

II-1175 - BIORREATOR COMBINADO ANAERÓBIO-AERÓBIO DE BIOFILME - RESULTADOS EM ESCALA PLENA

Moacir Messias de Araujo Jr.⁽¹⁾

Graduado em Engenharia Civil pela EESC-USP (2002), Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP (2006), pesquisador de pós-doutorado no Laboratório de Processos Biológicos da EESC-USP (2011-2015) e atual Diretor Comercial e de Tecnologia na Bioproj Tecnologia Ambiental. Experiência consolidada no desenvolvimento e aplicação de tecnologias para processos de tratamento de águas residuárias. Responsável pelo projeto e implementação de diversas estações de tratamento de esgoto no Brasil.

Philippe Lopes da Silva Araujo

Graduado em engenharia civil pela Universidade Estadual Paulista - UNESP (2006) e atual Diretor de Engenharia na Bioproj Tecnologia Ambiental. Possui experiência consolidada em operação e construção de sistemas de coleta e tratamento de esgoto sanitário, distribuição e tratamento de água potável.

Alessandro Daré Oliva

Graduado em licenciatura plena e bacharelado com atribuições tecnológicas em Química Industrial pela Universidade do Sagrado Coração USQ (2001) e atual Analista Técnico na Bioproj Tecnologia Ambiental. Possui experiência no planejamento de partida, comissionamento de processo e operação de plantas de tratamento de águas residuárias, com foco na implementação de análises laboratoriais para controle operacional e monitoramento da qualidade de tratamento das ETEs.

Endereço⁽¹⁾: Rua XV de Novembro, 656 - Pq. Santa Mônica - São Carlos - SP - CEP: 13261-206 - Brasil - Tel: +55 (16) 3416-7110 - e-mail: moacir@bioproj.com.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta os resultados da operação em escala plena de reator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo, utilizando Biobob[®] como meio suporte para adesão da biomassa. O Biorreator Combinado (BRC) possuía volume útil total de 600 m³, sendo 240 m³ para a zona anaeróbia e 360 m³ para a zona aeróbia. O decantador secundário de alta taxa, localizado na parte central superior do reator, possuía área de 18 m² e volume útil de 69 m³. No período monitorado (251 dias), os valores médios afluentes de DQO, DBO e SST foram de 596 ± 270 mg/L, 212 ± 127 mg/L e 256 ± 150 mg/L. Mesmo com muitas variações de vazão e carga aplicadas ao sistema, o BRC apresentou eficiências de remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos muito satisfatórias ao longo de todo o período operacional, mantendo as concentrações de DQO, DBO e SST no efluente tratado abaixo dos níveis exigidos pela legislação ambiental, com valores médios de 53 ± 45 mg/L, 20 ± 9 mg/L e 14 ± 12 mg/L, respectivamente. Com os resultados apresentados, pode-se concluir que o biorreator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo com Biobob[®] é uma alternativa viável para a substituição das tecnologias convencionais de tratamento de esgoto, pois consegue agregar as vantagens operacionais dos processos anaeróbio e aeróbio em reator único e compacto, mantendo as concentrações de DBO e SST no efluente tratado abaixo dos níveis exigidos pela legislação, além de produzir significativamente menos lodo e não emitir gases geradores de maus odores.

PALAVRAS-CHAVE: Biorreator Combinado, Leito Fixo, Reator Anaeróbio-Aeróbio, Biobob.

INTRODUÇÃO

O tratamento de esgoto sanitário é um grande desafio, atualmente no Brasil, dado o crescimento populacional, a falta de infraestrutura em saneamento, o custo operacional e de implementação das plantas, juntamente ao atendimento à legislação ambiental. O que pode ser comprovado, através da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2017 (IBGE 2020), a qual mostrou que somente 60,3% dos municípios brasileiros possuem rede coletora de esgotos sanitários. Considerando o volume total de esgoto gerado, apenas 67% é efetivamente coletado e 51,6% é encaminhado para algum tipo de tratamento de esgoto.

Historicamente, o tratamento de esgoto sanitário tem sido realizado por processo aeróbio. Desde o ano de 1960, os sistemas de lodos ativados convencionais e por aeração prolongada foram amplamente utilizados nas estações de

tratamento de esgoto (ETE) brasileiras. Entretanto, apesar da excelente qualidade do efluente final, o tamanho das plantas, a necessidade de uma unidade posterior para separação da biomassa, a grande quantidade de lodo produzido e o elevado gasto energético para aeração determinaram a busca por outros processos de tratamento.

O desenvolvimento de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB), operados com elevado tempo de retenção celular e baixo tempo de detenção hidráulica, revolucionaram o tratamento de águas residuárias industriais e de esgoto sanitário (Lettinga et al., 1980). O uso desses, para o tratamento de efluentes sanitário, têm-se mostrado economicamente vantajoso, devido à simplicidade operacional e o reduzido gasto energético, principalmente em regiões tropicais e subtropicais onde a temperatura ambiente favorece a digestão anaeróbia. O Brasil é um exemplo mundial de utilização destes reatores para o tratamento de esgoto sanitário, com várias plantas em escala plena implementadas e em operação a décadas.

Aliados às grandes vantagens da tecnologia UASB, outros modelos de reatores foram desenvolvidos para o tratamento de esgoto sanitário nas ETES. As novas configurações investiram na redução dos custos de operação e implantação, juntamente à minimização dos problemas operacionais relacionados à manta de lodo dos reatores anaeróbios. Um desses modelos é o reator anaeróbio híbrido (HANR), que se define por apresentar uma camada de material suporte (Biobob[®]) posicionada entre a manta de lodo e o separador trifásico, caracterizando um reator composto pela biomassa suspensa (manta de lodo) e biomassa fixa (leito de Biobob[®]).

O material suporte Biobob[®] é constituído por uma matriz de espuma de PU envolta por estrutura externa rígida de polipropileno para a adesão de biomassa microbiana. O uso dessa tecnologia maximiza a concentração de biomassa na área de reação, melhora o desempenho e permite velocidades ascensionais elevadas em reatores mais compactos (Araujo, 2014).

O Biobob[®] dispõe de várias vantagens em relação aos outros tipos de suportes disponíveis no mercado, como: capacidade de reter alta quantidade de biomassa sem prejuízo à hidrodinâmica do reator, aumentando substancialmente a eficiência do sistema; proporcionar, simultaneamente, alta porosidade do leito reacional, evitando o acúmulo excessivo de biomassa; não necessitar de lavagens para remover o excesso de biofilme formado; e conter baixa compressibilidade e alta resistência mecânica, o que possibilita a utilização em plantas em escala plena.

Apesar das expressivas vantagens e avanços da tecnologia anaeróbia, sistemas de pós-tratamento para remoção de matéria orgânica remanescente e nitrogênio amoniacal são indispensáveis para obtenção de efluente líquido final de qualidade para atendimento aos requisitos da legislação ambiental. Outro fator limitante para a utilização de reatores anaeróbios em centros urbanos é a geração de odores desagradáveis, presentes no biogás. Esta produção de maus odores tem causado grande impacto social na maioria das cidades que usam esta tecnologia, inviabilizando muitas vezes a sua utilização.

Neste contexto, visando unir a necessidade de atendimento aos requisitos restritivos da legislação ambiental em relação à qualidade do efluente com às novas demandas da agenda ESG (*environmental, social and governance*) assumidas pelas concessionárias de água e esgoto, desenvolveu-se a aplicação do reator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo (BRC). O reator é caracterizado por ser de fluxo ascendente, com a etapa anaeróbia na parte inferior sobreposta pela etapa aeróbia. Essa tecnologia possibilita a construção de estações mais compactas (verticalizadas), com custos de implantação e operação significativamente menores do que as configurações convencionais (UASB + Lodos Ativados). Outro fator importante é a oxidação na etapa aeróbia dos gases odoríferos gerados na etapa anaeróbia, anteriormente ao lançamento na atmosfera.

Assim, o presente trabalho apresenta os resultados operacionais de um reator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo no tratamento de esgoto sanitário em escala plena. Como poderá ser observado na discussão dos resultados, este sistema se coloca como alternativa viável ao mercado de saneamento pela capacidade garantir alta qualidade do efluente tratado com reduzido consumo energético e baixa produção de lodo.

METODOLOGIA

A pesquisa baseou-se no monitoramento operacional e analítico de Estação de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) implementada no interior do estado de São Paulo, a qual foi monitorado por 251 dias, desde sua partida. A principal rota de tratamento da unidade é o biorreator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo (BRC), o qual foi projetado para atender a uma vazão nominal média de 25 L/s.

A vista em perspectiva da ETE é apresentada na Figura 1, sendo as principais operações unitárias descritas a seguir:

- Tratamento preliminar mecanizado com peneira rotativa (#3mm), caixa de areia aerada e remoção de gordura;
- Elevatória de esgoto pré-tratado (EEE Pré-Tratado);
- Reator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo
- Decantador de alta taxa (interno ao reator);
- Tanque de lodo descartado (desidratação de lodo ocorre em outra unidade);
- Tanque de contato para desinfecção por hipoclorito de sódio.

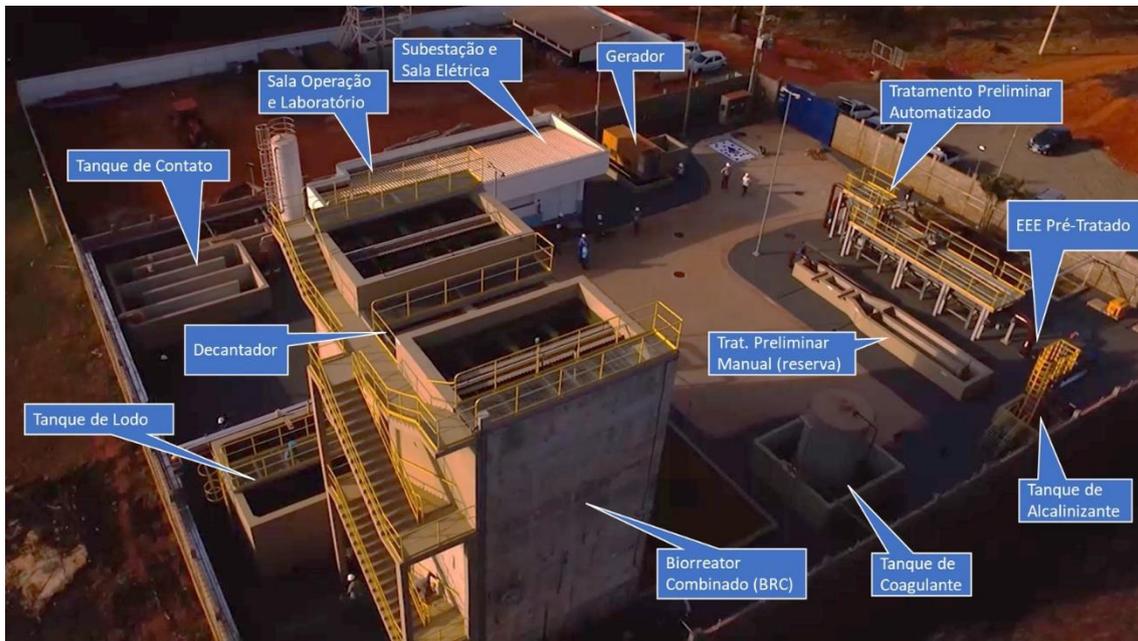


Figura 1 – Vista em perspectiva da ETE

O Biorreator Combinado (BRC) possuía dimensão total externa de 12,80 m x 6,80 m, com altura total de 12,05 m. Os volumes úteis dos reatores anaeróbio e aeróbio eram, respectivamente, 240 m³ e 360 m³. Em ambos os reatores foram utilizados Biobob® como meio suporte para adesão da biomassa, 100 m³ no reator anaeróbio e 180 m³ no reator aeróbio. O decantador secundário de alta taxa, localizado na parte central superior do reator, possuía dimensão interna de 3,00 m x 6,00 m (18 m²) com volume útil de 69 m³. Na Figura 2 é apresentado um corte transversal do Biorreator Combinado (BRC) em que se pode visualizar as diferentes zonas internas do reator.

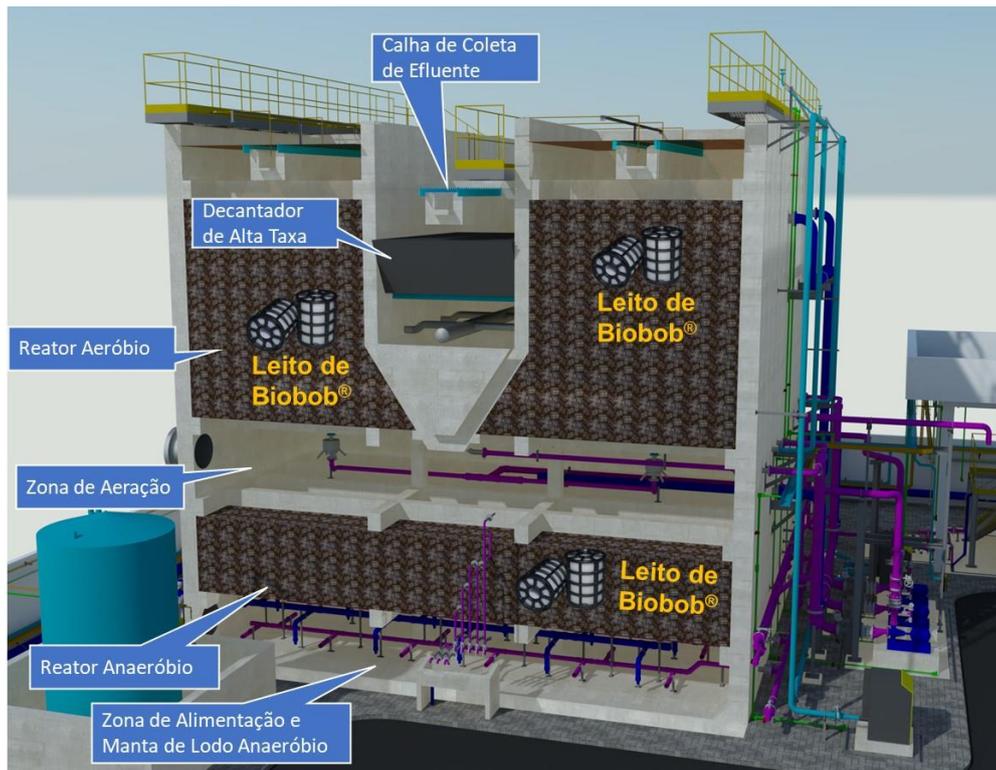


Figura 2 – Corte transversal do Biorreator Combinado (BRC)

Na Figura 3 é apresentada a vista frontal do BRC, sendo possível observar os equipamentos e tubulações utilizados no sistema de tratamento.



Figura 3 – Vista Frontal do Biorreator Combinado (BRC)

Amostras compostas da entrada (P1) e da saída (P2) do reator biológico foram coletadas continuamente por sistema de bombeamento, onde as vazões de coleta eram balanceadas conforme a variação da vazão de tratamento da estação (intertravadas pelo CLP). Assim, essas amostras representavam de forma muito próxima a média diária ao longo das 24 h de operação.

O sistema foi monitorado diariamente pela operação da planta, com análises das amostras no laboratório interno da ETE, conforme parâmetros e frequência descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros analisados, frequência de amostragem e método analítico.

Parâmetros	Unidade	Método	Referência do Método	Tipo de Amostragem	Esgoto P 1	Efluente P2	Reator P 3	Frequência
Vazão de esgoto	m ³ /d	Medidor Magnético	-	On-line (CLP)	-	✓	-	Contínua
DQO	mg O ₂ /L	Espectrofotométrico	SMEWW Method 5220	composta 24h	✓	✓	-	5x por semana
DQO Filtrada	mg O ₂ /L	Espectrofotométrico	SMEWW Method 5220	composta 24h	✓	✓	-	5x por semana
SST	mg/L	Gravimétrico	SMEWW Method 2540	composta 24h	✓	✓	-	5x por semana
Temperatura	°C	Termométrico	-	Pontual	-	-	✓	diária
pH	pH	Potenciométrico	-	composta 24h	✓	✓	-	5x por semana
Oxigênio Dissolvido	mg O ₂ /L	Sonda	-	On-line (CLP)	-	-	✓	Contínua

SMEWW: Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 2017, 23th ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environmental Federation, Washington DC, USA.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desde a sua partida, a planta foi monitorada por 251 dias ininterruptos, com temperatura média medida no reator biológico de o efluente de $29,5 \pm 1,3$ °C, tendo mínima de 26,0°C e máxima de 31,4°C no período.

A partida foi realizada sem a inoculação dos biorreatores com biomassa proveniente de outras estações, sendo assim colonizados naturalmente pelos microrganismos presentes no esgoto afluente. Para tanto, durante os primeiros 60 dias de operação (Etapa 1), os reatores biológicos foram alimentados com baixas vazões afluentes, com tempo de detenção hidráulica total médio de 25 h, criando ambiente propício para a colonização natural da biomassa anaeróbica e aeróbica. Após este período, como observado no gráfico (Figura 4), iniciou-se uma rampa de alimentação com o aumento da vazão de esgoto bruto e consequente aumento da carga aplicada ao sistema e diminuição do TDH dos reatores (Etapas 2 e 3).

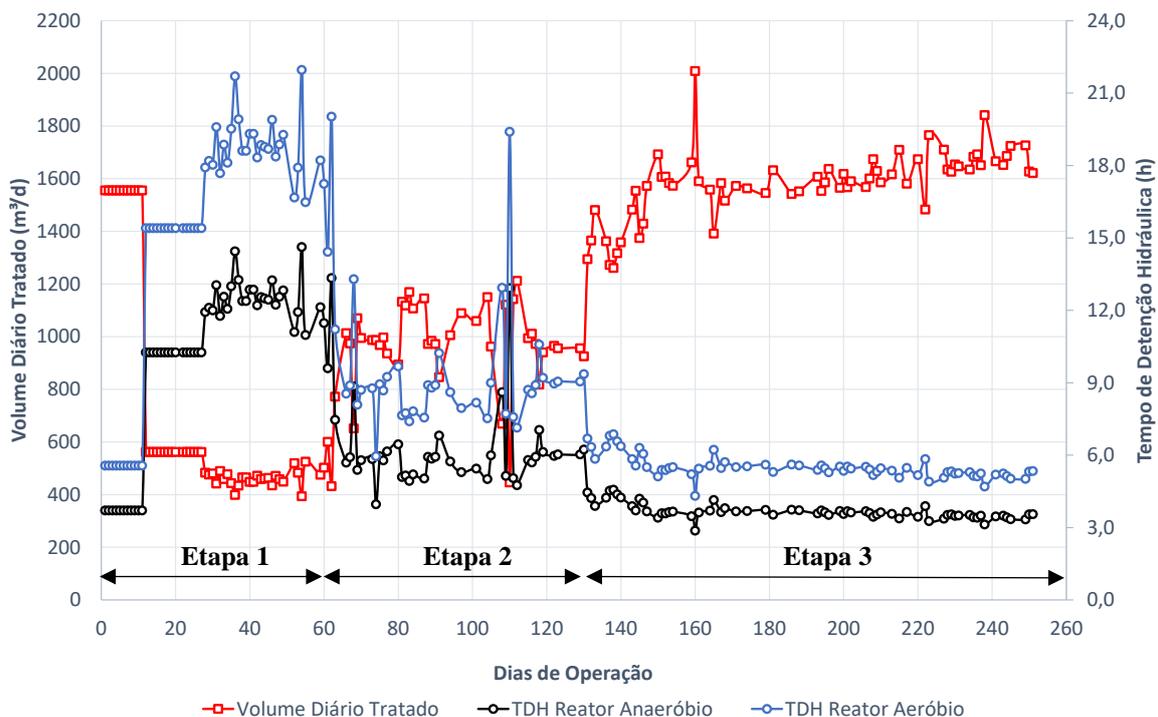


Figura 4 – Variação da vazão afluente de esgoto e do TDH em cada zona de tratamento do Biorreator Combinado (reator anaeróbico e reator aeróbico).

Mesmo com as variações de vazão e cargas aplicadas ao sistema, o Biorreator Combinado apresentou altas eficiências de remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos ao longo de todo o período operacional (Figura 5), mantendo os valores de DQO, DBO e SST no efluente tratado abaixo dos níveis exigidos pela legislação (DBO < 60 mg/L e SST < 40 mg/L), com valores médios de 53 ± 45 mg/L, 20 ± 9 mg/L e 14 ± 12 mg/L, respectivamente. No período monitorado (251 dias), os valores médios afluentes de DQO, DBO e SST foram de 596 ± 270 mg/L, 212 ± 127 mg/L e 256 ± 150 mg/L (Figuras 6, 7 e 8).

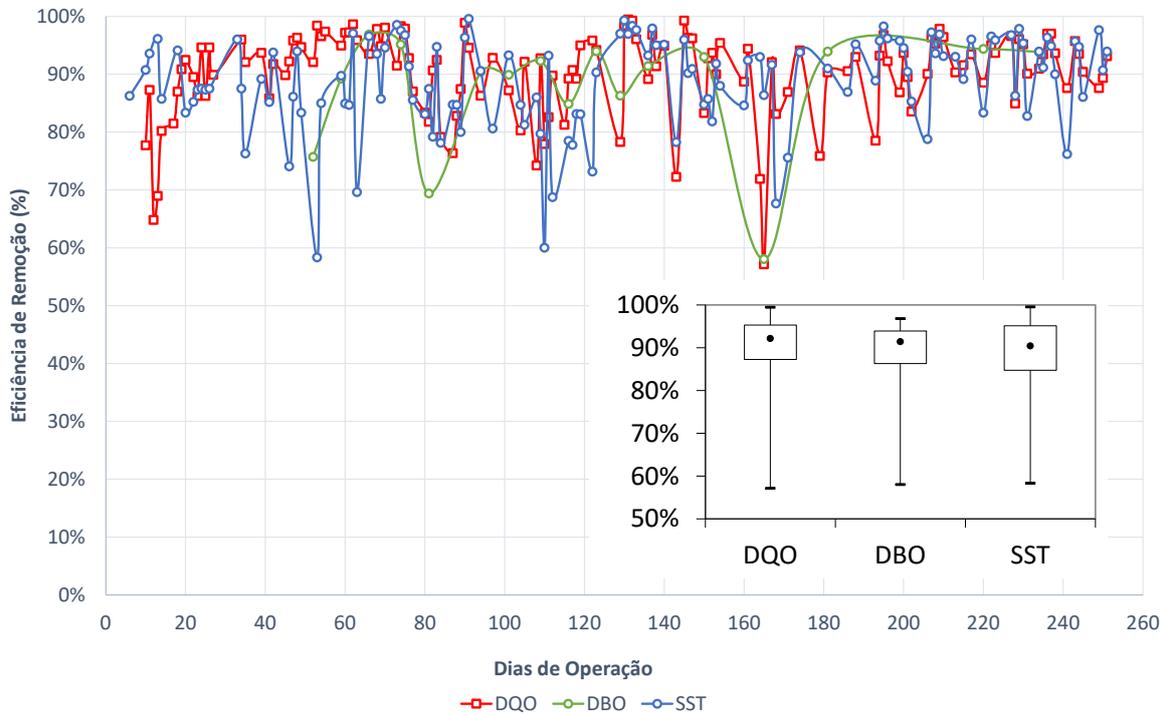


Figura 5 – Eficiência de remoção de DQO, DBO e SST ao longo do tempo de operação. Gráfico box plot mostrando a distribuição estatística de cada parâmetro considerando o período total de operação.

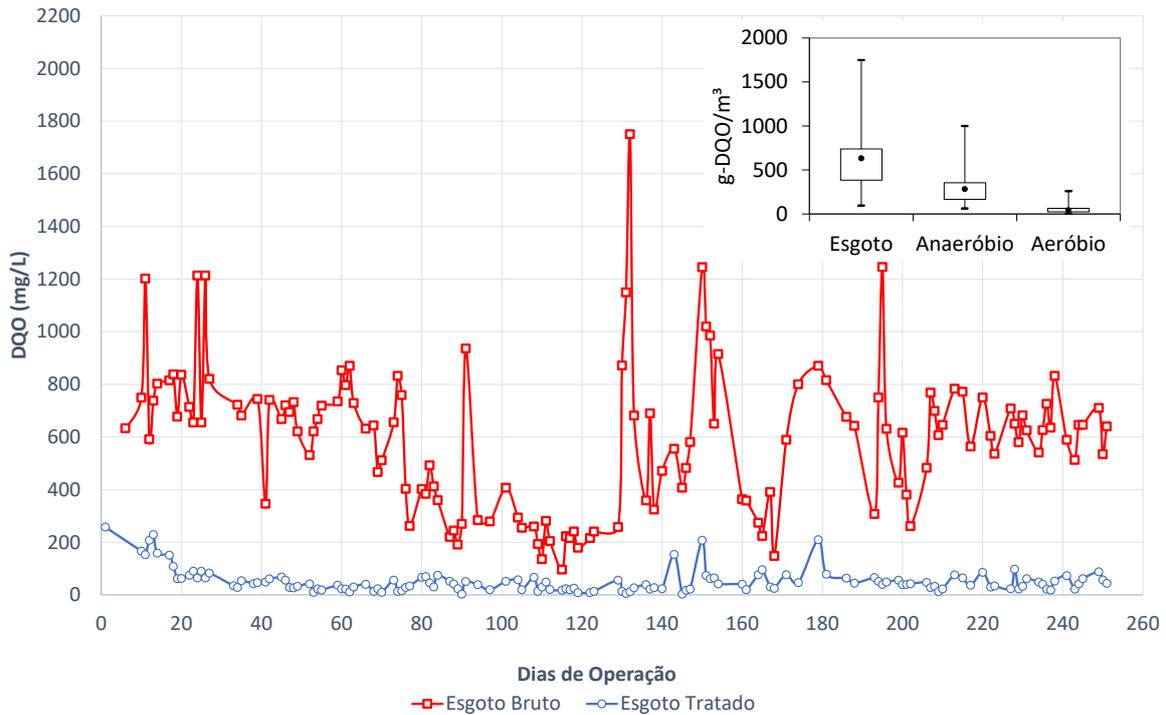


Figura 6 – DQO afluente e efluente ao reator biológico (amostras compostas) ao longo do período operacional. Gráfico box plot mostrando a distribuição estatística do valor de DQO para o esgoto bruto, efluente do reator anaeróbio e efluente do reator aeróbio.

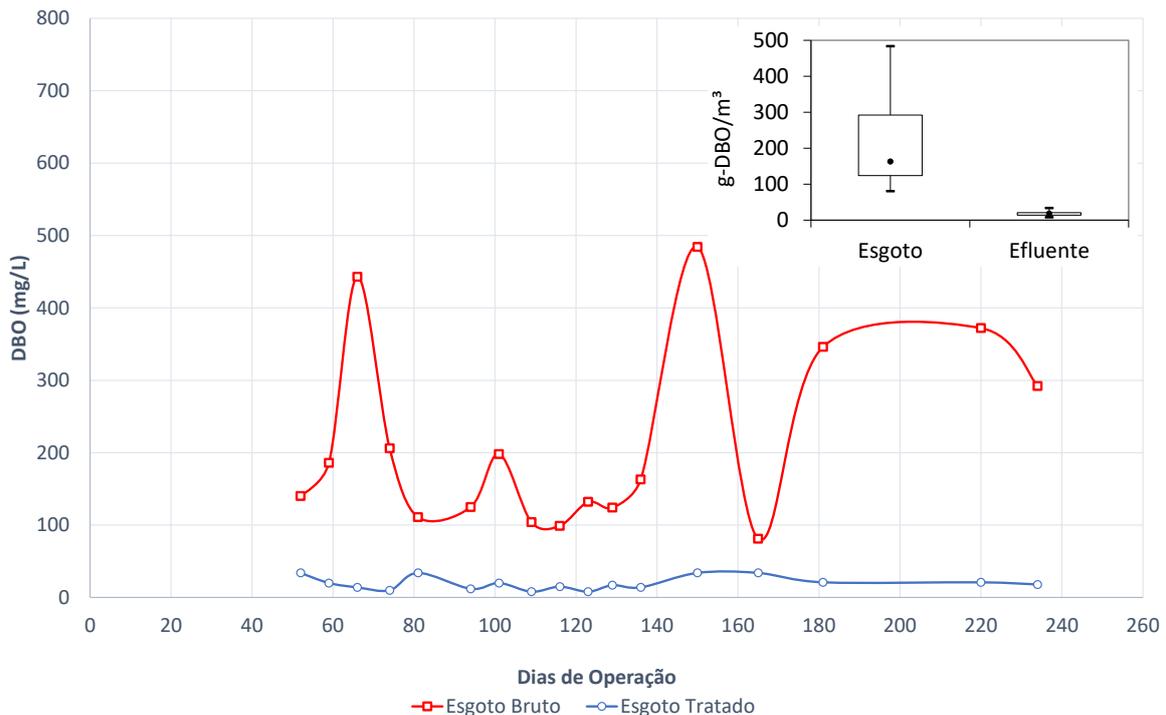


Figura 7 – DBO afluente e efluente ao reator biológico (amostras compostas) ao longo do período operacional. Gráfico box plot mostrando a distribuição estatística do valor de DBO para o esgoto bruto e efluente tratado.

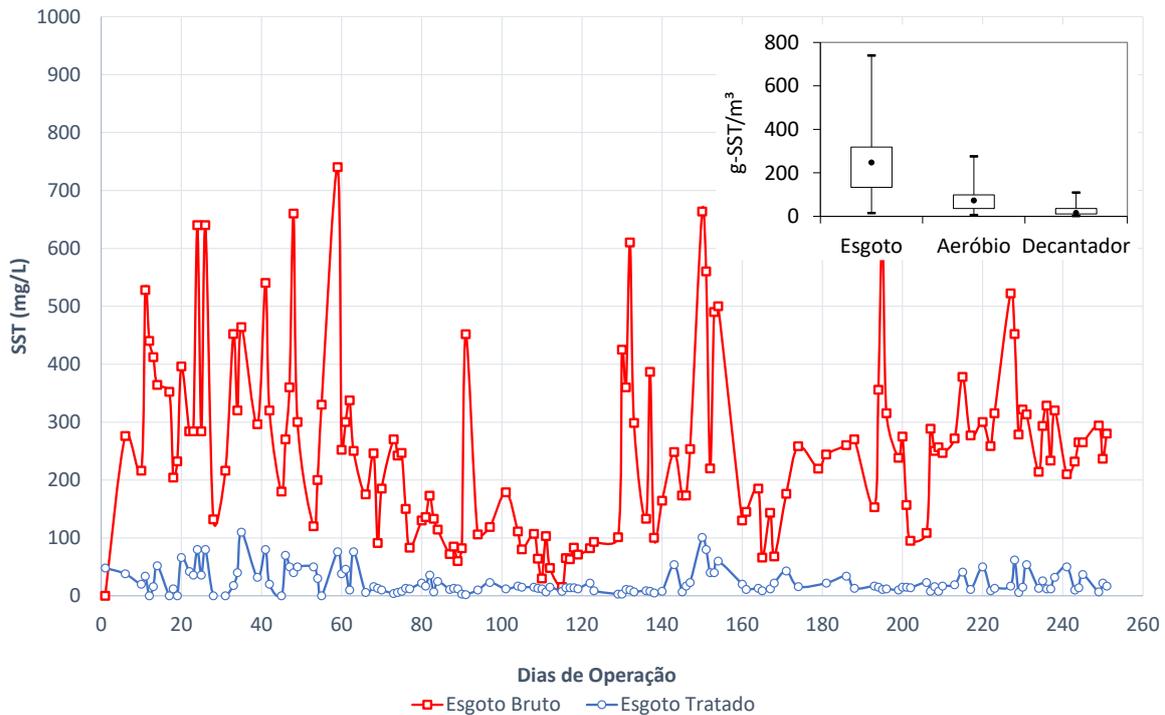


Figura 8 – SST afluyente e efluente ao reator biológico (amostras compostas) ao longo do período operacional. Gráfico box plot mostrando a distribuição estatística do valor de SST para o esgoto bruto, efluente do reator aeróbio e efluente do decantador (efluente tratado).

Plotando-se a carga orgânica volumétrica removida (COV_R [kg/(m³.d)] = carga de DQO removida [kg/d] / volume útil total do reator biológico [m³]) em função da carga orgânica volumétrica aplicada (COV_A [kg/(m³.d)] = carga de DQO aplicada [kg/d] / volume útil total do reator biológico [m³]) obtêm-se a regressão linear ($R^2 = 0,98$) apresentada na Figura 9. Neste gráfico, pode-se observar que a eficiência de remoção de DQO não varia em função da carga aplicada para o range monitorado, sendo a relação COV_R/COV_A constante e igual a 0,91 para cargas aplicadas entre 0,1 a 3,5 kg DQO/(m³.d), o que evidencia a robustez do sistema de tratamento, que mesmo diante de uma grande variação da carga afluyente de DQO, manteve-se com alta eficiência de remoção.

Considerando todo o período operacional, as eficiências médias de remoção de DQO, DBO e SST foram de $90 \pm 7\%$, $88 \pm 10\%$ e $89 \pm 8\%$, respectivamente. Mesmo no período de maior carga aplicada e com menor TDH dos reatores (Etapa 3), a eficiência global do sistema se manteve alta, com valores médios para este período de $90 \pm 7\%$, $88 \pm 11\%$ e $90 \pm 8\%$, respectivamente para remoção de DQO, DBO e SST. Neste período, o tempo de detenção hidráulica médio nos reatores anaeróbio e aeróbio foi de $4,5 \pm 1,5$ h e $6,8 \pm 2,2$ h, na ordem respectiva, obtendo efluente tratado com média de 43 ± 30 mg DQO/L, 19 ± 9 mg DBO/L e 19 ± 16 mg SST/L.

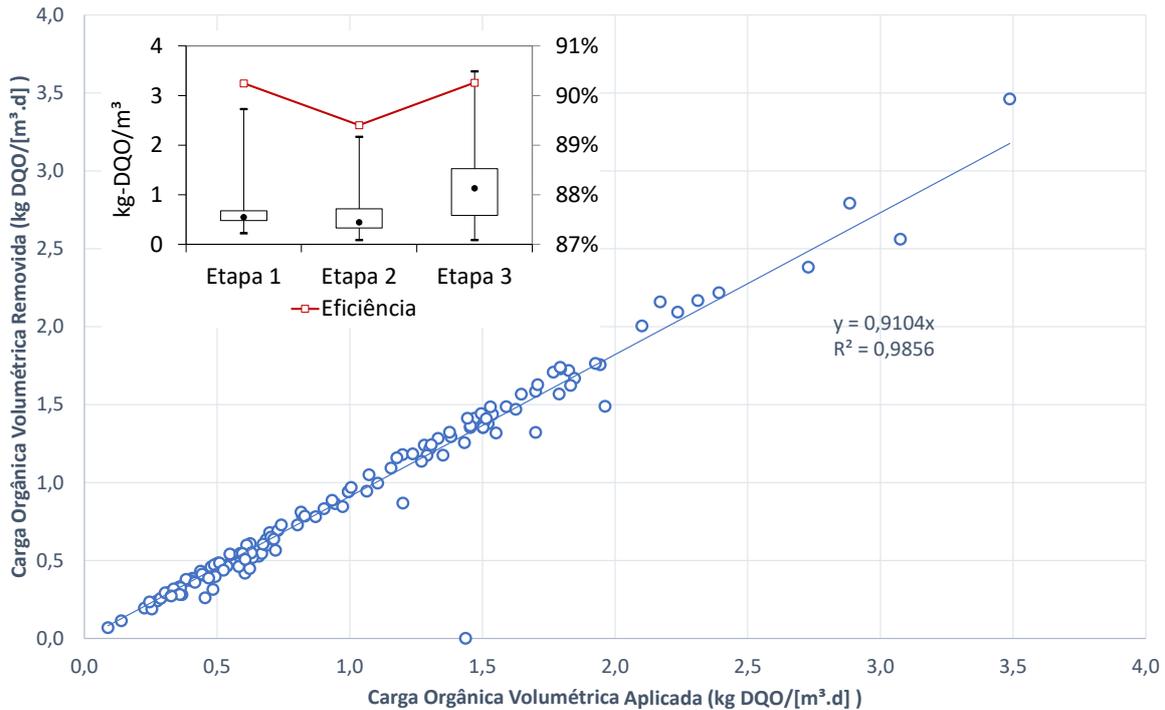


Figura 9 – Carga orgânica volumétrica removida em função da carga orgânica volumétrica aplicada ao Biorreator Combinado. Gráfico Box plot: COV aplicada em cada etapa de operação e respectivas eficiências de remoção de DQO.

Durante todo o período operacional, a produção de lodo foi quantificada por meio do monitoramento do volume de lodo descartado (anaeróbio e aeróbio) e caracterização de sua concentração de sólidos totais e voláteis. Assim, como apresentado na Figura 10, foi possível plotar a massa de lodo total gerado pelo sistema no período (kg-SSV produzido) em função da carga orgânica total removida no mesmo período (kg-DQO removido). A inclinação desta curva é o coeficiente de rendimento celular observado (Y_{obs}), cujo valor foi de 0,11 kg-SSV/kg-DQOr ($R^2=0,99$).

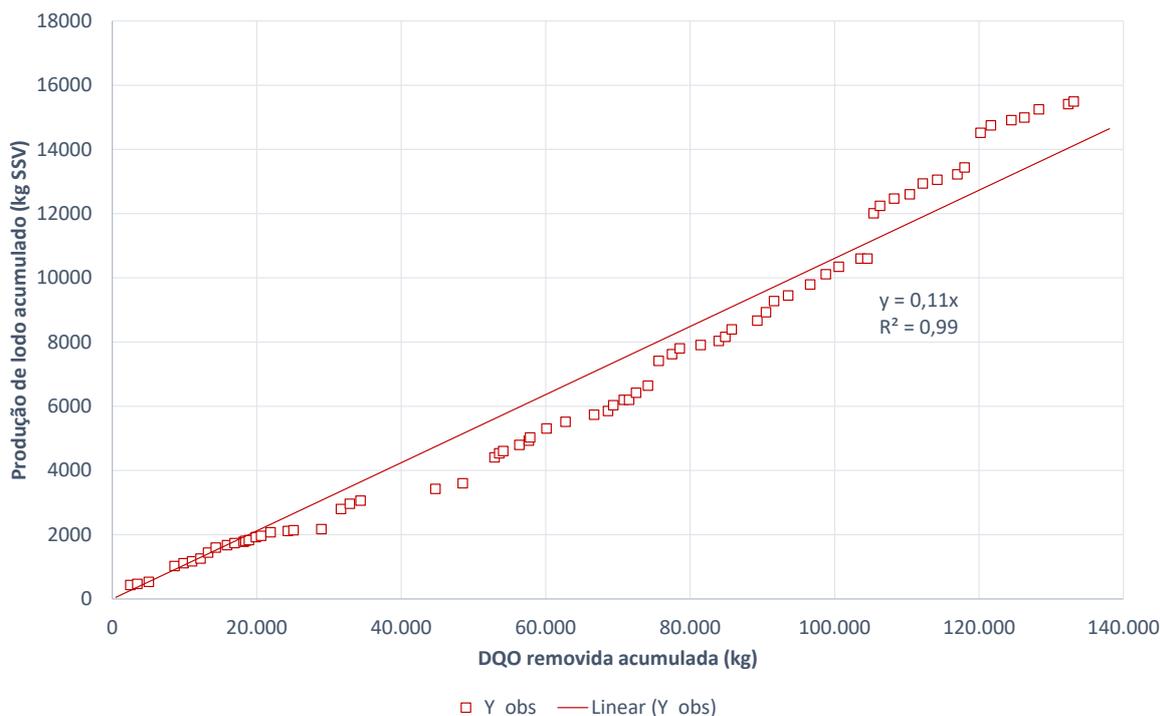


Figura 10 – Produção de lodo global acumulada em função da carga de DQO removida acumulada ao longo de todo o período operacional.

Como apresentado na Tabela 2, a produção de lodo anaeróbico e aeróbico representou, respectivamente, 33% e 67% da massa total de lodo produzido. O Y_{obs} obtido pelo reator anaeróbico foi de 0,10 kg SSV/kg-DQOr enquanto o reator aeróbico foi de 0,17 kg-SSV/kg-DQOr.

Tabela 2 – Fração do lodo total produzido por cada reator (anaeróbico e aeróbico) e seus respectivos rendimentos celulares observados (Y_{obs}).

	Reator Anaeróbico	Reator Aeróbico	BRC
Fração do lodo total produzido	33%	67%	100%
Relação SV/ST do lodo descartado	59%	68%	61%
$Y_{obs_{SST}}$ (kg SST/kg DQOr)	0,06	0,12	0,18
$Y_{obs_{SSV}}$ (kg SSV/kg DQOr)	0,10	0,17	0,11

O baixo valor de Y_{obs} alcançado pelo sistema, principalmente para o reator aeróbico, evidencia que o sistema BRC com Biobob possui baixa geração de lodo se comparado a outros sistemas convencionais de tratamento, tal como o sistema de lodos ativados cujo Y_{obs} é da ordem de 0,4 kg-SSV/kg-DQOr. Neta comparação, o reator BRC produz apenas 27,5% do total de lodo que o reator de lodos ativados produziria, trazendo, conseqüentemente, uma redução significativa no custo operacional da estação de tratamento de esgoto.

Este resultado é alcançado devido a alta retenção da biomassa promovida pela espuma de poliuretano do Biobob®, promovendo assim uma alta idade do lodo (acima de 90 dias) para a biomassa fixa, o que, por sua vez, proporciona uma alta endogenia e mineralização do lodo. A evidência deste fato é a observação da relação entre sólido volátil e sólido total (SV/ST) do lodo descartado pelo reator aeróbico. O valor foi de 68%, ou seja, o lodo foi mineralizado (SV/ST < 70%), comprovando o alto decaimento celular no sistema (alta respiração endógena).

CONCLUSÃO

Com os resultados apresentados, pode-se concluir que o biorreator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo com Biobob® é uma alternativa viável para a substituição das tecnologias convencionais de tratamento de esgoto, pois consegue agregar as vantagens operacionais dos processos anaeróbio e aeróbio em reator único e compacto, mantendo as concentrações de DQO e SST no efluente tratado abaixo dos níveis exigidos pela legislação, além de produzir significativamente menos lodo e não emitir gases odoríferos (como é comum em reatores anaeróbios).

Mesmo no período de maior carga aplicada e com menor TDH dos reatores (Etapa 3), a eficiência global do sistema se manteve alta, com valores médios para este período de $90 \pm 7\%$, $88 \pm 11\%$ e $90 \pm 8\%$, respectivamente para remoção de DQO, DBO e SST. Neste período, o tempo de detenção hidráulica médio nos reatores anaeróbio e aeróbio foi de $4,5 \pm 1,5$ h e $6,8 \pm 2,2$ h, na ordem respectiva, obtendo efluente tratado com média de 43 ± 30 mg DQO/L, 19 ± 9 mg DBO/L e 19 ± 16 mg SST/L.

Outra vantagem do sistema BRC observada durante o período monitorado foi a ausência de maus odores na estação, pois todo o H_2S e ácidos orgânicos gerados na etapa anaeróbia foram oxidados na etapa aeróbia, tornando possível a sua implantação próxima a bairros residenciais, o que viabiliza a descentralização do tratamento de esgoto em grandes centros urbanos, trazendo significativas economias em investimentos de infraestrutura para redes coletoras e elevatórias de esgoto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARAUJO, T.L.S. Desempenho de reator anaeróbio híbrido (leito fixo e manta de lodo) tratando esgoto sanitário em escala piloto. Dissertação apresentado ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos-SP. 2014.
2. LETTINGA G, van VELSEN A.F.M., HOBMA S.W., de ZEEW W., KLAPWIJK A. Use of upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, specially for anaerobic treatment. *Biotechnol Bioeng*, 22:699–734.1980.
3. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 23rd ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environmental Federation, Washington DC, USA. 2017.
4. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017: abastecimento de água e esgotamento sanitário / IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Coordenação de População e Indicadores Sociais. 2020.