

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS POR REATOR UASB SEGUIDO DE FILTRAÇÃO POR MEMBRANAS SUBMERSAS.

PERFORMANCE EVALUATION OF MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT BY UASB FOLLOWED SUBMERSED MEMBRANES FILTRATION.

Mauro Roberto Felizatto

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/Faculdade de Tecnologia-UnB. Analista de Sistema de Saneamento da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). (ptarh@felizatto.com e maurofelizatto@caesb.df.gov.br)

Marco Antonio de Almeida Souza

PhD em Engenharia Ambiental pela Universidade de Birmingham. Professor voluntário, pesquisador e colaborador e orientador credenciado do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH/UnB). Consultor independente. (marcantoriosouza@gmail.com)

Felipe Coelho Nery

Estudante de Engenharia Civil da Universidade do Distrito Federal (UDF). Estagiário na CAESB. (felipe.nery2@gmail.com)

Norma Gontijo

Biomédica pelo Centro Universitário de Brasília (UniCEUB). Técnica em laboratório no Laboratório de Saneamento Ambiental do PTARH/UnB. (normabiomed@gmail.com)

Resumo

A incorporação da tecnologia de separação por membranas em processos anaeróbios (tal qual o reator UASB) representa uma inovação importante no desenvolvimento da engenharia de tratamento de águas residuárias, principalmente quando se deseja realizar o reúso de água. Esta pesquisa consistiu na avaliação da microfiltração através de membranas submersas, provido de sistema de retrolavagem, durante o tratamento contínuo do efluente de reator UASB operando com esgotos sanitários. As membranas utilizadas foram do tipo fibras-ocas fabricadas com o polímero poli(éter-imida). Como conclusão, os experimentos de longo termo realizados revelaram que a remoção alcançada pela microfiltração do efluente do reator UASB foi de 87% para Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), 84% para Demanda Química de Oxigênio (DQO), 99% para Sólidos em Suspensão Totais (SST) e 2,02 unidades logarítmicas para Coliformes Fecais (CF).

Palavras-chave: Tratamento de esgotos sanitários, Reator UASB, Reúso de Água, Microfiltração.

Abstract

The incorporation of membrane separation technology into anaerobic processes (such as the UASB reactor) represents an important innovation in the development of wastewater treatment engineering, especially when water reuse is desired. This research consisted in the evaluation of microfiltration through submerged membranes, provided with a backwash system, during the continuous treatment of UASB reactor effluent operating with sanitary sewage. The membranes used were of the hollow fiber type fabricated with the poly (ether-imide) polymer. As a conclusion, the long-term experiments carried out revealed that the microfiltration removal of the UASB reactor effluent was 87% for BOD, 84% for COD, 99% for SST and 2.02 log units for Fecal Coliforms.

Key-words: Municipal wastewater treatment, UASB Reactor, Microfiltration, Water Reuse.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil e na América do Sul, as mudanças climáticas já verificadas e as previstas colocarão em risco a segurança hídrica das regiões e terão impactos diretos no abastecimento de água doméstico e industrial e em setores fortemente dependentes deste recurso, como o de geração de energia hidrelétrica e a agricultura. O alerta vem do IPCC (2014) e destaca que as projeções de alterações climáticas de maior repercussão para as Américas do Sul e Central ocorreram nas zonas áridas e semiáridas, hoje já vulneráveis.

A intensificação de secas e cheias na América do Sul, previsões que já estão sendo confirmadas, também afeta e repercute cada vez mais no abastecimento de água das grandes cidades, na geração de energia hidrelétrica e a produção de alimentos. Como exemplos disso, têm-se as recentes ocorrências de eventos climáticos extremos, como os de períodos de secas combinados com os de altas temperaturas, fatos presenciados nos últimos quatro anos na região Sudeste do Brasil, os quais acabaram impondo para a maior região metropolitana do Brasil, São Paulo, abastecida pelas represas Cantareira, Alto do Tietê e Guarapiranga, uma crise de insegurança hídrica nunca antes enfrentada na história do saneamento brasileiro, mesmo sendo localizada numa região de abundância hídrica (MENDONÇA; MENDONÇA, 2016).

Com este cenário na condução do esgotamento dos recursos hídricos, tanto em qualidade como em quantidade, adicionado às tendências cada vez mais restritivas das políticas ambientais de descarga dos efluentes, têm aumentado consideravelmente o interesse e o número de projetos de reúso de água no mundo e, de forma mais acanhada, no Brasil (BIXIO; WINTGENS, 2006; BIXIO *et al.*, 2008).

Em um diagnóstico realizado por uma pesquisa na região da América Latina, Noyola *et al.* (2012) identificaram três principais tecnologias para o tratamento de esgotos sanitários: lagoas de estabilização, lodos ativados (aeração prolongada e convencional) e reatores *UASB*. Nesta pesquisa, 2.734

plantas de tratamento foram consultadas em seis países da região (Brasil, Colômbia, Chile, República Dominicana, Guatemala e México). A distribuição por número para essas três tecnologias foi respectivamente de 38%, 26% e 17%, correspondendo a 81% das ETEs consultadas. Vale notar que o sistema *UASB*, com menos de 25 anos de aplicação em escala real no campo de tratamento de esgotos sanitários, ocupou o terceiro lugar deste ranqueamento, ficando atrás de processos mais antigos, como é o caso do processo de lodos ativados, com mais de um século de utilização na área de tratamento de esgotos (HORAN, 2014).

No caso do Brasil, a aceitação e a disseminação dos reatores *UASB* para o tratamento de esgotos sanitários colocaram o país numa posição de vanguarda em nível mundial (CHERNICHARO, 2007; CHERNICHARO *et al.*, 2015; JORDÃO; VOLSCHAN; ALÉM SOBRINHO, 2007). Chernicharo (2007) estima que existiam no Brasil, na época, em torno de 400 reatores *UASB* tratando esgotos sanitários, a maioria deles localizada nos estados do Paraná, da Bahia, de Minas Gerais e no Distrito Federal.

Com esta posição destacada do reator *UASB* no tratamento de esgotos sanitários, integrá-lo sequencialmente à filtração direta por membranas submersas tem despertado o interesse e mostrado recentemente por algumas pesquisas um potencial promissor na melhoria da qualidade da água - física, química e microbiológica (CHERNICHARO *et al.*, 2015; METCALF; EDDY, 2016). Portanto, faz-se necessário e relevante para o tratamento de esgotos sanitários e o reúso de água explorar esta configuração combinada de processos e aprofundar o entendimento nos pormenores da operação e o seu desempenho.

Já as membranas, como operação de separação em tratamento de águas residuárias, podem ser utilizadas em reatores biológicos aeróbios e anaeróbios (BRMs) e na filtração de efluentes primário e secundário. O processo de filtração de efluentes secundários pode ser caracterizado como pós-tratamento, por meio tanto de micro como de ultrafiltração, podendo eventualmente ser seguido pela osmose inversa (van VOORTHUIZEN *et al.*, 2008). A diferença básica entre os BRMs

(aeróbio ou anaeróbio) e a filtração, é que, nos primeiros, a interface da membrana é permeada por biomassa e fase líquida, enquanto no último, a alimentação é feita somente pela fase líquida (METCALF; EDDY, 2007).

No entanto, a separação por membranas é um processo puramente físico e de grande autonomia. Sua aplicação direta no tratamento de esgotos sanitários tem as seguintes características fundamentais: (i) as limitações típicas dos processos biológicos (influência da temperatura, estabilidade e toxicidade da alimentação, período de arranque etc.) seriam evitadas e (ii) os constituintes de águas residuárias seriam de fato “separados” em vez de “removidos”. Neste sentido, este processo tem sido referido como Separação Direta por Membranas (SDM), ou, no caso, Filtração Direta por Membranas - FDM (RAVAZZINI; van NIEUWENHUIJZEN; van der GRAAF, 2012; YOON, 2016).

A microfiltração de efluente do reator *UASB* ainda é pouco explorada, e pesquisas sobre este tema são raras. Somente dois estudos chineses foram encontrados reportando os resultados do tratamento de esgotos sanitários utilizando-se de um reator *UASB* seguido de FDM: o de Wen, Huang e Qian (1999) e o de An *et al.* (2009). Entretanto, somente a de Wen, Huang e Qian (1999) trata especificamente da sequência reator *UASB* e Filtração por Membranas Submersas (FMS), pois no estudo de An *et al.* (2009) foi ensaiado com filtração com membranas pressurizadas e no modo de operação fluxo tangencial.

Wen, Huang e Qian (1999), em escala de laboratório, operaram um sistema composto por reator anaeróbio e membranas de fibra oca instaladas na parte superior desse reator. O reator anaeróbio apresentava as seguintes características: volume útil de 17,7 L; parte superior com função de zona de sedimentação com volume de 8,8 L; e parte inferior que serve como zona de lodos com volume de 8,9 L (diâmetro 90 mm e altura de 1400 mm).

O módulo de membranas utilizadas no estudo foi composto por um feixe de fibras ocas, feitas de polietileno pela empresa japonesa Mitsubishi Rayon Engineering, com diâmetro médio de poros de 0,03 μm , área de filtração igual a 0,3 m^2 e operado no modo de sucção por meio de bomba de vácuo para a

extração do permeado (WEN; HUANG; QIAN, 1999).

Wen, Huang e Qian (1999) monitoraram DQO total, DQO solúvel (filtrado em papel de filtro de diâmetros de poros iguais a 0,45 μm) e Sólidos Suspensos Totais (SST). No período do experimento, com duração de 200 dias, a DQO afluente ao reator *UASB* variou de 98 até 2600 mg.L^{-1} e o SST afluente de 100 a 1000 mg.L^{-1} . A remoção de DQO no reator *UASB* acoplado à membrana submersa foi em média de 97%, sendo que somente no reator *UASB* a remoção foi em média de 84% (60 a 95%) e a rejeição estimada para as membranas submersas foi de 13%. A concentração de DQO no efluente (permeado) foi sempre menor que 20 mg.L^{-1} e os dados obtidos garantiram a remoção total, de 100%, para a variável SST.

Dessa maneira, esta pesquisa teve entre seus objetivos o de investigar o potencial do processo de separação utilizando membranas submersas como filtração direta do efluente de reator *UASB*, no quesito da melhoria da qualidade do efluente final, com vista a ser utilizado em irrigação restrita e/ou irrestrita.

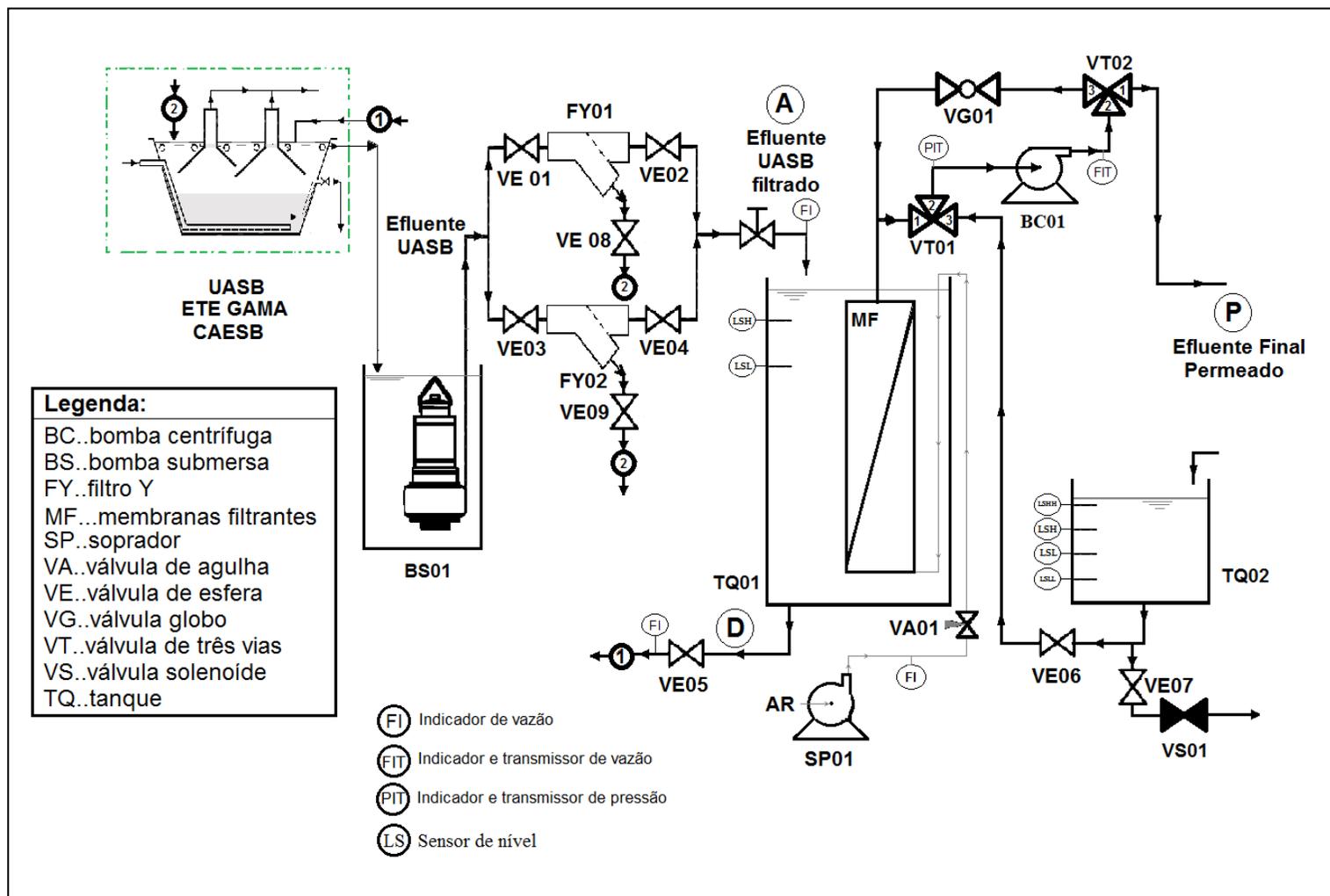
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 UNIDADE DE FILTRAÇÃO POR MEMBRANAS SUBMERSAS

Para realização desta pesquisa, foi concebida e construída uma Planta Piloto constituída de um sistema de microfiltração submersa com as seguintes características preconizadas pelo fornecedor: (i) capacidade de 60 L.h^{-1} de permeado, (ii) módulo de cabeçote duplo com 6 m^2 de área filtrante, (iii) membranas tipo fibras ocas, (iv) cilíndricas, (v) material poli(éter imida), (vi) diâmetro externo de 0,9 a 1,0 mm, (vii) fibras com camada seletiva externa e (viii) tamanho médio dos poros de 0,40 μm . A Figura 1 ilustra o sistema em um fluxograma de processo, apresentando a instrumentação da Planta Piloto e os pontos de coletas de amostras que foram utilizados.

A unidade de filtração por membranas submersas (FMS) foi instalada na ETE Gama, localizada no km 20 da rodovia DF 290 (16° 01,493' Sul e 48° 05,815' Este), ao sudoeste

Figura 1 - Fluxograma da Planta Piloto de Filtração por membranas submersas



Legenda dos Pontos de coleta de amostras: **A.** Alimentação ao TQ01 (Efluente UASB filtrado), **P.** Permeado ou Efluente Final e **D.** Descarte do tanque com membranas submersas - TQ01.

Fonte: Autores.

da cidade do Gama, que é uma das 16 ETEs pertencentes às unidades de tratamento do sistema de esgotamento sanitário (SES) do Distrito Federal (DF) e operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

Nos experimentos realizados, o efluente de um reator tipo *UASB* da ETE Gama era recalcado e passado por uma peneira fina, composta por telas metálicas com abertura de 0,50 mm (e denominada de Filtro em “Y”). Este peneiramento tinha a função de proteção das membranas com relação a materiais fibrosos que normalmente estão presentes no esgoto sanitário. O líquido retido no peneiramento fino era retornado para o reator *UASB* e o líquido peneirado era conduzido para a Planta Piloto com o módulo de filtração em membrana submersa (FMS).

A Planta Piloto, contendo a FMS, como pode ser observado no fluxograma da Figura 1, era composta pelos seguintes elementos principais:

1. Tanque onde está instalado o módulo de membranas (TQ01), com volume de 30 L;
2. Chaves de níveis do TQ01 (LSH e LSL);
3. Módulo de membranas com 6 m²;
4. Bomba de sucção do permeado e de retrolavagem dotada de dispositivo eletrônico para controle de rotação do motor (BC01);
5. Medição de vazão de alimentação e descarte do TQ01 (FI);
6. Medição de vazão das correntes do permeado e da retrolavagem (FIT);
7. Medição de pressão (PIT);
8. Soprador de ar com controle e medição de vazão (SP01);
9. Válvulas solenoides de três vias (duas – VT01 e VT02), com acionamento elétrico, controladoras de fluxo que permitem alteração automática das operações de filtração e retrolavagem do módulo de membranas submersas;
10. Válvula solenoide de duas vias com acionamento elétrico para controle de fluxo (VS01);
11. Tanque de limpeza, onde é armazenado o permeado (TQ02), com volume de 10 l; e

12. Chaves de níveis do TQ02 (LSLL, LSL, LSH e LSHH).

Como se verifica no fluxograma da Figura 1, a etapa de separação originava duas correntes: a do concentrado e a do permeado. A corrente de permeado, que fluía pelos poros da membrana, era direcionada para um tanque de armazenamento da unidade (TQ02) para servir como líquido para as retrolavagens. O líquido concentrado retornava para o reator *UASB*.

A unidade de FMS continha uma bomba (BC01) de dupla função: filtração e retrolavagem (limpeza das membranas). Na filtração, a bomba retirava por sucção o efluente microfiltrado, sendo este em parte acumulado em um tanque para o processo de limpeza. Na função de limpeza, a bomba recalrava por sucção o líquido microfiltrado e o bombeava no sentido de dentro para fora das membranas, no procedimento da retrolavagem, o que permitia a remoção de particulados que obstruam os poros da membrana.

A Planta Piloto foi concebida para operar como um biorreator aeróbio com membranas, pois possuía um soprador que sempre era acionado, seja na operação manual ou automática. Essa aeração com bolhas grossas podia também servir como alternativa para a etapa de relaxamento, a fim de minimizar as incrustações, se fosse utilizada na etapa de retrolavagem, ou para garantir maior eficiência na etapa de limpeza periódica das membranas. Entretanto, nesta pesquisa, o soprador foi mantido desligado.

2.2 MONITORAMENTO DO PROCESSO

O desempenho do sistema foi avaliado em termos de remoção de poluentes. O programa de monitoramento do desempenho operacional foi efetuado durante a operação de 61 dias consecutivos, equivalente a 16 semanas. A Tabela 1 apresenta as variáveis da qualidade da água que foram monitoradas e as frequências de análise utilizadas na presente pesquisa.

As amostragens foram executadas por meio das coletas de alíquotas a cada quinze minutos das amostras de efluente do reator

UASB (alimentação), descarte do tanque com membranas (TQ01) e permeado, compondo-as nos testes diários da Planta Piloto e analisadas pelas variáveis apresentadas na Tabela 1. As amostras foram preservadas em refrigeração em caixa

térmica preenchida por gelo picado, durante as coletas e no transporte até o laboratório.

Todas as marchas analíticas utilizadas seguem o preconizado pela APHA/AWWA/WPCF (2005), exceto para análise de Ovos de Helmintos, e estão descritas na Tabela 2.

Tabela 1 – Variáveis monitoradas na verificação do desempenho global através das amostras compostas do efluente do UASB (alimentação), descarte do TQ01 e permeado da Planta Piloto FMS, e suas freqüências

Variáveis	Frequência
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	Duas vezes por semana
Sólidos em Suspensão Totais (SST)	Duas vezes por semana
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	Semanal
Agentes surfactantes (AS)	Semanal
Óleos e Graxas (OG)	Semanal
Coliformes Fecais (CF)	Semanal
Ovos de Helmintos (OH)	¹ Campanha especial

Legenda: 1. Análises efetuadas em coletas durante quatro semanas consecutivas (29/08, 12/09, 19/09 e 26/09).

*. Substâncias aniônicas que reagem com Azul de Metileno.

Fonte: Autores.

Tabela 2 – Variáveis e respectivos métodos empregados na avaliação do desempenho da presente pesquisa

Variáveis	Método
DQO (mg O ₂ .L ⁻¹)	Digestão em refluxo fechado - leitura titulométrica
DBO (mg O ₂ .L ⁻¹)	Manométrico – Respirométrico
Sólidos em Suspensão totais (mg.L ⁻¹)	Gravimétrico
Agentes surfactantes (mg.L ⁻¹)	Método do Azul de Metileno
Óleos e Graxas (mg.L ⁻¹)	Método de extração de Soxhlet
Coliformes Fecais (NMP/100 ml)	Método dos Tubos Múltiplos (Substrato A1)
Ovos de Helmintos (nº ovos viáveis)	Método Yanko modificado

Legenda: NMP. Número mais provável.

Fonte: APHA/AWWA/WPCF (2005), exceto para Ovos de Helmintos.

2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados analíticos levantados, após análise de consistência dos valores gerados, foram dispostos para a discussão utilizando a estatística descritiva por meio dos valores: mínimo, do 1º quartil (frequência de 25%), do valor médio (média aritmética simples), do 2º quartil (frequência de 50% ou mediana), do 3º quartil (frequência de 75%), do máximo e do desvio padrão para cada variável analisada. Para ilustrar as remoções em cada uma das etapas de tratamento e no global, foi utilizado o gráfico tipo *box-plot*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O programa de monitoramento da microfiltração do efluente do reator UASB, durante as 61 corridas ensaiadas, foi desenvolvido através de coletas compostas ao longo dos 24 estágios de filtração executados por dia de operação, com amostragens da alimentação, do descarte e do permeado. As coletas aconteciam sempre nas segundas-feiras e nas quartas-feiras. Os resultados de qualidade do esgoto bruto, afluente a ETE, considerados neste trabalho, foram obtidos pela equipe de planejamento da CAESB, sendo que as amostragens do

programa de monitoramento do desempenho global da ETE Gama sempre aconteceram aos domingos e quartas-feiras.

A pesquisa toda foi realizada em 16 segundas-feiras, 16 terças-feiras, 14 quartas-feiras e 15 quintas-feiras. Portanto, foram feitas 30 amostragens no período de 61 corridas. As variáveis Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Sólidos Suspensos Totais (SST) foram medidas duas vezes por semana, portanto, perfazendo um total de 30 dados por variável. As marchas analíticas das variáveis Demanda Bioquímica de Oxigênio padrão (DBO), Agentes Surfactantes, Óleos e Graxas e Coliformes Fecais eram realizadas uma vez por semana, sempre nas quartas-feiras, perfazendo um total de 14 resultados por cada uma delas. A avaliação da concentração de Ovos de Helmintos Viáveis foi executada em uma campanha especial de quatro semanas consecutivas, utilizando-se das amostras efetuadas nas segundas-feiras (29/08, 12/09, 19/09 e 26/09/2016).

A Tabela 3 apresenta os parâmetros estatísticos (valores mínimo, 1º quartil –

25%, médio, mediana (50%), 3º quartil – 75%, máximo e o desvio-padrão) das séries temporais de SST monitorados nesta pesquisa de microfiltração de efluente do reator *UASB* para as amostras: (i) do esgoto bruto (afluente a ETE), (ii) da alimentação ao TQ01 (efluente do reator *UASB*), (iii) do descarte do TQ01 e (iv) do permeado durante as 61 corridas executadas.

A remoção parcial do reator *UASB* foi responsável pela maior parcela da remoção de SST, com valor médio levantado de 97%. A unidade de microfiltração acrescentou 69%, em média, à remoção de SST, e, dessa forma, o tratamento completo registrou uma remoção média de SST de 99%. A remoção global de SST da microfiltração do efluente do reator *UASB* elevou o padrão do tratamento de “B” (remoção mínima de 60%) para o nível “F” (remoção mínima de 90%) da referência de classificação dos sistemas de tratamento de esgotos sanitários do Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES) da Agência Nacional de Água – ANA (LIBÂNIO *et al.*, 2007).

Tabela 3 – Parâmetros estatísticos das sequências temporais de SST (mg.L^{-1}) monitorados na pesquisa de microfiltração de efluente do reator *UASB* para as amostras: afluente a ETE Gama, da alimentação ao TQ01, do descarte do TQ01 e do permeado das 61 corridas executadas (28/03 a 20/10/2016)

Valores	Pontos de amostragem		
	Afluente a ETE Gama (AfSST)	Alimentação TQ01 (AISST)	Permeado produzido (PeSST)
Mínimo	183	3	1
1º Quartil (25%)	235	6	2
Médio	373	17	4
Mediana (50%)	300	10	3
3º Quartil (75%)	440	26	4
Máximo	968	67	14
Desvio-padrão	259	14	3

Fonte: Autores.

O valor médio da remoção de SST obtido por esta pesquisa, 99%, foi similar ao mencionado por Wen, Huang e Qian (1999), que foi relatado como 100%.

Os gráficos *box-plot* da Figura 2 apontam os resultados encontrados das remoções parciais e da remoção global de SST, havendo em destaque e na lateral direita da Figura 2 um gráfico explicativo do

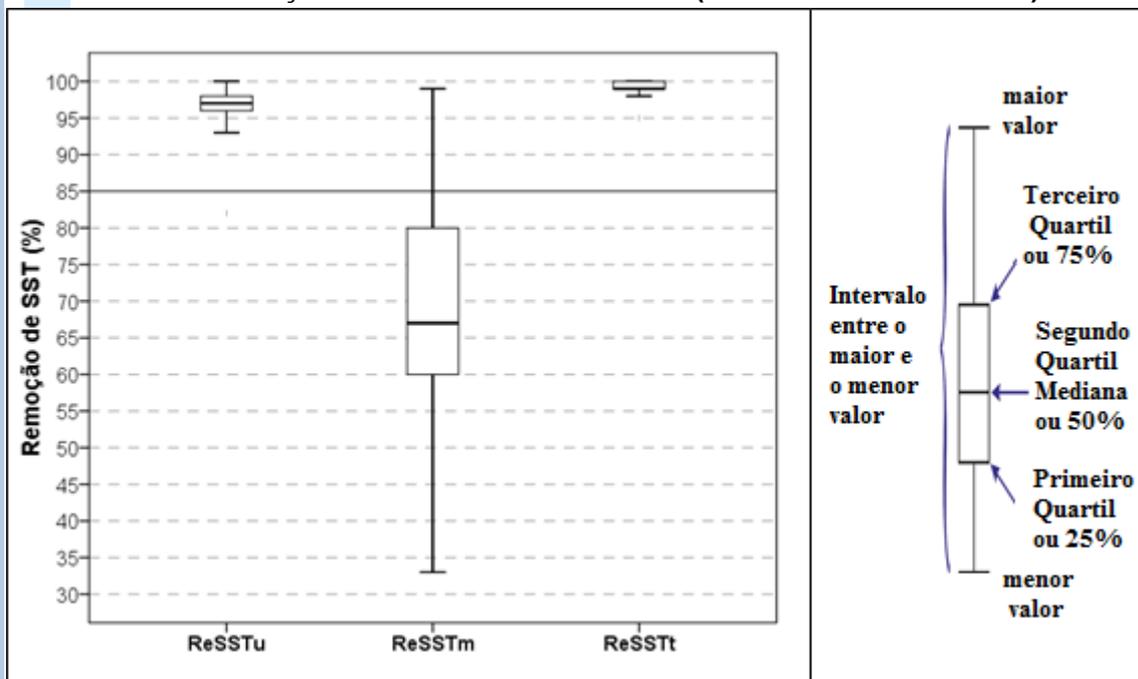
que o *box-plot* representa das estatísticas descritivas.

A Tabela 4 apresenta as medidas estatísticas (valores mínimo, 1º quartil – 25%, médio, mediana (50%), 3º quartil – 75%, máximo e o desvio-padrão) das séries temporais da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO em mg.L^{-1}) obtidas para as amostras: (i) do esgoto bruto (afluente a

ETE), (ii) da alimentação ao TQ01 (efluente do reator *UASB*), (iii) do permeado durante

as 61 corridas executadas.

Figura 2 – Gráficos *box-plot* das remoções parciais no reator *UASB* (ReSSTu) e nas membranas submersas (ReSSTm) e remoção global do tratamento (ReSSTt) da pesquisa de microfiltração do efluente do reator *UASB* (Número de amostras = 30)



Fonte: Autores.

Tabela 4 – Medidas estatísticas das seqüências temporais de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO em mg.L^{-1}) monitoradas na pesquisa de microfiltração de efluente do reator *UASB* para as amostras: afluente a ETE Gama, da alimentação ao TQ01 e do permeado das 61 corridas executadas (28/03 a 20/10/2016)

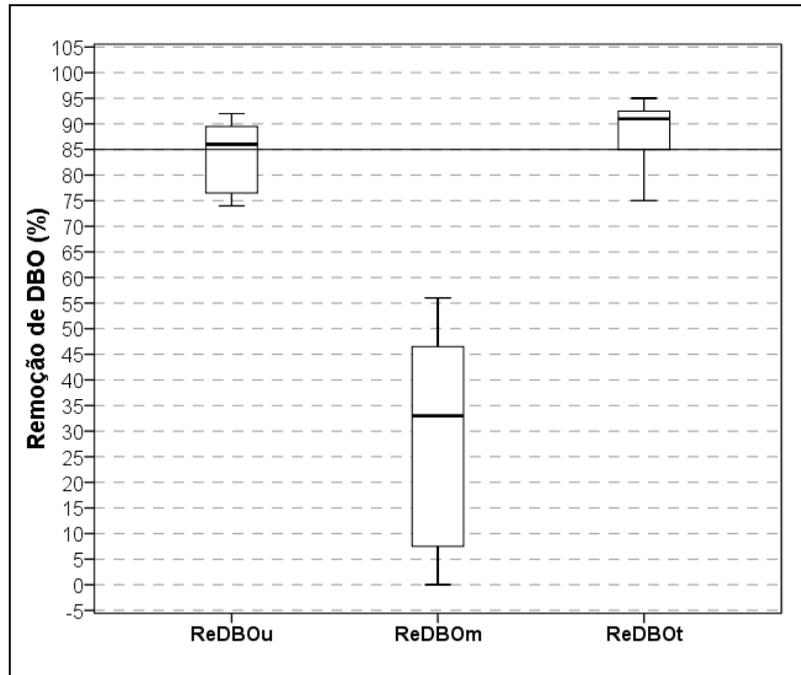
Valores	Pontos de amostragem		
	Afluente a ETE Gama (AfDBO)	Alimentação TQ01 (AIDBO)	Permeado (PeDBO)
Mínimo	200	36	21
1° Quartil (25%)	380	49	34
Médio	405	76	53
Mediana (50%)	420	64	44
3° Quartil (75%)	460	100	60
Máximo	500	200	150
Desvio-padrão	75	39	32

Fonte: Autores.

Os gráficos *box-plot* da Figura 3 mostram os resultados encontrados das remoções parciais para a variável DBO, ocorridas no reator *UASB* (ReDBOu) e na Planta Piloto de microfiltração por

membranas submersas (ReDBOm), e da remoção global de todo tratamento (reator *UASB* + Planta Piloto de microfiltração por membranas submersas).

Figura 3 – Gráficos *box-plot* das remoções parciais de DBO no reator *UASB* (ReDBOu) e nas membranas submersas (ReDBOm) e remoção global do tratamento (ReDBOt) da pesquisa de microfiltração do efluente do reator *UASB* (Número de amostras = 14)



Fonte: Autores.

Como evidenciado para a variável SST, a remoção parcial do reator *UASB* foi responsável pela maior parcela da remoção de DBO, com valor médio levantado de 81%. A unidade de microfiltração acrescentou 30%, em média, à remoção de DBO. Dessa forma, o tratamento completo registrou uma remoção média de DBO de 87%.

A remoção global de DBO da microfiltração do efluente do reator *UASB* elevou o padrão do tratamento de “B” (remoção mínima de 60%) para o nível “E” (remoção mínima de 85%) da referência de classificação dos sistemas de tratamento de esgotos sanitários PRODES/ANA (LIBÂNIO *et al.*, 2007).

Além disso, destaca-se que todos os valores das concentrações das séries temporais da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO em mg.L^{-1}) das amostras do efluente do reator *UASB* (alimentação do TQ01) e do efluente final do tratamento (permeado) atendem ao valor da resolução CONAMA 431/11 (BRASIL, 2011) – DBO < 120 mg.L^{-1} .

A Tabela 5 apresenta as medidas estatísticas (valores mínimo, 1º quartil –

25%, médio, mediana (50%), 3º quartil – 75%, máximo e o desvio-padrão) das séries temporais da Demanda Química de Oxigênio (DQO em mg.L^{-1}) para as amostras: (i) do esgoto bruto (afluente a ETE), (ii) da alimentação ao TQ01 (efluente do reator *UASB*), (iii) do permeado durante as 61 corridas executadas.

O valor médio da remoção de DQO obtido por esta pesquisa foi de 84% para todo o processo *UASB/FMS*, menor que o obtido por Wen, Huang e Qian (1999), que foi 97%. Já as remoções médias parciais, somente no *UASB* e na FMS, aconteceram de forma inversa a descrita pela pesquisa chinesa. Na presente pesquisa, o reator *UASB* foi responsável por 67% da remoção média de DQO, enquanto o obtido por Wen, Huang e Qian (1999) foi de 84%. Já a FMS deste estudo respondeu por 50% da remoção média de DQO, mas essa remoção na pesquisa de Wen, Huang e Qian (1999) foi de apenas 13% para as membranas submersas. O valor mínimo da concentração de DQO no efluente (permeado) deste estudo foi 43 mg.L^{-1} , maior que 20 mg.L^{-1} ,

valor descrito como o máximo por Wen, Huang e Qian (1999).

Nesta pesquisa, os desempenhos individuais do reator *UASB* e FSM com relação à remoção da variável DQO demonstraram diferenças comparando com DBO e SST, pois a FMS quase que removeu ou rejeitou o mesmo valor que o reator *UASB*.

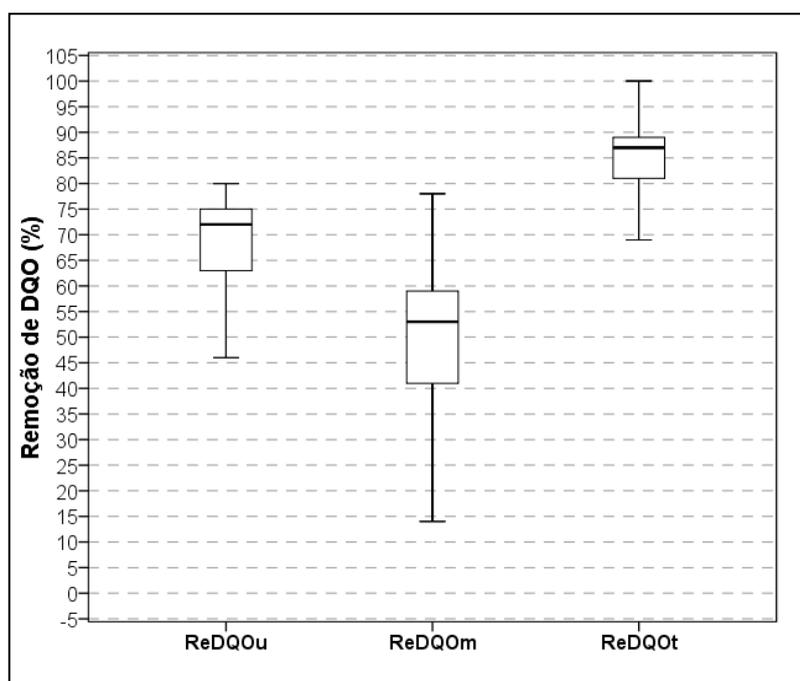
Os gráficos *box-plot* da Figura 4 apontam os resultados encontrados das remoções parciais, ocorridas no reator *UASB* (ReDQOu) e na Planta Piloto de microfiltração por membranas submersas (ReDQOm) e da remoção global de todo tratamento (reator *UASB* + Planta Piloto de microfiltração por membranas submersas) da variável DQO desta pesquisa.

Tabela 5 – Parâmetros estatísticos das séries temporais das concentrações das Demandas Químicas de Oxigênio (DQO em mg.L⁻¹) levantadas nesta pesquisa de microfiltração de efluente do reator *UASB* para as amostras: afluente a ETE Gama, alimentação do TQ01, descarte do TQ01 e do permeado das 61 corridas ensaiadas (28/03 a 20/10/2016)

Valores	Ponto de amostragem		
	Afluente a ETE Gama (AfDQO)	Alimentação TQ01 (AIDQO)	Permeado (PeDQO)
Mínimo	334	128	43
1° Quartil (25%)	628	182	77
Médio	681	221	110
Mediana (50%)	702	200	88
3° Quartil (75%)	741	225	143
Máximo	930	473	190
Desvio-padrão	127	83	44

Fonte: Autores.

Figura 4 – Gráficos *box-plot* das remoções parciais de DQO no reator *UASB* (ReDQOu) e nas membranas submersas (ReDQOm) e remoção global do tratamento (ReDQOt) da pesquisa de microfiltração do efluente do reator *UASB* (Número de amostras = 30)



Fonte: Autores.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros estatísticos (valores mínimo, 1º quartil – 25%, médio, mediana (50%), 3º quartil – 75%, máximo e o desvio-padrão) das séries temporais das concentrações de Óleos e Graxas (OG em mg.L⁻¹) e de Surfactantes

Aniônicos (SA em mg.L⁻¹) levantados neste trabalho de microfiltração do efluente do reator *UASB* para as amostras da alimentação ao TQ01 e do permeado durante as 61 corridas ensaiadas.

Tabela 6 – Medidas estatísticas das séries temporais das concentrações de Óleos e Graxas (OG em mg.L⁻¹) e de Surfactantes Aniônicos (SA em mg.L⁻¹) levantados nesta pesquisa de microfiltração de efluente do reator *UASB* para as amostras: alimentação do TQ01 e do permeado das 61 corridas ensaiadas (28/03 a 20/10/2016)

Valores	Pontos de amostragem			
	Alimentação do TQ01		Permeado	
	AIOG	AISA	PeOG	PeSA
Mínimo	32	0,18	26	0,11
1º Quartil (25%)	40	0,53	46	0,59
Médio	68	0,96	65	0,66
Mediana (50%)	64	0,75	58	0,63
3º Quartil (75%)	105	1,76	80	0,74
Máximo	111	1,95	133	1,20
Desvio-padrão	31	0,63	31	0,27

Legenda: AIOG. OG da alimentação do TQ01, AISA. SA da alimentação do TQ01, PeOG. OG do permeado e PeSA. SA do permeado.

Fonte: Autores.

Constata-se pelos dados apresentados na Tabela 6 que os resultados das concentrações de Óleos e Graxas (OG – mg.L⁻¹) e de Surfactantes Aniônicos (SA – mg.L⁻¹) para as amostras de alimentação do tanque de membranas submersas (TQ01) e do permeado são quase equivalentes, ou seja, não ocorreu rejeição significativa para estas variáveis ao se microfiltrar o efluente do reator *UASB*. Isso já era de certa forma esperado, e pode ser explicado como sendo consequência do tamanho das moléculas desses princípios, pois provavelmente elas são menores que 0,40 µm, suposto diâmetro de corte das membranas utilizadas nesta pesquisa.

A campanha especial de análises das concentrações de Ovos de Helmintos nas amostras de alimentação do TQ01 (efluente do reator *UASB*) e do permeado foram executadas por quatro semanas consecutivas, todas as segundas-feiras, obtendo-se como resultados para todas as oito amostras a “Ausência” de Ovos de Helmintos Viáveis.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros estatísticos (valores mínimo, 1º quartil –

25%, médio, mediana (50%), 3º quartil – 75%, máximo e o desvio-padrão) das séries temporais dos logaritmos das concentrações de Coliformes Fecais (CF em NMP/100mℓ) para as amostras do afluente a ETE Gama, da alimentação ao TQ01 e do permeado durante as 61 corridas ensaiadas.

Os gráficos *box-plot* da Figura 5 exibem os valores das remoções, em unidades logarítmicas, das concentrações de Coliformes Fecais (NMP/100 mℓ) ensaiadas nesta pesquisa de microfiltração do efluente do reator *UASB* para as remoções parciais e total, só *UASB* e FMS e *UASB/FMS*, respectivamente.

Quando observados os gráficos *box-plot* da Figuras 5 e as estatísticas apresentadas na Tabela 7, a remoção parcial foi de 0,59 unidades logarítmicas para o reator *UASB* e 1,43 unidades logarítmicas para a unidade de microfiltração por membranas submersas, perfazendo remoção global de 2,02 unidades logarítmicas (unid. logs.).

De acordo com diretrizes da Organização Mundial de Saúde – OMS (WHO, 2006), a ausência de Ovos de Helmintos Viáveis e a concentração média

de CF de $7,5 \times 10^4$ NMP/100ml no permeado e 2,02 unidades logarítmicas de remoção de CF no UASB/FMS já permitiriam a este efluente final ser utilizado como água de reúso para irrigação restrita na agricultura altamente mecanizada e para irrigação irrestrita por gotejamento de culturas elevadas.

Por outro lado, a remoção de Coliforme Fecais neste estudo foi muito abaixo da expectativa, 2,02 unid. logs., enquanto o esperado era de 5 unid. logs. (RAVAZINNI; van NIEUWENHUIJZEN; van der GRAAF, 2005; METCALF; EDDY, 2016).

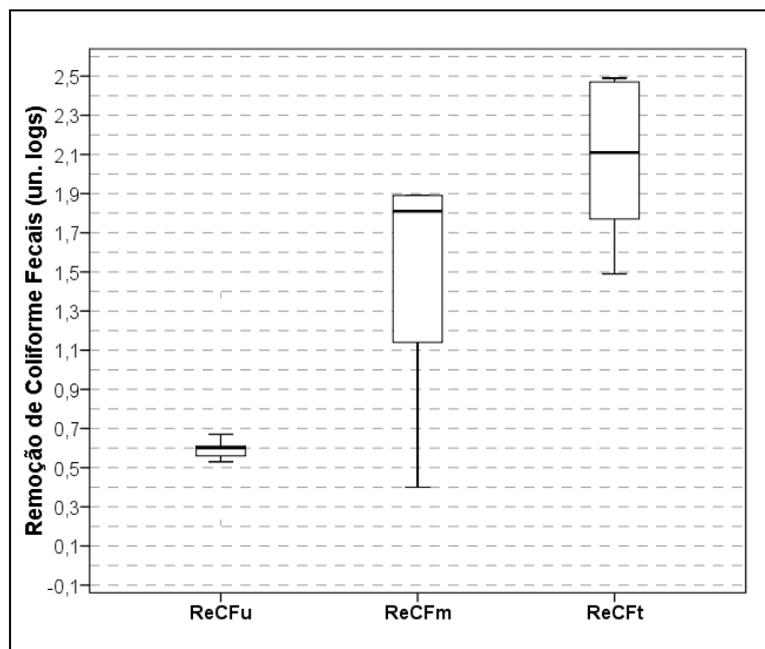
Tabela 7 – Medidas estatísticas das sequências temporais dos logaritmos dos Coliformes Fecais (CF em NMP/100 ml) monitorados na pesquisa de microfiltração de efluente do reator UASB para as amostras: afluente a ETE Gama, da alimentação ao TQ01 e do permeado das 61 corridas executadas (28/03 a 20/10/2016)

Valores	Ponto de amostragem		
	Afluente a ETE Gama (logAfCF)	Alimentação TQ01 (logAICF)	Permeado (logPeCF)
Mínimo	6,60	5,54	4,49
1° Quartil (25%)	6,80	6,30	4,49
Médio	6,90	6,31	4,88
Mediana (50%)	6,94	6,38	4,81
3° Quartil (75%)	7,00	6,38	5,16
Máximo	7,06	6,38	5,54
Desvio-padrão	0,16	0,20	0,41

Legenda: logAfCF. logaritmo CF do afluente a ETE Gama, logAICF. logaritmo CF da alimentação ao TQ01 e logPeCF. logaritmo CF do permeado.

Fonte: Autores.

Figura 5 – Gráficos *box-plot* das remoções parciais de Coliforme Fecais (em unidades logarítmicas) no reator UASB (ReCFu) e nas membranas submersas (ReCFm) e a remoção global do tratamento (ReCFt) da pesquisa de microfiltração do efluente do reator UASB (Número de amostras = 14)



Fonte: Autores.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi demonstrado que o processo conjunto reator UASB/FMS, nas condições da presente pesquisa, é adequado para a remoção de matéria orgânica, com remoção média global de 87% para DBO e 84% para DQO, enfatizando que a remoção parcial no reator *UASB* foi de maior relevância (81% para DBO e 68% para DQO), ao mesmo tempo em que, para as membranas, foi de 30% para DBO e 48% para DQO.

Além disso, o processo conjunto reator UASB/FMS mostrou-se apropriado para a remoção de Sólidos Suspensos Totais com remoção média global de 99%, destacando que a remoção parcial no reator *UASB* foi mais significativa, de 97%, enquanto as membranas rejeitaram 69% de SST.

O processo conjunto reator UASB/FMS revelou-se, nas condições da presente pesquisa, pouco eficiente para a remoção de coliformes fecais, com valor médio de remoção de 2,00 unidades logarítmicas, contrariando os valores de remoções relatados na literatura para a microfiltração de efluentes de esgotos sanitários tratados ou não.

Algumas questões levantadas durante esta pesquisa sugerem o desenvolvimento de outros estudos listados a seguir:

1. Avaliação com o mesmo efluente utilizando módulo de membranas submersas de ultrafiltração, pois já existem módulos de ultrafiltração compatíveis com unidade de microfiltração desta pesquisa; e
2. Avaliação do pós-tratamento da microfiltração do efluente do reator *UASB* utilizando carvão ativado, pois, teoricamente, esse processo poderia diminuir os valores de turbidez, cor e odor do permeado produzido nesta pesquisa.

5. AGRADECIMENTOS

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo fornecimento dos recursos financeiros para realização das análises do programa de monitoramento desta pesquisa, dentro do projeto RENTED - Rede Nacional

de Tratamento de Esgotos Descentralizados. À Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), pelo apoio logístico para a realização deste estudo e, destacando, à sua Escola Corporativa (ECO) pela confiança depositada. Em especial e *in memoriam*, ao estagiário de Engenharia de Energia Allan Saliba Rodrigues, que infelizmente não pode ver o final do trabalho, mas manteve seu espírito durante a árdua caminhada deste projeto.

6. REFERÊNCIAS

AN, Y. Y.; YANG, F.; BUCCIALI, B.; WONG, F. Municipal wastewater treatment using a UASB coupled with cross-flow membrane filtration. **Journal of Environmental Engineering (ASCE)**, v. 135, n. 2, p 86-91, 2009.

APHA/AWWAWPCF. Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association 21st Edition, Washington DC, USA, 2005.

BIXIO, D.; WINTGENS, T. (Ed.). **Water reuse system management manual** – AQUAREC, Official Publications of the European Communities, Luxembourg, Belgium, 2006, 678p.

_____, THOEYE, C.; WINTGENS, T.; RAVAZINNI, A.; MISKA, V.; MUSTON, M.; CHIKUREL, H.; AHARONI, A.; JOKSIMOVIC, D.; MELIN, T. Water reclamation and reuse: implementation and management issues. **Desalination**, n. 218, p. 13-23, 2008.

BRASIL . Resolução CONAMA 430, de 16 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União nº 92**, de 16/05/2011, 2011, pág. 89.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2^a ed. **Coleção Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007. 380p. v. 5.

_____, van LIER, J. B.; NOYOLA, A.; BRESSANI RIBEIRO, T. "Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges". **Rev. Environ. Sci. Biotechnology**, n. 14, p. 649-679, 2015.

HORAN, N. (Ed.). **Activated sludge: past, present and future**. Manchester, UK: Aqua Enviro Technology Transfer, 2014. 267 p.

IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part B: Regional Aspects, In: Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L.White (Ed.). **Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014. 688 p.

JORDÃO, E.P.; VOLSCHAN JR., I.; ALÉM SOBRINHO, P. Secondary WWTP preceded by UASB reactor – an excellent Brazilian experience. In: IWA SPECIALIZED CONFERENCE ON DESIGN, OPERATION AND ECONOMICS OF LARGE WASTEWATER TREATMENT PLANTS, 10., 2007, Vienna. **Anais eletrônicos...** Vienna, Austría: IWA – International Water Association, 2007. 8p.

LIBÂNIO, P. A. C.; NUNES, C. M.; de OLIVEIRA, E. F. C. C.; SOARES, S. R. A.; BRITO, M. C. S. O. M. Implantação e operação de estações de tratamento de esgotos; experiências no âmbito do Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, MG: ABES – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2007 (CD ROM).

MENDONÇA, S. R.; MENDONÇA, L. C. **Sistemas sustentáveis de esgotos**: orientações técnicas para projeto e dimensionamento de redes coletoras, emissários, canais, estações elevatórias, tratamento e reúso na agricultura.

São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda., 2016. 348p.

METCALF & EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5ª edição. Porto Alegre, RS: McGraw-Hill Educação, 2016. 1980 p.

____ & _____. **Water reuse issues, technologies, and applications**. New York, USA: McGraw-Hill Companies, 2007. 1503 p.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; GÜERECÁ, L. P. **Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales**. Instituto de Ingeniería – UNAM – Universidad Nacional Autónoma de México, México DF, México, 2013. 140 p.

RAVAZINNI, A. M.; van NIEUWENHUIJZEN, A. F.; van der GRAAF, J. H. M. J. Direct ultrafiltration of municipal wastewater: comparison between filtration of raw sewage and primary clarifier effluent. **Desalination**, n. 178, p. 51-62, 2005.

van VOORTHUIZEN, E.; ZWIJNENBURG, A.; van der MEER, W.; TEMMIK, H. Biological black water treatment combined with membrane separation. **Water Research**, n. 42, p. 4334-4340, 2008.

WEN, C.; HUANG, X.; QIAN, Y. Domestic wastewater treatment using an anaerobic bioreactor coupled with membrane filtration. **Process Biochemistry**, n. 35, p. 335-340, 1999.

WHO – World Health Organization. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater** – Volume 1 – Policy and regulatory aspects. WHO Library, 2006. 114 p.

YOON, S. H. **Membrane bioreactor process**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2016. 431 p.