

II-492 - AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO E DA RECICLAGEM DE ESGOTO DOMÉSTICO UTILIZANDO PROCESSOS BIOLÓGICOS E OXIDATIVOS AVANÇADOS EM EMPREENDIMENTOS COM CERTIFICAÇÃO LEED

Daniela Misael dos Santos Appel ⁽¹⁾

Administradora de Empresas pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC – PR) e Engenheira Civil pela Universidade Positivo – PR em 2016, cursando Mestrado em Engenharia de Recursos hídricos e ambiental na Universidade Federal do Paraná (PPGERHA – UFPR).

Isaac Nince Ramos ⁽²⁾

Graduando do 5º ano do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná – PR.

Tamara Simone van Kaick ⁽³⁾

Graduada em Bacharelado em Biologia e Licenciatura, especialista em Microbiologia Aplicada, mestre em Inovação Tecnológica e Doutora em Meio Ambiente e Desenvolvimento da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Professora Associada da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Química e Biologia – DAQBI. Assessora do Núcleo de Saúde e Meio Ambiente da Diretoria de Extensão da Pró Reitoria de Relações Empresariais e Comunitárias.

Selma Aparecida Cubas ⁽⁴⁾

Professora Adjunta do Departamento de Hidráulica e Saneamento – DHS, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Engenheira Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR) e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC - USP).

Endereço⁽⁴⁾: Av. Cel. Francisco H. dos Santos, s/n – Jardim das Américas – Curitiba - PR - CEP: 81531-990 - Brasil - Tel: (41) 3361-3210 - e-mail: selmacubas@gmail.com / selmacubas.dhs@ufpr.br

RESUMO

Os sistemas descentralizados de tratamento de esgoto se apresentam como tecnologias sustentáveis para o tratamento de pequenas vazões, que objetivam a reciclagem para fins não potável em residências e edifícios comerciais. Esses empreendimentos têm sido motivados pelas certificações ambientais, principalmente o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) a investirem na implantação de tecnologias sustentáveis, para a reciclagem não potável das águas residuárias. Neste contexto este trabalho teve como objetivo avaliar o tratamento e reciclagem de esgoto doméstico utilizando processos biológicos e oxidativos avançados em empreendimento com certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*). O sistema descentralizado de tratamento de esgotos, objeto de estudo está implantando em empreendimento comercial com certificação LEED, localizado no Município de Curitiba. O Sistema está em operação há mais de quatro anos e funciona em um ciclo fechado, objetivando a reciclagem de todo o esgoto sanitário gerado para a alimentação das caixas acopladas dos vasos sanitários. A metodologia aplicada para realização desta pesquisa envolveu a avaliação dos processos biológicos e oxidativos avançados implantados no sistema de tratamento, por meio de visitas técnicas e coleta de dados da construção e operação dos sistemas. Para avaliação da eficiência dos sistemas quanto aos aspectos de operação e controle foram analisados os parâmetros físicos, químicos e biológicos de 60 amostras de efluente, coletados em cinco pontos do sistema de tratamento. A avaliação dos sistemas permitiu observar que não há na literatura, sistema com configuração similar, para o tratamento de esgoto e também que o funcionamento das etapas de tratamento não atuam conforme as características previstas de operação. Os resultados da eficiência dos sistemas demonstrou um possível residual de peróxido de hidrogênio (H₂O₂), recirculando no sistema de tratamento, e que tal residual de (H₂O₂), assim como um acúmulo de outros compostos, tais como nitrogênio e fósforo podem estar inibindo o desenvolvimento dos microrganismos aeróbios. Neste contexto, os resultados indicam que os sistemas de tratamento implantados precisa de mais algumas sequências de monitoramento acerca do desempenho do tratamento no longo prazo, visando principalmente a compreensão das etapas propostas para realizar um reajustamento da mesma na busca de melhores resultados no tratamento de esgoto em ciclo fechado.

PALAVRAS-CHAVE: Reciclagem de Esgoto, Sustentabilidade; LEED; *Wetland*, RBS, Ciclo Fechado.

INTRODUÇÃO

Diante do fato do termo desenvolvimento sustentável, ser muitas vezes confundido com sustentabilidade, cabe destacar que embora os termos estejam correlacionados, apresentam conceitos distintos. O desenvolvimento sustentável envolve questões ambientais, econômicas e sociais, principalmente no que se refere ao uso da terra, sua ocupação, suprimento de água, abrigo e serviços sociais, educativos e sanitários, além de administração do crescimento urbano (WCED, 1987). Já a sustentabilidade é a meta a ser alcançada pelo desenvolvimento sustentável. Ou seja, a sustentabilidade é o objetivo final, de longo prazo (SARTORI; LATRÔNICO; CAMPOS, 2014). Neste contexto, as construções sustentáveis, que são atividades voltadas para a construção civil, que está sendo aplicada principalmente em edificações comerciais, objetivando o aumento da qualidade de vida do ser humano no ambiente construído e no seu entorno. Neste sentido a sustentabilidade nas construções visa a integração das características da vida e do clima local, consumindo menor quantidade de energia e preservando os recursos hídricos (CORBELLÁ; YANNAS, 2003).

No conceito de construção sustentável, no que tange especificamente a construção de edifícios, o termo *Green Building* ou Edifício Verde é utilizado para denominar edifícios que foram construídos dentro dos padrões de sustentabilidade. À medida que os Edifícios Verdes foram se desenvolvendo e houve a difusão dos empreendimentos, estabeleceram-se métodos para avaliar o desempenho e a eficácia destes empreendimentos. Dentre os instrumentos utilizados no âmbito das construções sustentáveis estão as certificações ambientais, que podem ser de caráter voluntário ou obrigatório. Tais certificações objetivam que os edifícios sustentáveis atendam a desempenhos ambientais relativos a temas como: eficiência de energia, conservação dos materiais e dos recursos, qualidade ambiental interna, eficiência de água, entre outros. As principais certificações ambientais internacionais utilizadas em edifícios no Brasil são AQUA -HQE (Alta Qualidade Ambiental) e o LEED (*Leadership in Energy e Environmental Design*).

Segundo Vieira et al. (2009), os edifícios com certificações ambientais, em especial o LEED, adota práticas descentralizadas de conservação de água nas edificações para contribuir com a redução do consumo de água potável, por meio do uso de fontes alternativas de águas menos nobres para reúso não-potável, como a irrigação, lavagem e limpezas externas ou em descargas sanitárias. Neste contexto, os sistemas descentralizados de tratamento de esgoto se apresentam como tecnologias sustentáveis para o tratamento de pequenas vazões, que objetivam o reúso para fins não potável ou reciclagem de esgoto doméstico em residências, pequenas comunidades e edifícios comerciais.

Importante destacar que, embora, haja uma semelhança entre a definição de reúso direto e reciclagem interna, Rodrigues (2005), cita a reciclagem interna como um caso particular de reúso direto, de modo que, na reciclagem de esgoto doméstico a água é reutilizada internamente para seu uso original antes de sua disposição no ambiente ou sistema de tratamento (MANCUSO, 2003). Diante disso, quando a finalidade do tratamento é reciclagem do esgoto doméstico, o nível de tratamento a ser empregado deve garantir padrões de remoção de compostos e microrganismos patógenos que não ofereça riscos sanitários as pessoas envolvidas.

Contudo, observa-se que não há no Brasil uma diretriz em âmbito nacional clara e difundida que regule padrões para o reúso ou reciclagem de águas residuárias para fins não potáveis. Esse fato, aliado a necessidade de garantir segurança para as pessoas envolvidas nas atividades que utilizam a água de reúso, têm motivado alguns estados brasileiros a assumirem o papel de implantar leis em suas respectivas jurisdições, que fomentem e regulamentem a implantação de reúso de águas residuárias. Sendo, a Resolução nº 01-SES/SMA/SSRH, de 28 de junho de 2017 do Governo de São Paulo a mais recente legislação sobre o tema, a qual utiliza índices adotados por instrumentos internacionais como a Organização Mundial de Saúde - OMS, da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura - FAO e *United States Environmental Protection Agency* – USEPA (SÃO PAULO, 2017).

Em Curitiba existem alguns edifícios que possuem a certificação LEED com sistemas descentralizados de tratamento das águas residuárias para reciclagem interna. Contudo os sistemas já implantados carecem de monitoramento acerca da eficiência do sistema. Desta forma, este trabalho tem como objetivo, avaliar o tratamento e reciclagem de esgoto doméstico utilizando processos biológicos e oxidativos avançados em empreendimento com certificação LEED.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi composta por pesquisas de ordem exploratória, descritiva, quantitativa, bibliográfica, documental e experimental, cujas etapas estão apresentadas no Quadro 1.

QUADRO 1 – Etapas metodológicas para o desenvolvimento da pesquisa

| | | |
|---------|---|---|
| Etapa 1 | Avaliação dos processos biológicos e oxidativo avançado de tratamento de esgotos doméstico implantados, considerando os aspectos de projeto, construção e operação estabelecidos pelas Normas Técnicas e literaturas específicas. | Visitas Técnicas no período de 10/2017 a 03/2018. |
| | | Consultas a fornecedores e Sites. |
| | | Consulta a literatura e documental. |
| | | Coleta de dados da construção de operação dos sistemas. |
| Etapa 2 | Avaliação da eficiência dos Sistemas de tratamento quanto aos aspectos de operação e controle. | Coletas de amostras do efluente, em cinco pontos do sistema de tratamento, durante o período de março a dezembro/2018. Totalizando aproximadamente 60 amostras para análise dos parâmetros: pH, Alcalinidade Total, Turbidez, DQO, DBO, Série de Sólidos Suspensos, Carbono Orgânico Dissolvido (DOC), N. Amoniacal, Nitrito, Nitrato, N-Nitrogênio total, Ortofostato, Fósforo Total, conforme <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> (2012) e Microscopia de varredura (MEV) do Lodo do RBS. |

LOCAL DE ESTUDO

O sistema descentralizado de tratamento de esgotos objeto deste estudo está no Município de Curitiba, em empreendimento comercial, com certificação ambiental *Leadership in Energy e Environmental Design* – LEED, categoria O+M Platinum (LEED, 2018). O sistema de tratamento de esgoto está em operação há mais de quatro anos, com capacidade para atender a geração de esgoto sanitário de 20 funcionários, sendo que, atualmente, trabalham no local, em tempo integral, 14 colaboradores.

O sistema de tratamento funciona em um ciclo fechado, pois o objetivo é a reciclagem de todo o esgoto sanitário gerado para a alimentação das caixas acopladas dos vasos sanitários, conforme apresentado esquematicamente na Figura 1. Não há outro uso deste efluente tratado.

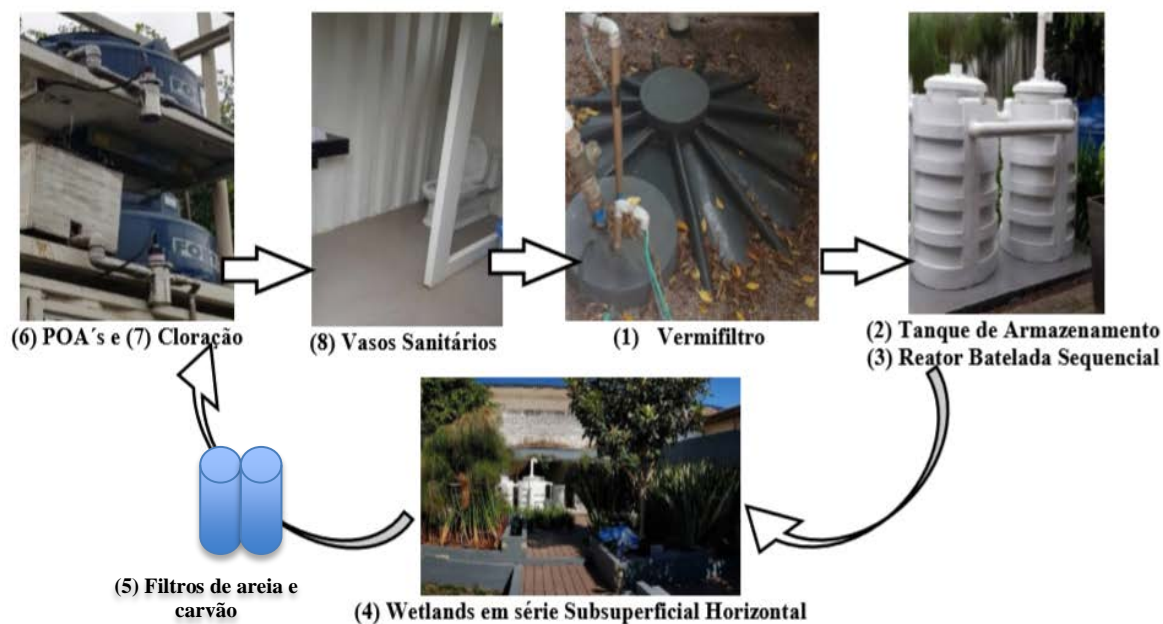


Figura 1- Sistema de Tratamento de esgoto sanitário, em ciclo fechado, visando a reciclagem para alimentação de vasos sanitários.

Fonte: Autor (2018)

ETAPAS DO TRABALHO:

PRIMEIRA ETAPA: Avaliação dos Processos Biológicos e Oxidativos Avançados de tratamento de esgotos doméstico implantados, considerando os aspectos de projeto, construção e operação estabelecidos pelas normas técnicas e literaturas específicas.

Para a caracterização dos sistemas de tratamento, primeiramente foram realizadas visitas técnicas ao sistema implantado. As visitas transcorreram no período de outubro/2017 á Fevereiro /2018, durante as quais foram coletadas informações sobre a construção e operação dos sistemas. Foram realizadas consultas a sites de internet, via e-mail e telefone com empresas que comercializam sistemas similares aos implementados, com o intuito de compreender e detalhar o funcionamento dos sistemas. Os dados obtidos possibilitaram entender a complexidade envolvida nos sistemas implantados, uma vez que, trata-se de um sistema diferenciado. Diante disso, foi realizada pesquisa em referencial teórico e documental sobre temas similares, englobando principalmente artigos e publicações recentes.

RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

O Quadro 2 apresenta um comparativo das características previstas de operação e situação atual observadas do sistema de tratamento implantado, considerando o Vermifiltro, tanque de Armazenamento e Reator Aeróbio em batelada sequencial.

QUADRO 2 – Comparativo das características previstas de operação e situação atual de operação observada nas visitas técnicas.

| | Características Previstas de Operação | Situação atual de operação observada |
|--|--|--|
| Vermifiltro | Composto por uma única câmara com capacidade para 300 litros, na qual estão dispostas quatro camadas de mantas de fibras PET espaçadas em 5 cm cada. Acima da última camada de manta PET são colocados solo com a presença de microrganismos e minhocas do tipo californianas. Segundo o fabricante as camadas presentes no vermifiltro são responsáveis por separar a fração sólida e líquida presente no efluente, de forma que o material orgânico fique retido e seja digerido pelas minhocas e microrganismos, enquanto a fração líquida é direcionada para parte inferior da câmara, que por meio do acionando a bomba submersa recalca o volume o tanque de Armazenamento (TA). | Durante a realização da pesquisa não houve possibilidade de acesso ao vermifiltro, uma vez que, o sistema é enterrado no solo e sem possibilidade de abertura, diante disso não foi possível observar o interior do vermifiltro, caracterizar a situação atual das camadas de manta de Fibra PET, microrganismos e minhocas atuantes no sistema. Aliado a isso se destaca que não foram encontrados na literatura, vermifiltros com a configuração similar ao implantado no sistema de tratamento. O sistema não é citado em normas e regulamentações, o que dificulta um comparativo do sistema implantado considerando aspectos de operação estabelecidos por normais e literaturas específicas. |
| Tanque de Armazenamento (TA) | Formato cilíndrico, capacidade para 860 litros e tem a função de armazenamento e equalização do esgoto (regularização de vazão e concentração) que vem do vermifiltro. O tanque de aeração recebe o volume de 250 Litros de efluente que é bombeado do vermifiltro e vai armazenando até a finalização do tempo de ciclo total do RBS. De modo que o sistema possui um tempo de detenção de aproximadamente o tempo de ciclo do RBS, ou seja, 6 horas. Também neste tanque está previsto o descarte do lodo excedente do reator aeróbio - RBS. | Em função do tempo de permanência do esgoto e do lodo excedente presente, considerando também que não há sistema de mistura para a equalização da concentração e que o sistema é totalmente fechado, possivelmente há neste tanque uma degradação anaeróbia, o que, provavelmente, o torna um sistema semelhante ao tanque séptico. Esta observação foi obtida por meio da comparação entre as descrições em literatura sobre de tanque de equalização (METCALF; EDDY, et al., 2016) e fossa séptica (NBR 7229 e 13969). |
| Reator Aeróbio em Bateladas Sequenciais (RBS) | No RBS o tratamento aeróbio ocorre por meio de microbolhas introduzidas por difusores posicionados no fundo do reator. Com quatro ciclos diários, e tempo total de cada ciclo de 6 horas, sendo: 8 minutos de enchimento para o volume de 250 litros, 250 minutos de aeração, 93 minutos de sedimentação, 8 minutos de descarga e 1 minuto de descarte de Lodo em Excesso. O sistema só realiza descarte de lodo após atingir o limite mínimo de armazenamento de 200 mg/L de lodo biológico. | O efluente tratado na descarga do RBS, apresenta turbidez incompatível com sistema de tratamento aeróbio. A realização do redimensionamento do RBS conforme as condições de operação atual e com dados conforme descritos na literatura, indicam uma relação A/M elevada. A elevada relação A/M pode ser indicativa de menor remoção de DBO, podendo resultar em excesso de substrato no efluente final (VON SPERLING, 2014). Além da eficiência do sistema a relação A/M está diretamente atrelada a qualidade de sedimentabilidade do Lodo. De modo que o valor de A/M obtido, associado ao índice volumétrico de lodo IVL obtido por meio da técnica do cone Imhoff, e determinação de série de sólidos suspensos por gravimetria, possivelmente classifica a sedimentabilidade como ruim (valor de IVL entre 200 e 300). O RBS não está realizando descarte de lodo excedente. |

Fonte: Autor (2018)

Os Sistemas de Wetlands Construídos implantado ocupam uma área de 16,4 m² e profundidade média de escoamento de 17 cm, utilizando três espécies distintas de plantas ornamentais: *Cyperus papyrus* (Papiro), *Iris*

sibirica (Iris) e *Phormium tenax* (Fórmio). O sistema de *Wetland* é diferenciado, uma vez que as plantas são suportadas por um “ecodreno”, uma estrutura em formato de cone, feita de plástico reciclado muito resistente à sobre carga. Os cones são preenchidos internamente com argila expandida. A Figura 2 apresenta um esquema do sistema implantado, incluindo os ecodrenos, adaptados a este sistema de tratamento com *wetlands*, pois foram projetados para compor sistemas de captação de água de chuva em telhados verdes.

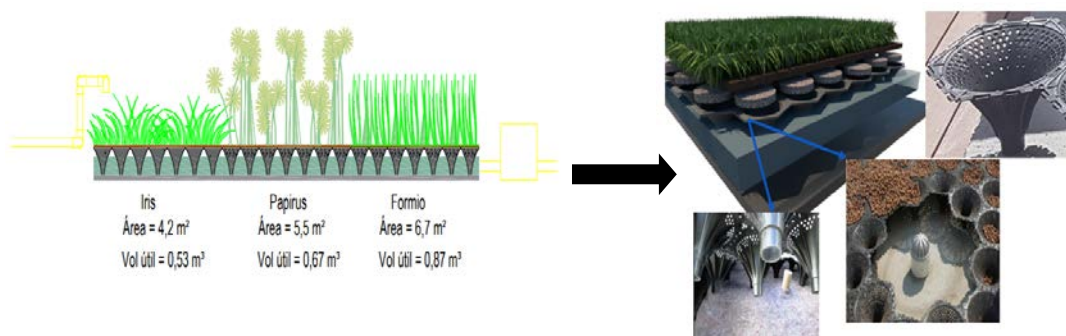


Figura 2- Representação esquemática das Wetlands com os Ecodrenos e volume útil.
 Fonte: Autor (2018)

Observa-se que a argila expandida foi colocada acima do nível que o efluente percola horizontalmente, não podendo ser considerada como um meio filtrante. Os *Wetlands* possuem uma alimentação (recebimento do esgoto do RBS) e descarga (saída dos *Wetlands* para os Processos oxidativos avançados) diferenciada. O RBS envia quatro ciclos diários de 250 L cada, totalizando um volume diário de 1000 L, porém, o efluente da *Wetlands* só sai do sistema quando há demanda, ou seja, quando os reservatórios de água de reciclagem estão com nível mínimo para o abastecimento dos vasos sanitários. Neste trabalho foram determinadas as áreas e volumes úteis de cada wetland, divididos em função do tipo de vegetação plantada no sistema (Iris, Papirus e Formio). Em todos os sistemas foram desconsiderados o volume correspondente ao espaço ocupado pelos cilindros dos cones. A *Wetland* com Iris tem uma área de 4,2 m² e um volume útil de 0,53 m³; a segunda *Wetland* com Papirus tem uma área de 5,5 m² e volume útil de 0,67 m³ e a última wetland constituída com Formio tem área de 6,7 m² e volume útil de 0,87 m³. Destaca-se que a última *wetland*, pode também estar funcionando como um reservatório, uma vez que o sistema só recircula de acordo com a demanda, ou seja, em função da capacidade de tratamento do POA e reservação de água de reciclagem.

Após passar pelos *Wetlands* construídos, o efluente segue para a última etapa do tratamento, um Filtro de polipropileno e carvão ativado de cinco (5) micras, seguido por processo oxidativo avançado - POA. Sendo esse último realizado com a combinação de peróxido de hidrogênio H₂O₂, ozônio O₃ e irradiação UV. Por meio de uma bomba dosadora acoplada ao compartimento contendo H₂O₂, o sistema quando acionado, introduz 500 ml de H₂O₂ para a caixa de água com capacidade para 500 litros. Da mesma forma um compressor introduz ar, ativando o gerador de ozônio O₃, esse então é enviado para a mesma caixa de água em conjunto com o H₂O₂. Combinado a esse sistema uma lâmpada UV de 39 W de potência e comprimento de onda de 184 nm é acionada, introduzindo irradiação ao sistema. Destaca-se também que, dependendo da qualidade visual do efluente tratado, há introdução de cloro cuja concentração é aleatória.

SEGUNDA ETAPA: Avaliação da eficiência dos sistemas de tratamento quanto aos aspectos de operação e controle.

Durante as visitas técnicas foram observados os melhores locais para a realização das coletas de amostras, visando à realização de análises físicas, químicas e biológicas do efluente, de modo que as amostragens representassem o objetivo dessa etapa da pesquisa, de avaliação do desempenho dos sistemas de tratamento. Diante disso as coletas de amostras de esgotos foram realizadas nos sistemas de tratamento, conforme apresentado na Figura 3. Conforme já descrito anteriormente, devido à indisponibilidade de local livre para a coleta de material do vermifiltro, a coleta de amostras proveniente desse sistema precisou ser adaptada, por meio do acionamento forçado da bomba de nível do vermifiltro, sendo a coleta realizada na entrada do tanque de armazenamento.

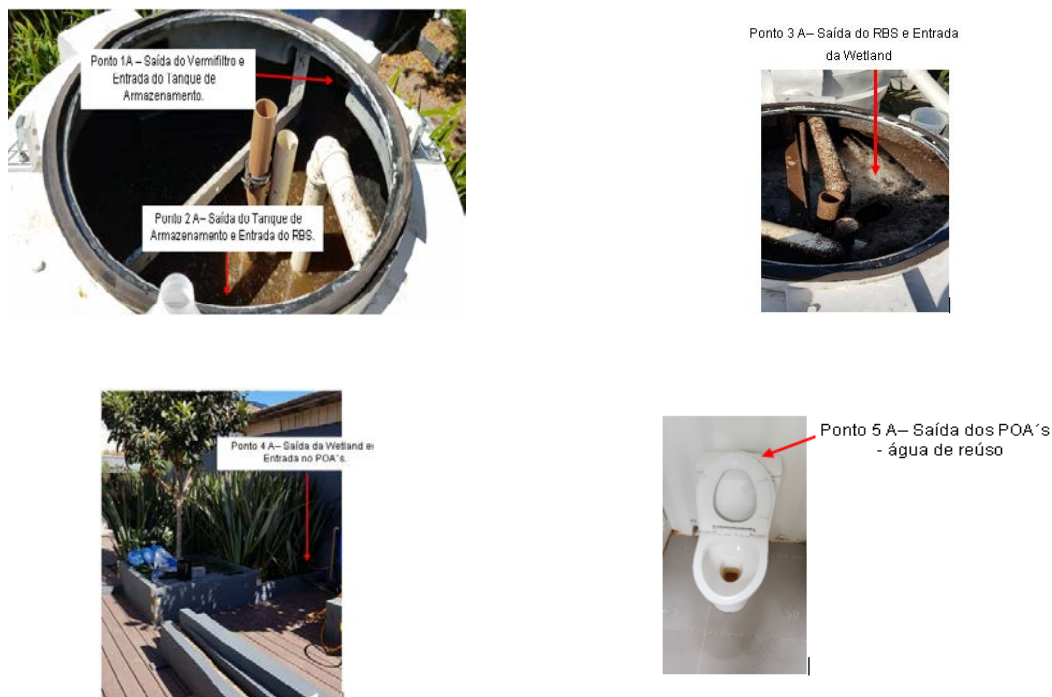


Figura 3 – Pontos de coletas de amostras do Sistema estudado.
FONTE: AUTOR (2018)

As análises físico-químicas foram realizadas conforme metodologia proposta pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2012), e realizadas as no LABEAM - Laboratório de Engenharia Ambiental Francisco Borsari Netto e no BIOSAN Laboratório de Biologia Molecular Aplicado ao Saneamento, ambos localizados no DHS do centro politécnico da Universidade Federal Paraná (UFPR). Já as análises biológicas, foram realizadas por meio de Microscopia eletrônica de varredura (MEV) no centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

As concentrações médias obtidas nos ensaios físico-químicas e biológicas do efluente coletado dos processos de tratamento implantado atuando em ciclo fechado e com a adição de Processos Oxidativos avançados (POA), estão apresentadas na Figura 4.

O Processo de Oxidativo Avançado – POA vem sendo utilizado com frequência em sistema de reúso de água, porém, mais aplicado para água cinza. Neste trabalho pesquisado, o POA faz parte de um sistema de tratamento envolvendo processos biológicos que opera totalmente em fluxo fechado. Após passar pelo POA formado por $H_2O_2/O_3/UV$, a água tratada, denominada aqui de reciclada, é utilizada nos vasos sanitários, cujas características físico-químicas, do efluente indicam um excesso de produto principalmente peróxido de hidrogênio (H_2O_2).

O pH da água reciclada apresentou valores médios de $3,0 \pm 1,27$, ou seja, acidificada e ausência de total de alcalinidade. Segundo GAMEIRO et al. (2012), o efluente do tratamento por POA formado por $H_2O_2/O_3/UV$, pode apresentar características ácidas, em função de residual de hidrogênio presente no meio, e quando dosagem excessiva de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) são adicionados, ocorre a formação de ácidos como, por exemplo, ácido acético, propiônico e butírico (comum na etapa de acidogênese da digestão anaeróbia). Esta dosagem de H_2O_2 em excesso também interfere nos resultados da DQO, cuja média obtida foi de (1.464 ± 2394) mg/L, enquanto que a DBO foi de 1,0 mg/L, indicando a ausência quase que total de matéria orgânica.

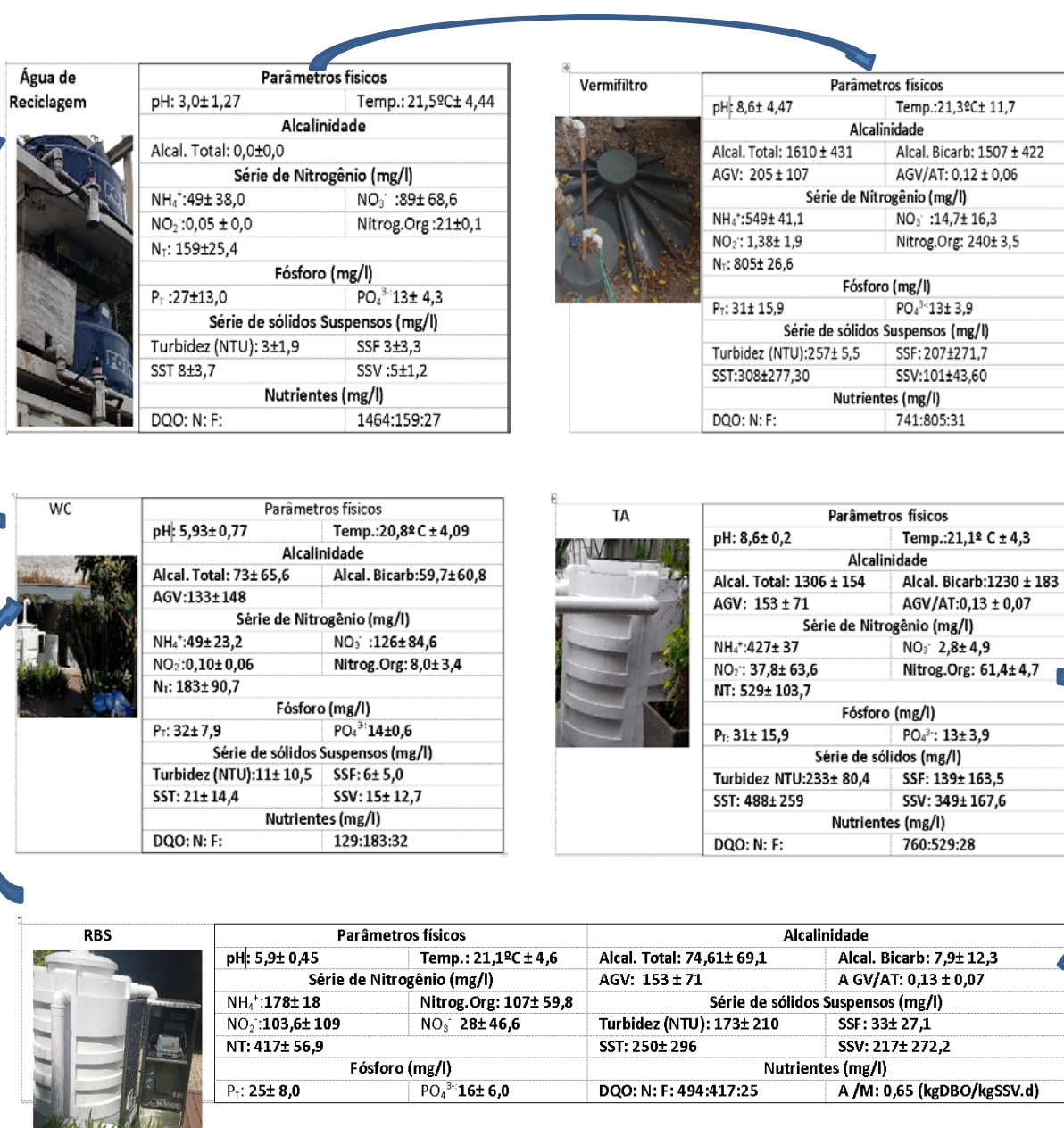
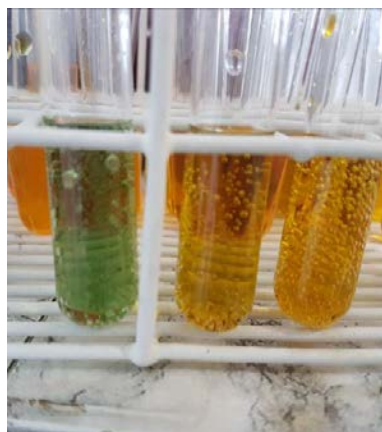


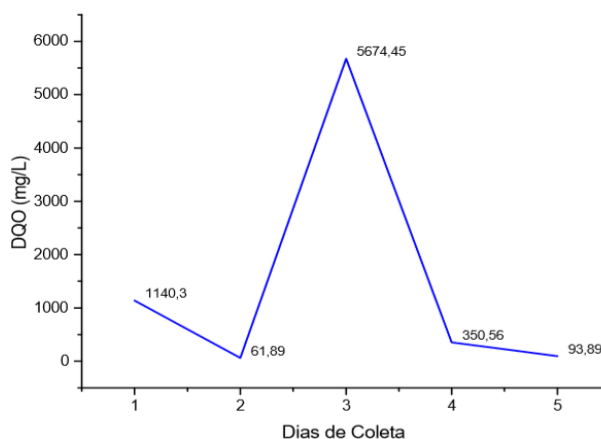
Figura 4- As concentrações médias obtidas nos ensaios físico-químicas e biológicas do efluente coletado dos processos de tratamento implantado atuando em ciclo fechado e com a adição de Processos Oxidativos avançados (POA)

Segundo Rabello (2014), um residual de H₂O₂ acima de 50 mg.L⁻¹ causa acréscimo na DQO, tal fato corrobora com a informação do operador do sistema estudado, de injeção de valores entre 50 a 60 mg.L⁻¹ de H₂O₂ no POA. Para Momenti (2006), em comparação com muitos outros agentes oxidantes o peróxido de hidrogênio não introduz no sistema de tratamento substâncias adicionais que possam interferir no processo, a não ser água, contudo o residual de peróxido pode prejudicar um posterior tratamento biológico, sendo tóxico aos microrganismos.

A Figura 5a, apresenta a reação durante a análise de DQO, formando microbolhas. Na figura 5b é possível observar a interferência, que está diretamente relacionada a dosagem do POA e o tempo de reação no sistema durante a coleta.



(a)



(b)

Figura 5- (a) Interferência de possível residual de H₂O₂ em DQO das amostras após adição dos POA e (b) gráfico com concentrações de DQO obtidas nas análises laboratoriais de amostras de Água de Reciclagem.

FONTE: o Autor (2018).

Momenti (2006) ainda cita que, embora a adição de peróxido em processos combinando H₂O₂ e ozônio O₃, aumente a transferência do ozônio da fase gasosa para a fase líquida, um excesso de peróxido de hidrogênio também pode limitar a formação de hidroxila e reduzir a eficiência do processo, havendo então, uma dosagem ótima de aplicação do H₂O₂ para que ocorra a eficiência do tratamento. O autor destaca que, embora os processos oxidativos avançados (POA), combinando H₂O₂ e ozônio O₃ apresentem viabilidade econômica, os subprodutos das reações precisam ser melhores estudados.

De modo similar, um estudo com POA - UV/H₂O₂ aplicado como pós-tratamento de águas residuárias da indústria de papel e celulose realizado por Giroletti (2017), também indicou a presença de subprodutos ou compostos intermediários, os quais, segundo o autor, precisam ser investigados e identificados por meio de mais pesquisas.

Destaca-se, também, que neste sistema com POA houve remoção de nitrogênio na forma de nitrato, aumentando o nitrogênio orgânico, conforme apresenta a Tabela 1. Diferentemente do que cita a literatura, não houve remoção da amônia por meio da oxidação direta com o radical hidroxila formando vários compostos nitrogenados, entre eles composto iônicos como nitrito e nitrato (BRITO et al, 2010), o que houve foi a remoção de nitrato, cujo afluente apresentava valores médios de 126± 84,6 mg/L e no efluente estes valores foram de 89± 68,6 mg/L.

No efluente do vermifiltro e no tanque de armazenamento, o pH foi de (8,6± 4,47 e 8,6± 0,2), respectivamente, considerando que na saída do PO, afluente do vermifiltro, o pH médio foi 3,0±1,27. Nestes sistemas, vermifiltro e tanque de armazenamento, colocados em série, verifica-se geração de alcalinidade total e bicarbonato, ou seja, o ácido gerado no POA pode estar sendo consumido nestes sistemas, sendo transformado em acetato e contribuindo para a geração de alcalinidade e tamponamento do meio. Este tipo de reação é comum em sistemas anóxicos e/ou anaeróbios. Além disso, os valores altos de pH e alcalinidade podem ser indicativos de ocorrência de processo de desnitrificação no meio, que segundo Metcalf e Eddy (2016), o pH é parcialmente aumentado durante a desnitrificação no período anóxico, com o acréscimo de alcalinidade. A alcalinidade após o POA era praticamente nula, mas após o vermifiltro foi de 1.610 ± 431 CaCO₃/L para alcalinidade total e 1.507 ± 422 CaCO₃/L para alcalinidade à bicarbonato. Também foi avaliada a formação de ácidos graxos voláteis – AGV, cujos valores encontrados são de (205 ± 107 ch₃cooh/L) no vermifiltro e (153 ± 71 ch₃cooh/L) no tanque de armazenamento.

Portanto, os resultados obtidos nas análises físico-químicas do efluente do vermifiltro e do Tanque de armazenamento, aplicados neste sistema, indicam que estão atuando como sistemas anaeróbio. Além disso, a presença de ácidos voláteis totais em condições de equilíbrio, pode ser outro indicativo de atuação dos sistemas como um filtro anaeróbio ou sobre condições anóxicas e com bom desempenho, pois, segundo Gerardi (2003), para que sistemas anaeróbios se mantenham estáveis, as concentrações de AGV deve estar entre 50 a 500

mg/L. Ou seja, muito diferente do princípio de funcionamento de um vermifiltro convencional, que segundo Madrid (2016), atua como filtros biológicos aeróbios, uma vez que as minhocas atuantes no sistema constroem túneis que favorecem a transferência de oxigênio durante a alimentação e, consequentemente a aeração das camadas.

Avaliando o nitrogênio na entrada e saída do vermifiltro pode-se observar que há um elevado aumento do nitrogênio amoniacal e redução de nitrato, possivelmente por desnitrificação. Tal fato, pode indicar que por se tratar de um sistema filtração biológica, sem controle de vazão, a maior fração da parcela sólida do esgoto, contendo materiais particulados orgânicos e inorgânicos (entre eles amônia), ficam retidas ou são adsorvidos pela biomassa do vermifiltro, que por suas características apresentadas neste estudo, atua como filtro anaeróbio e, portanto, a nitrificação não é alcançada. O nitrogênio amoniacal também é liberado quando há aumento de alcalinidade em vermiltros.

Como não há controle de vazão, de velocidade de escoamento e, consequentemente, tempo de detenção hidráulica, pode ser que, dependendo do tipo de descarga (uma vez que se utiliza caixa acoplada com dois volumes e velocidades de descarga para o vaso sanitário), esteja ocorrendo carreamento ou arraste do material acumulado nas camadas do vermifiltro para as outras etapas do sistema de tratamento, como por exemplo, tanque de aeração. Como se fosse uma “lavagem” das camadas, pois também observou-se o desprendimento de fragmentos de manta de fibra PET, usado como recheio no vermifiltro, o que pode ter resultado na geração de SSF que teve um aumento de $3 \pm 3,3$ mg/L (afluente) para $207 \pm 271,7$ mg/L (efluente do vermifiltro).

Madrid (2016) observou que, no vermifiltro que ele utilizou para o tratamento de esgoto bruto, ocorreram grandes picos de vazão de saída logo nos primeiros minutos após a descarga sanitária, ocasionando arraste de materiais particulados que interferiram negativamente na eficiência de remoção de poluentes pelas unidades.

Do tanque de armazenamento o efluente é encaminhado, em bateladas sequencias de 6 horas, para o tanque de aeração – RBS, tratamento aeróbio, onde o oxigênio é inserido no fundo do tanque. O pH médio de entrada é de $8,6 \pm 0,2$, favorece sistema biológicos quanto à remoção de matéria orgânica e nutrientes. Porém, observou-se que em relação à DQO e ao COD, as concentrações no efluente ainda podem estar sendo influenciadas pelos subprodutos ou produtos intermediários do POA, e não foram consideradas. Após a batelada (RBS) o efluente apresentou pH mais ácido ($5,9 \pm 0,45$), baixa alcalinidade total e a bicarbonato ($74,61 \pm 69,1$ e $7,9 \pm 12,3$, respectivamente).

No RBS, em relação à DBO a eficiência de remoção de matéria orgânica foi de aproximadamente 80%. Nos sistemas com plantas ornamentais, subsuperficial e fluxo horizontal, a eficiência de remoção de matéria orgânica, medida em DBO, ficaram em torno de 39%, já em DQO foi de aproximadamente 56% e em COD alcançando 63%. A remoção de matéria orgânica, em DBO, só é praticamente completa após o POA. A Tabela 1 apresenta os valores de concentração de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo no efluente das unidades que compõe o sistema de tratamento.

Tabela 1 – Concentrações de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo no efluente das unidades que compõe o sistema de tratamento para reciclagem em ciclo fechado.

| PARÂMETRO | EFLUENTE | | | | |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | POA | VERMIFILTRO | TA (mg/L) | RBS | WC |
| DQO filtrada | $538 \pm 365,3$ | $540 \pm 283,6$ | $456 \pm 152,5$ | $379 \pm 222,3$ | $198 \pm 141,5$ |
| DBO | $1 \pm 1,4$ | $360 \pm 14,1$ | $420 \pm 77,5$ | $85 \pm 28,9$ | $52 \pm 39,4$ |
| COD | $62 \pm 40,7$ | $209 \pm 44,0$ | 212 ± 101 | $134 \pm 100,5$ | $47 \pm 11,1$ |
| N. Amoniacal - NH_4^+ | 49 ± 38 | $549 \pm 41,1$ | $427 \pm 37,0$ | $178 \pm 18,0$ | $49 \pm 23,2$ |
| Nitrito - NO_2^- | $0,05 \pm 0,00$ | $1,38 \pm 1,9$ | $37,8 \pm 63,6$ | $103,6 \pm 109,0$ | $0,10 \pm 0,06$ |
| Nitrato - NO_3^- | $89 \pm 68,6$ | $14 \pm 16,3$ | $2,8 \pm 4,9$ | $28 \pm 46,6$ | $126 \pm 84,6$ |
| Nitrogênio Orgânico | $21 \pm 0,1$ | $240 \pm 3,5$ | $61,4 \pm 4,7$ | $107 \pm 59,8$ | $8,0 \pm 3,4$ |
| N- Nitrogênio total - N_T | $159 \pm 25,4$ | $805 \pm 26,6$ | $529 \pm 103,7$ | $417 \pm 56,9$ | $183 \pm 90,7$ |
| Fósforo Total - P_T | $27 \pm 13,0$ | $31 \pm 15,9$ | $31 \pm 215,9$ | $25 \pm 8,0$ | $32 \pm 7,9$ |
| Ortofosfato - PO_4^{3-} | $13 \pm 4,3$ | $13 \pm 3,9$ | $13 \pm 3,9$ | $16 \pm 6,0$ | $14 \pm 0,6$ |

Nesta etapa do processo (RBS) pode-se verificar que a maior parcela de nitrogênio amoniacal foi convertida em nitrito (nitrificação parcial), e uma parcela menor alcançou nitrificação total. A maior parcela da nitrificação completa ocorreu no sistema de *wetland* construída de fluxo horizontal - WC, que normalmente apresenta-se mais anóxica, segundo a literatura. Porém, provavelmente, devido a quantidade de oxigênio inserido no meio líquido, durante a etapa de reação no RBS, e que foi transferido em batelada para o WC, resultou em maior remoção de amônia e, principalmente, do nitrito transferido do RBS para o WC, completando o processo de nitrificação do meio, resultando para o POA maior concentração de nitrato, que só foi removido no vermifiltro, como citado anteriormente.

Destaca-se que, esta condição de nitrificação observada nos processos RBS e WC, pode ser confirmada com o consumo de alcalinidade total e a bicarbonato no sistema e pelos valores baixos de pH, uma vez que a nitrificação requer o consumo de oxigênio livre, com liberação de H^+ , consumindo a alcalinidade do meio e, possivelmente, reduzindo o pH (VON SPERLING, 1996). A alcalinidade total foi de $74,61 \pm 69,1$ $CaCO_3/L$ no RBS e $73 \pm 65,6$ $CaCO_3/L$ no WC e alcalinidade a bicarbonatos foi de $7,9 \pm 12,3$ $CaCO_3/L$ no RBS e $59,7 \pm 60,8$ $CaCO_3/L$ no WC.

Embora o sistema de tratamento (biológico e POA) consiga remover quase que 100% da matéria orgânica carbonácea em DBO, é a fração de nitrogênio e fósforo que preocupa. Esta fração de alguma forma se acumula no sistema e, está indicando desequilíbrio, podendo levar, em algum momento o sistema ao colapso, uma vez que é totalmente fechado, não havendo previsão de descarte ou purga do efluente tratado. Observa-se, principalmente no RBS, que opera como um sistema de lodos ativados, um indicativo de deficiência nutricional dos microrganismos presentes em sistemas aeróbios, que pode estar correlacionado com desenvolvimento da biomassa. Para avaliar a biomassa presente no RBS foi realizada a análise de cone Imhoff do lodo e de Microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme Figura 6 (a, b, c e d).

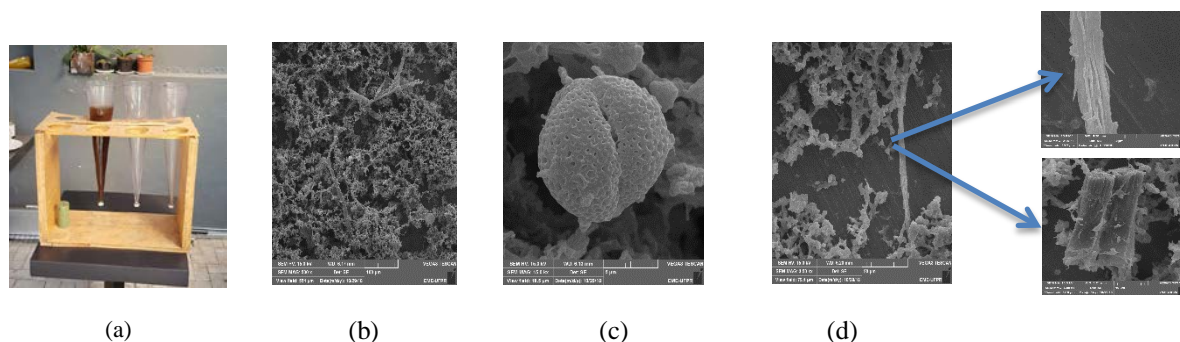


Figura 6 - Imagens obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em amostra de sólidos sedimentáveis do RBS, (a) Análise de sólidos sedimentáveis por meio da técnica de cone Imhoff, (b) Flocos do lodo ativado, (c). Imagem similar a um grãos de pólen e (d). Imagem similar a fibras de plásticos, possivelmente carreados do vermifiltro.

FONTE: o Autor (2018).

Conforme a figura 6 (a e b), o floco no RBS não está bem formado, tem aspecto esponjoso e pouca sedimentação. Não foram observadas imagens semelhantes a filamentosas, protozoários e rotíferos. Também não foi possível observar espécies semelhantes as bactérias nitrificantes. Cabe destacar, que não foi feita análise do lodo do WC, pela dificuldade de coleta. Mas, durante a coleta de amostras do lodo do tanque de armazenamento e no RBS observou-se a presença de fragmentos de minhocas, que durante a análise de MEV pode-se observar microrganismos com formatos semelhantes a anelídeos.

Segundo Branco (1986), os anelídeos são os metazoários menos frequentes em lodos ativados. Entretanto, a presença desses microrganismos no sistema pode estar relacionada ao transporte de minhocas juntamente com o efluente do sistema de vermifiltração. Além dos anelídeos, durante a MEV foi observada formas semelhantes a fibras de plástico, conforme Figura 6d, o que também pode ter resultado na alta concentração de sólidos suspensos fixos observado no efluente do vermifiltração, como citado anteriormente. Quanto às imagens com formas semelhantes à grãos de pólen (Figura 6c) podem ser da vegetação que compõe as *Wetlands* construídos implantadas aos sistemas de tratamento.

Portanto, diante dos resultados apresentados das análises físico-químicas e MEV, há um indicativo de que, possíveis interferências estão ocorrendo no sistema, possivelmente pela presença do POA, o qual está mantendo um residual de H_2O_2 e outros subprodutos. Também em função do ciclo fechado, está ocorrendo acúmulo de nitrogênio e fósforo, resultando em um sistema para remoção de nutrientes, gerado no próprio sistema de tratamento.

Assim, avalia-se a necessitando de Purga do sistema, ou seja, interrupção do ciclo fechado, cujo intervalo de tempo deverá ser avaliado com mais pesquisas deste tipo de sistema de tratamento visando reciclagem completa. Também sugere-se que ocorra interrupção do POA, por um tempo, até que possa ser observada a formação da biomassa no RBS, para então confirmar se há ou não interferência direta do POA e da forma de operação.

CONCLUSÕES

A combinação de processos biológicos e POA em sistema de tratamento visando reúso ou reciclagem de esgoto sanitário é interessante, mas ainda não há dados na literatura sobre sistemas semelhantes aplicado em condomínios residenciais ou comerciais. Também não é comum ciclo totalmente fechado, sem purga do sistema, o que pode ter resultado, neste caso, em acúmulo de nitrogênio e fósforo no sistema de tratamento.

Outro problema observado é a introdução do vermifiltro para esgoto bruto. Esta concepção pode ter interferido diretamente na relação DBO: N:P no RBS. O vermifiltro também não está atuando como um filtro biológico aeróbio, conforme destaca a literatura, mas os resultados indicaram um sistema anaeróbio ou anóxico (filtro anaeróbio), entretanto, com baixo tempo de detenção e picos de vazões. Também os resultados indicaram interferência de subprodutos ou excesso de H_2O_2 .

Neste contexto, os resultados obtidos indicam que, embora a implementação de processos de reciclagem de esgoto sanitário por meio da combinação de sistemas descentralizados de tratamento seja uma alternativa interessante, tal como incentiva o LEED, esses processos carecem de maiores estudos acerca da combinação de sistemas biológicos e processos oxidativos avançados (POA), bem como o monitoramento acerca do desempenho do tratamento no longo prazo, a fim de minimizar principalmente riscos sanitários.

Portanto, torna-se vantajoso a inclusão no escopo das certificações ambientais de acompanhamento dos empreendimentos, pós - construção e operação, objetivando a manutenção da sustentabilidade dos empreendimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. New York: 21th Ed. 2012.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos: NBR 7.229. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Tanques sépticos: unidade de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos: Projeto, construção e operação: NBR 13.969. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
4. BRANCO, S.M. Hidrobiologia Aplicada à Engenharia Sanitária. 3 ed. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986. 640 p.
5. BRITO, N.N.; BROTA, G.A.; PELEGRINI, R.T.; PATERNIANI, J.E. Fotocatálise Heterogênea (TiO_2/UV) para o tratamento de percolado de aterro sanitário. In: IX Latin American Symposium on Environmental and Sanitary Analytical Chemistry. Salvador- Brazil, 2011.
6. CORBELL, O; YANNAS, S. Em Busca de Uma Arquitetura Sustentável Para os Trópicos: conforto ambiental. 1.ed. Rio de Janeiro: Revan, 2003.
7. SOUSA, V. CLARO, J.L. PEREIRA, A.L. AMARAL, L. CUNHA-SILVA, B. DE CASTRO, M.J. FEIO, E. PEREIRA, P. GAMEIRO, Synthesis, characterization and antibacterial studies of a copper(II) levofloxacin ternary complex, J Inorg Biochem 110 (2012).
8. GIROLETTI, C.L. Processo oxidativo avançado uv/h_2o_2 aplicado como pós-tratamento de águas residuárias da indústria de papel e celulose. 2017. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

9. MADRID, F. J. P. L. Aplicação da vermifiltração no tratamento de esgoto sanitário – Dissertação de Mestrado Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. 131p. Universidade Estadual de Campinas, 2016.
10. MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. (Editores). Reúso de água. Barueri: Ed. Manole, 2003.
11. METCALF; EDDY. Wastewater engineering treatment disposal reuse. 4. ed. Revised by G. Tchobanoglous, F. Burton e D. Stensel. New York: McGraw Hill Book, 2014.
12. MOMENTI, T.J. Processo anaeróbio conjugado com processos oxidativos avançados (POA) no tratamento dos efluentes do processo industrial de branqueamento da polpa celulósica. 2006. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
13. RABELO, M. D. Application of Photo-Fenton Process for the Treatment of Kraft Pulp Mill Effluent. Advances In Chemical Engineering And Science, v.04, n. 04, p.483-490, 2014.
14. RODRIGUES, Maria Zélia Matos Dantas. Evolução do Uso e Ocupação do Solo do Conjunto Brigadeiro Eduardo Gomes. São Cristóvão, Se: UFS, 2005. 91p. Monografia de Bacharelado em geografia.
15. SARTORI, S.; LATRÔNICO, F.; CAMPOS, L. M. S. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: Uma taxonomia no campo da literatura. Ambiente & Sociedade, v. 17, n. 1, p. 1-22, 2014.
16. SÃO PAULO. Resolução conjunta SES/SMA/SSRH Nº 01 de 28 de junho de 2017. Disciplina o reúso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário e dá providências correlatas. Governo do Estado de São Paulo, 2017.
17. VIEIRA, L. A; BARROS F, MAURO, N. M. A emergência do conceito de Arquitetura Sustentável e os métodos de avaliação do desempenho ambiental de edificações. Humanæ, v.1, n.3, p. 1-26, dez. 2009.
18. VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 4. Lodos ativados. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. 415 p. 1996
19. VON SPERLING, M. 2014. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. Vol 01. 4ª Edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UFMG).
20. WCED, WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. Our Common Future. Oxford: Oxford University Press, 1987.
21. UNITED STATES GREEN BUILDING COUNCIL. LEED Green Building Rating System For New Construction e Major Renovations Version 2.2 - For Public Use and Display.