L. A eficiência média de remoção foi de 84,5 ± 14,1%.

Observa-se que todas as concentrações efluentes permaneceram inferiores a 60 mg DBO_5/L, valor compatível com o padrão de qualidade estabelecido para corpos hídricos enquadrados na Classe 3 pela Resolução CONAMA nº 357/2005. A concentração média do efluente, de 20,4 mg DBO_5/L, corresponde a aproximadamente um terço do limite de lançamento considerado.

Com base na vazão média observada durante o período de testes (de 1 L/s) e nas concentrações médias, foi possível estimar as cargas associadas à variável DBO_5:

- Carga média de entrada: 13,1 kg DBO_5/d;
- Carga média de saída: 1,8 kg DBO_5/d;
- Carga removida média: 11,3 kg DBO_5/d.

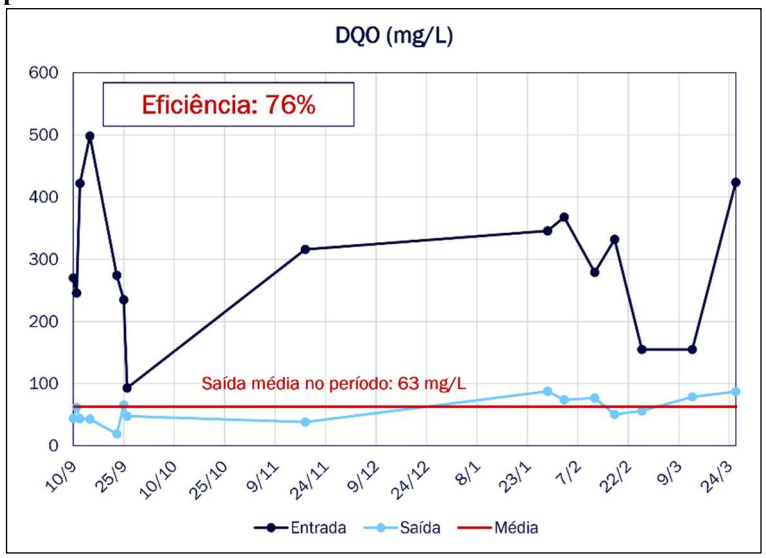
A carga orgânica volumétrica aplicada durante os testes foi estimada em aproximadamente 0,8 kg $DBO_5/m^3.d$.

A comparação entre os resultados obtidos e os reportados por Javid *et al.* (2013) evidencia concordância quanto ao desempenho da tecnologia MBBR no tratamento de esgoto doméstico. Os autores avaliaram cargas orgânicas entre 0,73 e 3,48 kg $DBO_5/m^3.d$ e observaram uma eficiência média de remoção de cerca de 88%. No presente estudo, para uma carga orgânica volumétrica de aproximadamente 0,8 kg $DBO_5/m^3.d$, foi obtida uma eficiência média de remoção de 84,5 ± 14,1%, associada a uma concentração média no efluente de 20,4 ± 14,3 mg DBO_5/L.

Os resultados obtidos demonstram que o sistema manteve concentrações efluentes de DBO_5 inferiores a 40,0 mg/L durante todo o período monitorado, mesmo diante das variações observadas nas concentrações afluentes. A proximidade entre os resultados observados neste estudo e os reportados por Javid *et al.* (2013) reforça a aplicabilidade da tecnologia MBBR em sistemas compactos de tratamento de esgoto doméstico.

A distribuição temporal dos dados das análises de DQO é apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Evolução temporal das concentrações de DQO (afluente e efluente) durante os testes de performance



Fonte: elaborada pelos autores.

Conforme a Figura 12, as concentrações afluentes de DQO variaram entre 93,1 e 498,0 mg DQO/L, com valor médio de 304,0 ± 113,7 mg DQO/L. As concentrações efluentes variaram de 19,2 a 132,0 mg DQO/L, com média de 63,0 ± 26,6 mg DQO/L. A eficiência média de remoção foi de 75,8 ± 13,4%.

Com base na vazão média observada durante o período de testes (de 1 L/s) e nas concentrações médias, foi possível estimar as cargas orgânicas associadas à variável DQO:

- Carga média de entrada: 26,3 kg DQO/d;
- Carga média de saída: 5,4 kg DQO/d;
- Carga removida média: 20,8 kg DQO/d.

A carga orgânica volumétrica aplicada durante os testes foi estimada em aproximadamente 1,5 kg DQO/m³.d.

A concentração média afluente observada neste estudo foi semelhante à reportada por Nhut *et al.* (2020), que avaliaram um sistema S-MBBR tratando esgoto doméstico com concentração afluente de DQO próxima de 300 mg/L. Os autores identificaram uma eficiência máxima de remoção de DQO de 85,0 ± 12,9% para uma carga orgânica volumétrica de 0,4 kg DQO/m³.d.

No presente estudo, a carga orgânica volumétrica aplicada foi estimada em aproximadamente 1,5 kg DQO/m³.d, valor cerca de quatro vezes superior ao reportado por Nhut *et al.* (2020), e obteve-se uma eficiência média de remoção de 75,8 ± 13,4%. A diferença observada entre as eficiências pode estar associada às diferentes cargas orgânicas aplicadas, uma vez que o aumento da taxa de aplicação orgânica tende a elevar a demanda metabólica da biomassa e reduzir a eficiência percentual de remoção.

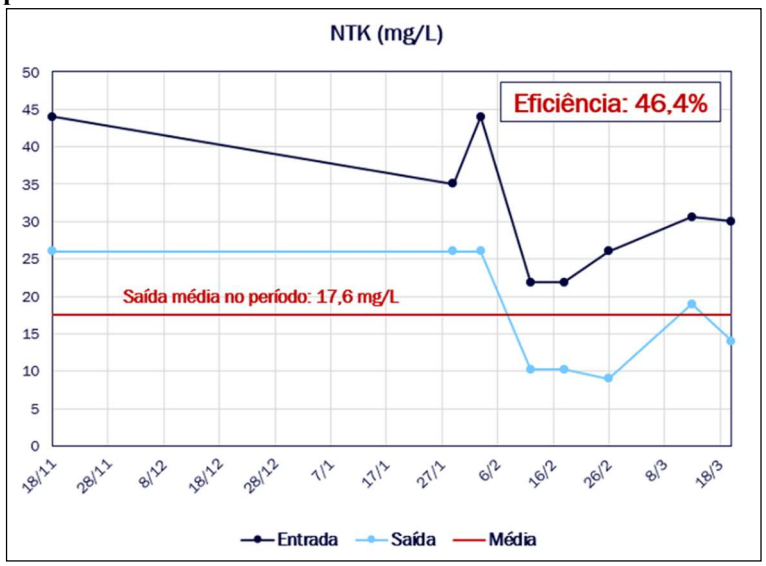
Resultados semelhantes foram relatados por Li *et al.* (2023), que avaliaram sistemas MBBR submetidos a cargas orgânicas próximas de 1,5 kg DQO/m³.d e observaram eficiências de remoção em torno de 80%. A proximidade entre os resultados obtidos neste estudo e os reportados na literatura indica que o sistema apresentou desempenho compatível com o esperado para reatores MBBR operando sob cargas orgânicas moderadas provenientes de esgoto doméstico.

Além disso, a remoção média de 20,8 kg DQO/d demonstra a capacidade do sistema de reduzir a carga orgânica aplicada, mantendo concentrações de efluente inferiores a 132,0 mg DQO/L ao longo de todo o período monitorado.

NITROGÊNIO

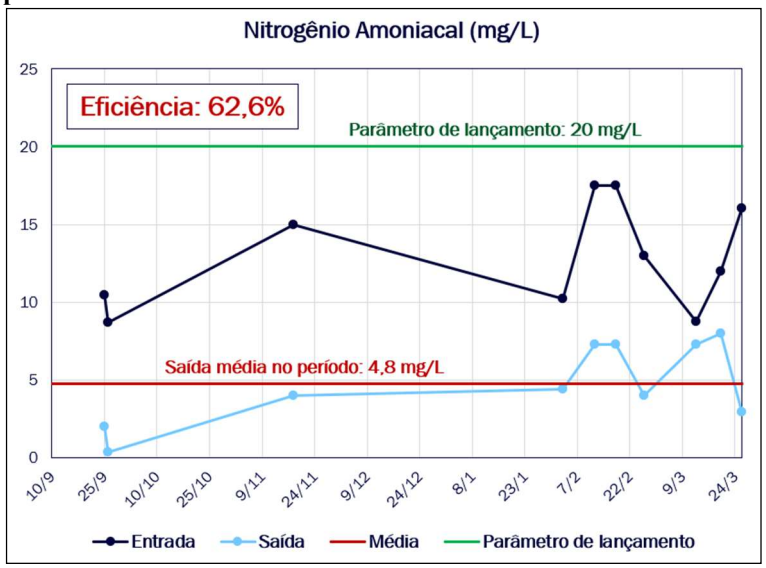
A planta piloto não foi concebida com o objetivo de remover NTK e N-NH_4. Ainda assim, foram observadas remoções parciais desses parâmetros, conforme apresentado na Figura 13 e na Figura 14, respectivamente.

Figura 13 - Evolução temporal das concentrações de NTK (afluente e efluente) durante os testes de performance



Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 14 - Evolução temporal das concentrações de N-NH_4 (afluente e efluente) durante os testes de performance



Fonte: elaborada pelos autores.

De acordo com a Figura 13 e a Figura 14, as concentrações afluentes de NTK variaram entre 21,8 e 44,0 mg/L ao longo do período de monitoramento, com valor médio de 31,7 ± 8,8 mg NTK/L. As concentrações efluentes variaram entre 9,0 e 26,0 mg NTK/L, com média de 17,5 ± 7,7 mg NTK/L. A eficiência média de remoção de NTK foi de 46,4 ± 12,3%.

Com base na vazão média observada durante o período de testes (de 1,0 L/s) e nas concentrações médias, foi possível estimar as cargas associadas à variável NTK:

- Carga média de entrada: 2,7 kg NTK/d;
- Carga média de saída: 1,5 kg NTK/d;
- Carga removida média: 1,2 kg NTK/d.

Para o N-NH_4, as concentrações afluentes variaram entre 8,7 e 17,5 mg N-NH_4/L, apresentando valor médio de 12,9 ± 3,4 mg/L. As concentrações efluentes variaram de 0,4 a 8,0 mg N-NH_4/L, com média de 4,8 ± 2,6 mg N-NH_4/L. A eficiência média de remoção foi de 62,5 ± 23,6%.

Considerando a mesma vazão média, foram estimadas as seguintes cargas associadas ao nitrogênio amoniacal:

- Carga média de entrada: 1,1 kg N-NH_4/d;
- Carga média de saída: 0,4 kg N-NH_4/d;
- Carga removida média: 0,7 kg N-NH_4/d.

Observa-se que a eficiência média de remoção de N-NH_4 foi superior à de NTK. Considerando que o NTK corresponde à soma do nitrogênio amoniacal e do nitrogênio orgânico, esse comportamento indica que parte do nitrogênio amoniacal afluente foi convertida em formas oxidadas de nitrogênio ao longo do tratamento, além da parcela removida por assimilação biológica durante o crescimento da biomassa.

Embora a unidade não tenha sido concebida especificamente para a remoção biológica de nitrogênio, os resultados indicam a ocorrência de transformações de compostos nitrogenados no interior do reator. A diferença observada entre as eficiências de remoção de NTK e de N-NH_4 é compatível com a ocorrência de nitrificação parcial associada à assimilação de nitrogênio pela biomassa aderida às biomídias (ØDEGAARD *et al.*, 1994; ØDEGAARD, 1999).

Adicionalmente, todas as concentrações de efluentes de N-NH_4 permaneceram inferiores a 20,0 mg N-NH_4/L, atendendo ao padrão de lançamento estabelecido pela Resolução CONAMA nº 430/2011 durante todo o período monitorado.

CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os valores medidos em campo do consumo de energia elétrica são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Medição de consumo energético na ETE Compacta

Data	Hora da medição	Medição (kWh)	Tempo decorrido (horas)	Potência consumida no período (kW)	Consumo diário estimado (kWh/dia)
19/mar	17:32	2,78	0	-	-
23/mar	09:55	184,67	88,38	2,06	49,39
24/mar	11:40	240,64	25,75	2,17	52,17
25/mar	08:09	286,42	20,48	2,23	53,64
27/mar	11:17	403,01	51,13	2,28	54,72
31/mar	11:23	609,11	96,1	2,14	51,47

Fonte: elaborada pelos autores.

O consumo médio diário foi de 52,28 kWh/d. Em projeto, a unidade previa um consumo energético de 0,49 kWh/m³ de esgoto, indicando que o valor verificado em campo está próximo do esperado.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Tabela 6, apresenta-se a comparação do desempenho de sistemas de MBBR em termos de remoção de matéria orgânica e de nitrogênio.

Tabela 6 - Comparação do desempenho de sistemas MBBR reportados na literatura para tratamento de esgoto doméstico e municipal, com ênfase na remoção de matéria orgânica e compostos nitrogenados

Estudo	Tipo de efluente	Configuração	TDH (h)	Efic. DBO_5 (%)	Efic. DQO (%)	Efic. NH_4 (%)	Efic. NTK ou NT (%)
Estudo Atual	Esgoto doméstico municipal (Brasil)	MBBR aeróbio compacto	3,4	84,5	75,8	62,6	46,4
Javid *et al.* (2013)	Esgoto municipal (piloto)	MBBR aeróbio	1–4	88,0	N.R.	N.R.	N.R.
Abdul-Majeed *et al.* (2012)	Esgoto doméstico municipal	MBBR aeróbio	N.R.	78,0	N.R.	N.R.	N.R.
Nhut *et al.* (2020)	Esgoto doméstico (lab)	S-MBBR (esponja)	N.R.	N.R.	85,0	N.R.	68,9 (NT)
Jabri *et al.* (2019)	Água cinza	MBBR multiestágio	N.R.	99,0	93,0	89,0	N.R.
Lei & Gao (2021)	Esgoto doméstico simulado	MBBR (carvão bambu)	4,0	N.R.	83	77,00	48 (NT)

Notas:
N.R. = não reportado. Afl. = Afluente; Efl. = Efluente; Efic. = Eficiência; S-MBBR = *Sponge*-MBBR; MBBR = *Moving Bed Biofilm Reactor*; NT = Nitrogênio Total; NTK = Nitrogênio Total Kjeldahl.
Fonte: elaborada pelos autores.

MATÉRIA ORGÂNICA

Os resultados apresentados na Tabela 6 demonstram que a ETE Compacta avaliada apresentou eficiência média de remoção de 84,5 ± 14,1% para DBO_5 e de 75,8 ± 13,4% para DQO. Adicionalmente, a concentração média de DBO_5 no efluente foi de 20,4 ± 14,3 mg/L, permanecendo abaixo de 60,0 mg DBO_5/L durante todo o período monitorado. Esse valor corresponde à meta de qualidade adotada para o sistema e é compatível com os requisitos normalmente associados à proteção de corpos receptores enquadrados na Classe 3, conforme os critérios de enquadramento estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

Para DBO_5, a eficiência observada foi próxima à reportada por Javid *et al.* (2013), que obtiveram remoção média de aproximadamente 88,0% em reatores MBBR submetidos a cargas orgânicas entre 0,73 e 3,48 kg DBO_5/m^3.d. Da mesma forma, Abdul-Majeed *et al.* (2012) reportaram eficiência de remoção de 78,0%, valor inferior ao obtido no presente estudo.

Para DQO, a eficiência média observada foi de 75,8 ± 13,4%, enquanto Nhut *et al.* (2020) reportaram remoção de 85,0 ± 12,9% em um sistema S-MBBR tratando esgoto doméstico com concentração afluente de aproximadamente 300 mg DQO/L. Lei e Gao (2021) observaram remoção de 83,0% em sistema MBBR operado com TDH de 4 h e afluente sintético com concentração de DQO de 200 mg/L.

NITROGÊNIO

Para $N\text{-}NH_4$, a ETE Compacta apresentou eficiência média de remoção de 62,5 ± 23,6%, com concentração média no efluente de 4,8 ± 2,6 mg $N\text{-}NH_4$/L. Cabe destacar que a ETE Compacta avaliada não foi concebida com o objetivo de promover remoção biológica avançada de nitrogênio. Além disso, as concentrações afluentes de $N\text{-}NH_4$ observadas durante o período de monitoramento apresentaram média de 12,9 ± 3,4 mg $N\text{-}NH_4$/L, inferior ao limite de lançamento de 20,0 mg $N\text{-}NH_4$/L estabelecido pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (BRASIL, 2011). Dessa forma, sob a perspectiva do atendimento aos padrões de lançamento, o afluente à ETE Compacta não exigia remoção adicional de nitrogênio amoniacal. Ainda assim, o sistema reduziu a concentração média para 4,8 ± 2,6 mg $N\text{-}NH_4$/L, o que corresponde a uma eficiência média de remoção de 62,5 ± 23,6%.

Para NTK, a eficiência média observada neste estudo foi de 46,4 ± 12,3%. Esse valor foi próximo ao reportado por Lei e Gao (2021), que relataram remoção de 48,0% de nitrogênio total.

CONSUMO ENERGÉTICO

Como mencionado no tópico anterior, o consumo específico observado neste estudo foi de 0,5 kWh/m³, associado a um consumo médio diário de 52,3 kWh/d. Ao comparar esse resultado com a faixa de consumo energético reportada por Longo *et al.* (2016), de 0,3 a 0,6 kWh/m³ para processos biológicos com biofilme, observa-se que o valor obtido neste estudo está dentro desse intervalo. Segundo Longo *et al.* (2016), a aeração representa entre 45% e 75% do consumo energético total desses sistemas.

De forma geral, os resultados indicam que o consumo energético da ETE Compacta é compatível com os valores reportados para sistemas MBBR destinados ao tratamento de esgoto sanitário. As diferenças observadas entre os estudos podem estar relacionadas às distintas escalas de operação, às configurações de processo, às estratégias de aeração, às condições climáticas e às características do afluente tratado. Considerando a vazão média de aproximadamente 1 L/s e a configuração compacta da unidade avaliada, o consumo específico de 0,5 kWh/m³ mostrou-se consistente com a faixa de valores reportada na literatura para sistemas baseados em biofilme.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A ETE Compacta baseada na tecnologia MBBR apresentou desempenho consistente no tratamento de esgoto doméstico em escala real, alcançando eficiências médias de remoção de 84,5% para DBO_5 e 75,8% para DQO, com concentrações efluentes compatíveis com os padrões de lançamento aplicáveis. Embora não tenha sido concebido especificamente para remoção de nitrogênio, o sistema promoveu remoções médias de 62,5% para $N\text{-}NH_4$ e 46,4% para NTK, evidenciando a ocorrência de nitrificação parcial durante a operação.

A formação e estabilização do biofilme nas biomídias, associadas à adequada distribuição dos suportes móveis e às condições de aeração observadas, contribuíram para a estabilidade operacional do sistema ao longo do período monitorado. Adicionalmente, o consumo energético verificado mostrou-se compatível com a faixa reportada na literatura para sistemas MBBR aplicados ao tratamento de esgoto sanitário.

Os resultados obtidos demonstram o potencial de aplicação de ETEs Compactas baseadas em MBBR como alternativa para o tratamento descentralizado de esgotos sanitários, especialmente em situações que demandam soluções modulares, de rápida implantação e reduzida ocupação de área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. INSTITUTO TRATA BRASIL; GO ASSOCIADOS. *Ranking do saneamento 2026*. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2026. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2026/03/Estudo-da-GO-Associados-Ranking-do-Saneamento-de-2026.pdf. Acesso em: 8 jun. 2026.

2. ABCON; SINDCON. Panorama da Participação Privada no Saneamento 2022. São Paulo: Associação Brasileira das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto, 2022.

3. BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 jul. 2020.

4. MASSOUD, M.A.; TARHINI, A.; NASR, J.A. *Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries. Journal of Environmental Management*, v. 90, n. 1, p. 652-659, 2009.

5. PATIL, Y.M.; MUNAVALLI, G.R. *Performance evaluation of an integrated on-site greywater treatment system in a tropical region. Ecological Engineering*, v. 95, p. 492-500, 2020.

6. ØDEGAARD, H. The Moving Bed Biofilm Reactor. *In:* IGARASHI, T.; WATANABE, Y.; ASANO, T.; TAMBO, N. Water Environmental Engineering and Reuse of Water. Hokkaido: Hokkaido Press p. 250–305, 1999.

7. ØDEGAARD, H.; RUSTEN, B.; WESTRUM, T. *A new moving bed biofilm reactor – applications and results. Water Science and Technology*, v. 29, n. 10-11, p. 157-165, 1994.

8. XIAO, Z. W.; HE, J.; QI, N.; WEN, J. P.; CHEN, X. B.; WANG, C. X. *The Modular Design Concept of Decentralized Sewage Reuse Equipment and its Application. Advanced Materials Research*, pp. 3323–3330, 2014.

9. RIBEIRO, J. C.; SILVA, G. H. R. *Acompanhamento operacional e avaliação de uma estação compacta de tratamento de esgoto sanitário: reator UASB seguido de filtro aerado submerso. Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p. 27–31, jan./fev. 2018.

10. APHA. STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. 24. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2023.

11. CHEN, G., NG, W. J., OZAKI, H., & TERASHIMA, Y. *Determination of Dissolved oxygen limitation in aerobic biofilm reactors. Resources, Conservation and Recycling*, v. 11, 37-81, 1993.

12. CHAI, J.; WANG, Y. *Influence of nitrogenous compound concentration in simulated coal processing wastewater on nitrogenous pollutant removal in moving bed biofilm reactors under different dissolved oxygen concentrations. Desalination and Water Treatment*, v. 165, 45-53 p., 2019.

13. SCHOPF, A.; DELATOLLA, R.; KIRKWOOD, K. M. *Partial nitritation at elevated loading rates: design curves and biofilm characteristics. Bioprocess and Biosystems Engineering*. Springer, 2019.

14. JAVID, A. H.; HASSANI, A. H.; GHANBARI, B.; YAGHMAEIAN, K. *Feasibility of utilizing moving bed biofilm reactor to upgrade and retrofit municipal wastewater treatment plants. International Journal of Environmental Research*, v. 7, n. 4, p. 963–972, 2013.

15. NHUT, HUYNH TAN; HUNG, NGUYEN TRI QUANG; SAC, TRAN CONG; BANG, NGUYEN HUYNH KHANH; TRI, TRAN QUANG; HIEP, NGUYEN TRUNG; KY, NGUYEN MINH. *Removal of nutrients and organic pollutants from domestic wastewater treatment by sponge-based moving bed biofilm reactor. Environmental Engineering Research*, v. 25, n. 5, p. 652–658, 2020. DOI: 10.4491/eer.2019.285.

16. LI, MIAOJIE; LIU, YONGHONG; ZHOU, XIAODE; WANG, NING; YUAN, BO. *A study on the carriers compound multi-stage MBBR biological treatment process for domestic sewage. Sustainability*, Basel, v. 15, n. 10, p. 7922, 2023. DOI: 10.3390/su15107922.

17. ABDUL-MAJEED, A. M. *Treatment of domestic wastewater using moving bed biofilm reactor (MBBR) technology. Journal of Engineering, Baghdad*, v. 18, n. 11, p. 1316–1331, 2012.

18. JABRI, KHAOULA MASMOUDI; FIEDLER, THORSTEN; SAIDI, ASSIA; NOLDE, ERWIN; OGUREK, MICHAEL; GEISSEN, SVEN-UWE; BOUSSELMI, LATIFA**.** *Steady-state modeling of the biodegradation performance of a multistage moving bed biofilm reactor (MBBR) used for on-site greywater treatment. Environmental Science and Pollution Research*, Heidelberg, v. 26, n. 11, p. 10947–10962, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-018-3984-9

19. LEI, T.; GAO, X. *Fabrication of low-moisture density bamboo charcoal moving biofilm reactor and removal performance in domestic sewage treatment. Desalination and Water Treatment*, v. 212, p. 103–111, 2021. DOI: 10.5004/dwt.2021.26621.

20. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357/2005. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 16 maio 2011.

21. BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 18 mar. 2005.

22. LONGO, STEFANO; D'ANTONI, BENEDETTO MIRKO; BONGARDS, MICHAEL; CHAPARRO, ANTONIO; CRONRATH, ANDREAS; TOTARO, FRANCESCO; LEMA, JUAN M.; MAURICIO-IGLESIAS, MIGUEL; SOARES, ANA; HOSPIDO, ALMUDENA. *Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants: a state of the art and proposals for improvement. Applied Energy*, v. 179, p. 1251–1268, 2016. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.043.