

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

CAMPUS DO SERTÃO

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LEANDRO MARINHO DAMASCENO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO SENTIDO DE ESCOAMENTO NO DESEMPENHO
DE REATORES ANAERÓBIOS NA REMOÇÃO DE SÓLIDOS UTILIZANDO PNEU
TRITURADO COMO SUPORTE PARA IMOBILIZAÇÃO CELULAR**

DELMIRO GOUVEIA – AL

2019

LEANDRO MARINHO DAMASCENO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO SENTIDO DE ESCOAMENTO NO DESEMPENHO
DE REATORES ANAERÓBIOS NA REMOÇÃO DE SÓLIDOS UTILIZANDO PNEU
TRITURADO COMO SUPORTE PARA IMOBILIZAÇÃO CELULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus do Sertão, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. Dr. Antônio Pedro de Oliveira Netto

DELMIRO GOUVEIA – AL

2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza – CRB-4/2209

D155a Damasceno, Leandro Marinho

Análise da influência do sentido de escoamento no desempenho de reatores anaeróbios na remoção de sólidos utilizando pneu trirurado como suporte para imobilização celular / Leandro Marinho Damasceno. - 2019.

45 f. : il.

Orientação: Prof. Dr. Antônio Pedro de Oliveira Netto
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2019.

1. Tratamento anaeróbio. 2. Reator anaeróbio de fluxo contínuo. 3. Reator anaeróbio de leito fixo. 4. Resíduos sólidos. I. Título.

CDU: 628.21

Folha de Aprovação

LEANDRO MARINHO DAMASCENO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO SENTIDO DE ESCOAMENTO NO DESEMPENHO DE REATORES ANAERÓBIOS NA REMOÇÃO DE SÓLIDOS, UTILIZANDO PNEU TRITURADO COMO SUPORTE PARA IMOBILIZAÇÃO CELULAR.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
corpo docente do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Alagoas – Campus do
Sertão e aprovado em 08 de agosto de 2019.

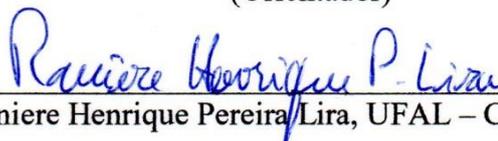


Prof. Dr. Antonio Pedro de Oliveira Netto, UFAL – Campus do Sertão
(Orientador)

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Antonio Pedro de Oliveira Netto, UFAL – Campus do Sertão
(Orientador)



Prof. Dr. Raniere Henrique Pereira Lira, UFAL – Campus do Sertão (Avaliador)



Eng. Thaísa Silva de Oliveira, Secretária do Meio Ambiente, Recursos Hídricos,
Ciência e Tecnologia de Delmiro Gouveia- SEMARHCT (Avaliadora)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me proporcionar paciência, força de vontade e que nunca me deixou desistir nos momentos de maior dificuldade, pois nada tem um propósito sem a presença divina.

Agradeço a minha mãe Rousy Lany, meu pai João Marinho e meu irmão Felipe Marinho, estes que são o motivo de todo meu esforço nestes cinco anos de graduação. Tenham certeza que eu não conseguiria chegar até aqui, sem a motivação que vocês me proporcionam, mesmo que isso não se traduza em palavras. Não sou nada sem vocês.

Agradeço a i9 Engenharia Jr, ao Centro Acadêmico de Engenharia Civil, entidades estas que me fizeram crescer como pessoa e como acadêmico. Em especial, agradeço ao PET Engenharias por todas as oportunidades oferecidas e a todos os petianos que conviveram comigo durante esses três anos de muito aprendizado. Agradeço em especial ao meu tutor e orientador Antonio de Oliveira Netto pelas oportunidades no Laboratório de Saneamento, por toda contribuição no meu desenvolvimento acadêmico durante todos esses anos.

Agradeço a todos que conviveram comigo nesses cinco anos de graduação, em especial a Lane Melo, Letícia Gomes, Lindayane Barbary, Éliton Amorim, Juliano Barbosa e Ericson Alves por toda a paciência e companheirismo, eu sei que não é fácil me aguentar.

Em especial eu agradeço a meus irmãos Rafael Santana, Rafael Alves e Eleilton Jr por todo o companheirismo e fraternidade durante esses 5 anos. Vocês foram fundamentais na minha vida acadêmica e pessoal. É tanto que eu digo para todo mundo que eu não sei o que seria de mim sem vocês. Quero levar vocês para toda a vida.

Também agradeço em especial a João Victor e Rafael Carvalho, estes que junto com os outros Rafaelis, me proporcionaram momentos únicos no Laboratório de Saneamento e contribuíram bastante na construção da minha pesquisa para a elaboração deste trabalho. Ao último Rafael, expressei minha gratidão por ter colaborado no laboratório até o fim da minha pesquisa.

Agradeço aos funcionários da UFAL, em especial ao Herlinho, Adeilton, Marcel e Arnon pela grande colaboração para o funcionamento do Laboratório de Saneamento, sem vocês, minha pesquisa seria inviável.

Agradeço a minha noiva Laura Lavínia por todo o companheirismo, amor e incentivo que não me deixou desanimar quando o desespero bateu ou quando achava que não daria tempo de concluir este trabalho. Você é uma ser humano de luz e pretendo te lembrar disso pro resto da tua vida.

Deixe que apenas soe o teu próprio som.

Feito pelas mentes abertas do lado de cá, do lado bom.

Leandro Marinho

RESUMO

O presente trabalho procurou avaliar a influência do sentido de escoamento na remoção de sólidos totais e suspensos em reatores anaeróbios de fluxo contínuo e de leito fixo usando o pneu triturado como material de enchimento. Dessa forma, foram operados dois reatores anaeróbios de volume de 5,9 litros preenchidos com pneu triturado de granulometria de 2,4 mm e sentidos de escoamento inversos. Devido às limitações laboratoriais, os dois reatores funcionaram em períodos distintos, porém com o mesmo tempo de funcionamento de 1 mês, o que resultou em oito amostras, todas analisadas no Laboratório de Saneamento Ambiental do Campus do Sertão. Os resultados obtidos favoreceram o sentido de escoamento descendente, o qual obteve 47% de remoção de Sólidos Suspensos Totais e 34% de remoção de Sólidos Totais, já para o sentido inverso foram obtidas eficiências para os mesmos parâmetros de 30 e 33%, respectivamente. Durante a análise dos resultados, o sistema de fluxo descendente se mostrou mais estável, ou seja, com menor variação de eficiência de remoção, o que não aconteceu com o reator de sentido inverso, que obteve maior instabilidade devido a problemas operacionais mais frequentes. Comparando os resultados com a literatura consultada, pôde-se concluir que o reator de sentido de escoamento descendente se mostra mais eficiente na remoção sólidos suspensos e totais quando comparado com o reator de sentido de escoamento ascendente, como também, pôde-se concluir que o pneu triturado com 2,4 mm de granulometria não se mostrou um bom material visto que não apresentou barreira física suficiente, justificada pela baixa remoção de Sólidos Totais e Suspensos Fixos.

Palavras-chave: sentido de escoamento; crescimento aderido; reatores anaeróbios.

ABSTRACT

The present work aimed to evaluate the influence of the flow direction on the removal of total and suspended solids in continuous flow and fixed bed anaerobic reactors using the crushed tire as filler. Thus, two 5.9-liter anaerobic reactors were operated, filled with crushed tire with 2.4 mm particle size and reverse flow directions. Due to laboratory limitations, the two reactors operated at different times, but with the same duration of 1 month, resulting in eight samples, all analyzed at the UFAL – Campus do Sertão's Environmental Sanitation Laboratory. The results favored the downward flow direction, which obtained 47% of Total Suspended Solids removal and 34% of Total Solids removal, while in the opposite direction efficiencies were obtained for the same parameters of 30 and 33%, respectively. During the analysis of the results, the downflow system was more stable, that is, with less removal efficiency variation, which did not happen with the reverse direction reactor, which obtained higher instability due to more frequent operational problems. Comparing the results with the consulted literature, it could be concluded that the downflow direction reactor is more efficient in removing suspended and total solids when compared to the upflow direction reactor. The crushed tire with 2.4 mm of particle size was not a good material as it did not have sufficient physical barrier, justified by the low removal of Total Solids and Fixed Suspended.

Keywords: flow direction; adhered growth; anaerobic reactors.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANA – Agência Nacional de Águas

COV – Carga Orgânica Volumétrica

CTEC – Centro de Tecnologia

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FBP – Filtro Biológico Percolador

H_2S – Gás Sulfídrico

NH_3 - Amônia

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez

O – Oxigênio

PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico

PVC – Policloreto de Vinila

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SSF – Sólidos Suspensos Fixos

SST – Sólidos Suspensos Totais

SSV – Sólidos Suspensos Voláteis

ST – Sólidos Totais

STF – Sólidos Totais Fixos

STV – Sólidos Totais Voláteis

TCO – Taxa de Carregamento Orgânico

TDH – Tempo de Detenção Hidráulico

UASB – Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)

UFAL – Universidade Federal de Alagoas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVOS GERAIS.....	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. TRATAMENTO ANAERÓBIO	15
3.2. FILTROS ANAERÓBIOS	18
3.2.1. TIPOS DE FILTROS ANAERÓBIOS.....	18
3.3. FATORES INTERVENIENTES NA DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	21
3.3.1. TEMPERATURA.....	21
3.3.2. pH.....	22
3.3.3. TEMPO DE DETENÇÃO HIDRÁULICA (TDH).....	23
3.3.4. CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA (COV).....	23
3.3.5. SENTIDO DE ESCOAMENTO	24
4. METODOLOGIA.....	25
4.1. REATORES ANAERÓBIOS	25
4.2. MEIO ADERENTE	27
4.3. OPERAÇÃO DO SISTEMA	27
4.4. ENSAIOS.....	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
6.1. PRINCIPAIS DIFICULDADES.....	43
6.2. SUGESTÕES.....	43
REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), o Brasil detém cerca de 53% da água de toda a América Latina e 12% da água mundial, porém a gestão deste recurso se mostra bastante preocupante. Quando se trata de país em desenvolvimento, segundo dados da Organização das Nações Unidas mostram que problemas relacionados a qualidade de água aparecem em 80% das mortes e enfermidades.

No que se diz respeito a coleta e tratamento de esgoto brasileiro, os dados são preocupantes. Segundo estudo realizado em 2017 pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) somente 47,6% dos esgotos gerados são coletados, e somente 46% passam por tratamento. Para o Nordeste, os índices de coleta e tratamento são de 26,9 e 34,7% respectivamente.

Dados da ANA mostram que, em todo Brasil, mais de 110.000 km de trechos de rio estão com qualidade comprometida devido a altas cargas orgânicas, dentro destes, 83.450 km não é mais permitido realizar captação para abastecimento público e nos quilômetros restantes é permitida a captação apenas com tratamento avançado.

Estes dados reforçam a necessidade de investimentos em alternativas de tratamento de esgoto de modo a baratear e tornar os sistemas mais eficientes. Dentre as alternativas mais usadas, destaca-se os reatores anaeróbios devido a sua simplicidade de operação e baixo custo energético. De acordo com Chernicharo (2016), tecnologias de digestão anaeróbia se mostram uma ótima alternativa, atendendo aos requisitos citados, mostrando larga aplicabilidade e adequando-se bem as características ambientais do país.

Dentro das tecnologias de digestão anaeróbia destaca-se o reator de manta de lodo (UASB) e o reator anaeróbio de leito fixo mais conhecido como filtro biológico. Os estudos relacionados a essas tecnologias vem mostrando boas eficiências de remoção de matéria orgânica de efluentes domésticos, porém em muitas vezes essa alternativa, em relação as necessidades gerais, necessita de pós tratamento para atender as exigências da legislação.

A necessidade da conservação dos recursos hídricos e a garantia da oferta futura de água de boa qualidade ressaltam a importância da análise da destinação dos efluentes de mecanismos de tratamento para além do lançamento em corpos hídricos, buscando melhorar a qualidade dos mesmos e aumentar a disponibilidade de água.

Dentro dos parâmetros que medem a qualidade da água, pode-se citar os sólidos totais e suspensos. Esses parâmetros, em concentrações elevadas, podem influenciar na turbidez de corpos hídricos. O aumento da turbidez numa água pode alterar suas características organolépticas como aparência, cor, sabor e odor e lhe conferir rejeição para fins de potabilidade

Dessa forma, o presente trabalho pretende analisar a influência do sentido de escoamento de um reator anaeróbio de leito fixo na remoção de sólidos totais e suspensos utilizando pneu triturado como material de enchimento.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Comparar o desempenho em relação a remoção de sólidos e turbidez de dois reatores anaeróbios com sentidos de escoamento inversos, utilizando pneu triturado, um material reciclável causador de grandes impactos ambientais, como material suporte.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar o quanto que o sentido de escoamento de um sistema anaeróbio pode interferir no desempenho final do reator;
- Verificar a influência do sentido de escoamento na remoção de turbidez;
- Verificar a influência do sentido de escoamento na remoção dos parâmetros da série de sólidos;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. TRATAMENTO ANAERÓBIO

O tratamento de esgoto doméstico é essencial para evitar problemas de saúde pública que estão relacionados com doenças de veiculação hídrica. Dessa forma, é de suma importância o desenvolvimento de novas tecnologias que proporcionem melhoria de eficiência nos sistemas de tratamento.

De acordo com Von Sperling (1996), os efluentes domésticos são constituídos por cerca de 99,9% de água. O restante é constituído por sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, assim como microrganismos. Portanto, a necessidade de tratar esgoto se dá devido a 0,01% do total que compõe o esgoto doméstico.

Segundo Oliveira Netto (2011), existem várias formas e alternativas para se tratar águas residuárias e o primeiro passo é a escolha do tipo de tratamento biológico. Conforme o mesmo autor, o aumento do número de pesquisas relacionadas ao processo da digestão anaeróbia vem provocando mudanças na concepção dos sistemas de tratamento de águas residuárias.

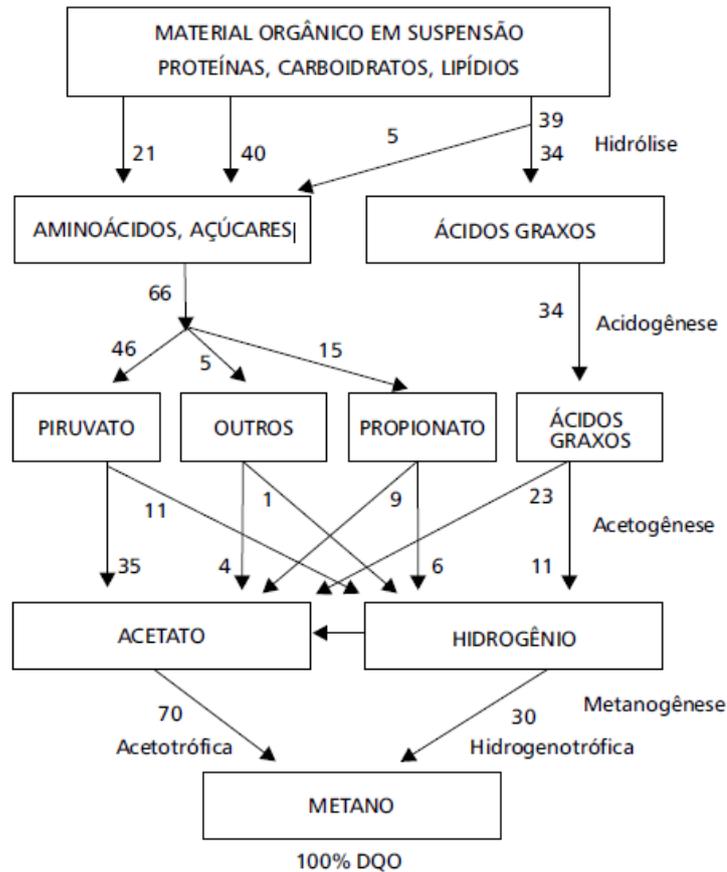
O tratamento anaeróbio se destaca pelo seu baixo custo operacional, como também, baixa demanda energética. De acordo com Camargo (2000), a crise energética em escala mundial propiciou pesquisadores a produzirem alternativas que priorizem o baixo custo energético para o tratamento de águas residuárias.

Como desvantagem, o tratamento anaeróbio apresenta liberação de maus odores. Belli Filho et al. (2016) afirma que os odores são provenientes da digestão anaeróbia de matéria orgânica, principalmente as que contém enxofre e nitrogênio, e são gerados na redução de sulfatos a qual produz o gás sulfídrico (H_2S) e a produção de amônia (NH_3).

De acordo com Florêncio (2018), o bom funcionamento do sistema ecológico da digestão anaeróbia é definido pelo equilíbrio entre processos bioquímicos envolvidos. A sequência de cada processo metabólico é dependente de uma etapa anterior, de forma que estas, quando inter-relacionadas, são consequentes da atividade de diferentes grupos de microrganismos com funções peculiares.

De acordo com Lima (2006), o processo de digestão anaeróbia se divide em quatro fases bem características, sendo elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A Figura 1 mostra um organograma exemplificando a sequência dos processos que ocorrem na digestão anaeróbia.

Figura 1 - Processos da digestão anaeróbia



. Fonte: CAMPOS et al. (1999)

O processo de digestão anaeróbia se inicia a partir da hidrólise. Segundo Lima (2006), é na hidrólise que as bactérias fermentativas hidrolíticas excretam enzimas para provocar a conversão de materiais particulados complexos em substâncias dissolvidas, ou seja, reações extracelulares. Considerada a etapa mais demorada, existem vários fatores que podem influenciar na velocidade desse processo. De acordo com Chernicharo (2016), a temperatura, tamanho das partículas, a temperatura do reator e o índice hidrogeniônico são fatores que influenciam diretamente na velocidade das reações desse processo.

Conforme Hoyos (2016), as bactérias que conduzem o processo da hidrólise podem ser anaeróbias estritas ou facultativas e, durante o processo, seu desenvolvimento é espontâneo quando as condições são favoráveis ou quando estão presentes na flora da substância orgânica a ser degradada.

A acidogênese acontece a partir das moléculas oriundas da etapa anterior. De acordo com Campos et al. (1999), as bactérias realizam a fermentação acidogênica a partir da metabolização dos compostos advindos da hidrólise, reduzindo álcoois, ácidos graxos, ácido láctico, propiônico, entre outros tipos de ácidos e diversos compostos minerais, como por exemplo, o hidrogênio, amônia e o dióxido de carbono.

A acetogênese precede a etapa mais importante da digestão anaeróbia. É nessa etapa que são formados os substratos para a formação de acetato, hidrogênio e dióxido de carbono e, de acordo com Campos et al. (1999), cerca de 70% da DQO consumida nesta etapa converte-se em ácido acético e o restante encarrega-se de formar hidrogênio.

Esta é uma etapa fundamental para a formação do gás metano, no que resulta no sucesso do reator. Segundo Camargo (2000), caso essa etapa não ocorra de forma completa pode haver um acúmulo de ácidos e, conseqüentemente, queda no pH, o que pode atingir níveis perigosos para população microbiana, principalmente a metanogênica, levando ao fracasso do reator.

Estes últimos produtos serão utilizados na metanogênese pelas bactérias metanogênicas, para formar do produto final da digestão anaeróbia que é o gás metano CH_4 , além do CO_2 e H_2O . Em resumo, a última fase da digestão anaeróbia é responsável pela metabolização dos ácidos em compostos gasosos, onde o principal é o metano (Lima, 2006).

De acordo com Hoyos (2016) a metanogênese acontece em duas vias, sendo a primeira delas realizada pelas bactérias acetotróficas e é responsável por 70% da remoção de matéria orgânica. A segunda via é a metanogênese hidrogenotrófica e aporta aproximadamente 30% da matéria orgânica em metano. O mesmo autor afirma que a superioridade do desenvolvimento da primeira via, garante uma ótima remoção de matéria orgânica nesta etapa.

3.2. FILTROS ANAERÓBIOS

Os filtros anaeróbios são sistemas de tratamento de efluentes muito utilizados no Brasil por ser uma alternativa economicamente viável de tratamento esgoto doméstico. Esse sistema tem recebido atenção especial nas pesquisas acadêmicas desenvolvidas no Brasil, com mais enfoque nos reatores de alta taxa, pois constituem-se de unidades compactas e eficientes.

Os sistemas anaeróbios de tratamento de efluentes possuem diversas vantagens. Dentre elas, Oliveira Netto (2011) destaca a economia em custos operacionais, economia de energia, além da produção do biogás que torna esse tipo de reator uma potencial fonte de energia.

O mesmo autor destaca que esse mesmo sistema, apesar da boa eficiência em remoção de matéria orgânica, seus efluentes não atingem aos padrões de emissão em corpos hídricos, quando se trata de tratamento de efluentes domésticos. Dessa forma, são necessárias a combinação com novas tecnologias para o atendimento dos padrões.

Existem diversos tipos de reatores que trabalham com o processo anaeróbio de digestão, dentre eles a literatura cita os reatores de crescimento disperso e aderido. Os dois tipos de reatores possuem suas especificidades e são utilizados de acordo com a concepção do projeto.

De acordo com Lima (2006), os reatores de crescimento aderido constituem-se de material suporte onde a população de microrganismos se adere a um material de enchimento para digerir a matéria orgânica do substrato que passa pelo material. Dentro dos reatores anaeróbios de crescimento aderido, encontra-se o filtro anaeróbio.

3.2.1. TIPOS DE FILTROS ANAERÓBIOS

Esse tipo de reator é definido por uma unidade composta por um material aderente inerte em seu interior, o qual permanece estático. A população microbiana forma um biofilme nesse material, o qual é de suma importância para o desempenho do reator.

O reator anaeróbio deve ser preenchido por materiais que possuam uma certa resistência estrutural, de modo que não se dissolva com a passagem do esgoto, índice de vazios suficiente para que não haja entupimentos, formas não achatadas, viabilidade econômica e ambiental. Dentre esses materiais, a pedra britada, materiais plásticos, escória de alto forno e alguns tipos de materiais de madeira são os mais utilizados em operações desse tipo de sistema de tratamento de efluentes.

De acordo com Campos et al. (1999), os filtros biológicos podem ser classificados como percoladores, quando possuem seu sentido descendente e o substrato percola pelo material de enchimento através de braços rotores que distribuem o afluente de forma uniforme por todo o reator. Esse tipo de filtro é bastante utilizado em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) por sua simplicidade de operação e boa eficiência de remoção de matéria orgânica. A Figura 2 mostra um exemplo de configuração de filtro biológico percolador.

Figura 2 - Filtro Biológico Percolador.

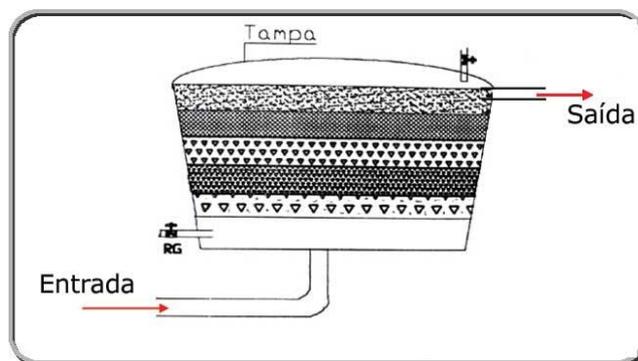


Fonte: EvironQuip (2018).

De acordo com Almeida et al. (2011), os filtros biológicos percoladores (FBP) se destacam devido à baixa demanda energética e a menor complexidade em termos de equipamentos, resultando em maior simplicidade operacional, o que torna esse sistema mais atraente para operação em maiores proporções.

Os filtros biológicos também podem ser encontrados em outras configurações. Segundo Lima (2006), o filtro biológico anaeróbio também pode ser configurado em sentido ascendente podendo ou não possuir sistema de recirculação. Esse tipo de reator deve possuir material suporte inerte e de elevada área específica para que o crescimento da biomassa aderida possa ser possível. A Figura 3 mostra o esquema de um filtro biológico anaeróbio com sentido de escoamento ascendente.

Figura 3 – Filtro Biológico Ascendente.



Fonte: EMBRAPA (2018).

Os filtros anaeróbios possuem boa eficiência em tratamento de efluentes domésticos. Em estudo realizado por Santos et al. (2018), um filtro anaeróbio percolador utilizando o pneu triturado como material suporte foi operado como tratamento primário e obteve valores de eficiência de remoção de DQO bruta e filtrada, SST e SSV conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Eficiência de remoção de filtro anaeróbio.

Parâmetros	Eficiência (%)
DQO bruta	81,50
DQO filtrada	84,70
SST	89,80
SSV	90,20

Fonte: SANTOS et al. (2018).

É válido salientar que filtros biológicos são geralmente utilizados como pós-tratamento de efluentes. Em outro estudo realizado por Santos (2018), foi operado um filtro biológico ascendente, com a brita 1 de material suporte, como pós-tratamento de um reator combinado anaeróbio-aeróbio, obtendo eficiência média de 66% para DQO total e 52% para SST. O estudo foi considerado satisfatório por se tratar de um sistema de pós tratamento, onde seu afluente possui baixa carga orgânica.

Em outro trabalho, Busato (2004) operou um filtro biológico anaeróbio de fluxo ascendente como pós-tratamento de efluente de reator UASB e também obteve resultados de remoção de DQO bruta e filtrada, encontrando eficiências superiores a 70% de remoção. Em estudo similar, Almeida et al. (2011) operou um filtro biológico percolador em sequência de um reator UASB e obteve eficiência de remoção de DBO acima dos 80%. O mesmo autor

concluiu que o uso do FBP em sequência de um reator UASB é uma alternativa promissora e seus efluentes atendem os padrões de lançamento para DBO, DQO e SST, nos quais o estudo se baseou.

De acordo com estudos realizados por Duda & Oliveira (2011), foi operado um reator UASB seguido por filtro anaeróbio em série seguidos por um filtro biológico percolador. Analisando apenas a eficiência do conjunto UASB + filtro anaeróbio, observou-se eficiência média de 88,25% de remoção de DQO total e foi constatado o aumento da eficiência do sistema logo após a inserção do filtro biológico como pós tratamento. Com a inserção do FBP foi atingida a eficiência média de 95,68% para DQO total e 97,48% para SST.

Dessa forma, conclui-se que os filtros anaeróbios de crescimento aderido sendo eles, tanto descendente como ascendente, possuem boa eficiência na remoção de matéria orgânica, justificando sua grande utilização no tratamento de efluentes domésticos, porém apesar da remoção de matéria orgânica de forma satisfatória, esse sistema requer cuidados adicionais em relação a remoção de patógenos.

3.3. FATORES INTERVENIENTES NA DIGESTÃO ANAERÓBIA

Dentro do processo anaeróbio existem diversos fatores que podem agir como interventores na eficiência dessa alternativa de tratamento. De acordo com Bitton (1994), além das necessidades nutricionais da microflora, os fatores que afetam o crescimento microbiano são temperatura, pH, tempo de detenção hidráulica (TDH), composição química do resíduo, competição de bactérias metanogênicas e redutoras de sulfato e a presença de compostos ou cargas tóxicas. O sentido do escoamento também pode interferir no desempenho do processo anaeróbio.

3.3.1. TEMPERATURA

A temperatura é um fator de grande importância dentro do tratamento anaeróbio. Sabe-se que temperaturas altas servem como catalisador dentro desse tipo de sistema. Segundo Campos et al. (1999), em locais de clima quente, os processos anaeróbios são eficientes na remoção de matéria orgânica e sólidos em suspensão com grandes vantagens: ocupam pequenas áreas, produzem pouco lodo estabilizado, não consomem energia, não necessitam de equipamentos eletromecânicos e requerem construção simples e de fácil operação.

A temperatura afeta diretamente a característica da população bacteriana dentro do processo anaeróbio. Sistemas que operam entre a faixa de 50 – 75 °C, desenvolvem espécies de

bactérias termofílicas, o que permite a digestão de maiores cargas orgânicas quando comparada com condições mesofílicas (25-35 °C), além de favorecer a destruição de patógenos. Em locais de clima muito frio se faz necessário de sistemas de aquecimento para que a eficiência do tratamento anaeróbio seja satisfatória, o que pode tornar outras alternativas mais atraentes.

Em estudo realizado por Feng et al. (2009), foi analisado o efeito do tempo de retenção de sólidos e da temperatura na hidrólise de resíduos de lodos ativados e acúmulos de ácidos graxos de cadeia curta sob condições alcalinas em reatores de fluxo contínuo e observou-se a influência da temperatura na fase da hidrólise, mais precisamente na produção de ácidos graxos.

Em trabalho realizado por Viana (2006), foi estudado o tratamento anaeróbio de vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55 °C) e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica e observou-se que, em condições termofílicas, houve a produção excessiva de ácidos voláteis totais que atingiram concentrações de ordem de 1200 mg/L, consideradas tóxicas para a biomassa metanogênica, o que evidencia que o aumento da temperatura catalisa a digestão anaeróbia, porém até um certo limite pode trazer problemas no processo de digestão.

3.3.2. pH

No processo de degradação anaeróbia, existem diversos tipos de bactérias metanogênicas e acidogênicas, dessa forma é de fundamental importância o equilíbrio ecológico entre as espécies de microrganismos anaeróbios para melhor eficiência do sistema de tratamento. Segundo Hoyos (2016), nos processos anaeróbios o pH ótimo situa-se na faixa de 6,5 a 7,5 e diferentes grupos bacterianos apresentam níveis de atividade satisfatórios a pH neutro, por exemplo, os grupos hidrólitos na faixa de 7,02 a 7,4 e os acetogênicos na faixa de 6,5 e 7,5. As bactérias metanogênicas diminuem sua atividade se o pH estiver maior que 7,8 ou menor que 6,3.

O mesmo autor destaca que quando o pH do efluente do sistema cai para valores entre 4,5 e 5, significa que as bactérias metanogênicas estão continuamente sobrecarregadas de matéria orgânica no afluente do reator. De modo geral, o pH recomendado para a digestão anaeróbia é na faixa de 6 a 8,5.

3.3.3. TEMPO DE DETENÇÃO HIDRÁULICA (TDH)

O tempo de detenção hidráulica, em termos gerais, significa o tempo de permanência do substrato no interior do sistema de tratamento e é um dos fatores de muita importância dentro do sistema anaeróbio, tanto no projeto como na operação.

O avanço da tecnologia de digestão anaeróbia permite a separação do TDH e o tempo de retenção celular. De acordo com Hoyos (2016), reatores de alta taxa conseguem manter o substrato em tempos de retenção hidráulica inferiores ao tempo de retenção celular, geralmente o líquido passa algumas horas no interior do sistema e a biomassa pode passar dias, meses ou até anos a depender do sistema anaeróbio.

De acordo com Feng et al. (2009), o TDH deve permitir que o crescimento lento das arqueas metanogênicas, principalmente as acetoclásticas, se equilibrem com o rápido crescimento dos organismos acidogênicos, o que garante que os reatores atinjam as eficiências esperadas. Dessa forma, é importante a utilização de TDH não muito baixo, de modo a evitar o pouco contato do substrato com a biomassa e nem muito alto, com biomassa retida mais tempo que o necessário.

Em estudo realizado por Leite et al. (2015), foi realizada uma análise comparativa dos efeitos da Carga Orgânica Volumétrica e do TDH em uma digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto e, em relação ao TDH, pôde-se concluir que, com valores fixos de 5 e 7 dias, o TDH pode favorecer a redução de massa de sólidos e melhorar a concentração do efluente em termos de Sólidos Totais, Sólidos Voláteis, e DQO, porém o desempenho do sistema está sujeito à qualidade do lodo residual afluente.

3.3.4. CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA (COV)

A COV, de modo geral, define-se como a massa de matéria orgânica por unidade de volume do reator e se mostra muito importante em reatores anaeróbios, principalmente em reatores UASB.

De acordo com Hoyos (2016), o processo de tratamento, quando exposto a choques ou altas cargas orgânicas aplicadas, pode sofrer com o desequilíbrio entre os diferentes microrganismos que estão interligados dentro da digestão anaeróbia, o que pode levar à superioridade da fase ácida em relação a metanogênica dentro do reator, perdendo eficiência na remoção de sólidos orgânicos e suspensos.

No estudo já citado anteriormente realizado por Leite et al. (2015), as menores cargas aplicadas foram 0,5 e 1,0 kg e apresentaram, estatisticamente, os melhores valores, mas também pôde-se concluir que, com o aumento da COV, houve desempenho satisfatório dos reatores, porém observou-se que a COV de 4,5 kg é um valor limitante para a digestão anaeróbia.

3.3.5. SENTIDO DE ESCOAMENTO

O sentido de escoamento é muito importante na concepção de um sistema de tratamento de efluentes. De modo geral, os reatores de fluxo contínuo são concebidos nos sentidos ascendente, onde o substrato percorre o interior do sistema de baixo para cima, e descendente, onde o substrato faz o percurso de cima para baixo. A representação de sistemas concebidos nos dois sentidos já foi demonstrada anteriormente nas Figuras 2 e 3.

Em reatores de sentido ascendente, o meio suporte é totalmente imerso no substrato. Essa particularidade favorece a operação de filtros anaeróbios onde a vazão não é constante (filtros de tratamento de efluentes de residências), pois a população microbiana aderida ao meio suporte estará sempre em contato com o substrato. Em reatores de sentido descendente, o substrato percola o material suporte, dessa forma, é de crucial importância a constância da vazão no sistema para que a população microbiana seja atendida.

O sentido de escoamento pode ser um fator interveniente na digestão anaeróbia. Em estudo feito por Fia et al. (2012), foi analisada a influência do sentido de escoamento no desempenho de filtros anaeróbios utilizando brita nº 2 como material suporte e observou-se eficiências de 68% e 79% na remoção de DQO total para os sentidos descendente e ascendente respectivamente, onde foi observada uma certa similaridade entre os dois sistemas.

Há uma carência de estudos que comparem os efeitos do sentido de escoamento na digestão anaeróbia. Dessa forma, comparando dois estudos realizados por Santos et al. (2018) e Tonetti et al. (2011), onde foi analisado, respectivamente, o desempenho de um filtro biológico de fluxo descendente utilizando o pneu como material suporte e filtros anaeróbios de fluxo ascendente tendo o bambu como material de recheio. No primeiro estudo obteve-se eficiência média de 81,5% em termos de DQO, já no segundo foi observado eficiência de remoção de 81,4%, o que mostra bastante similaridade desprezando as particularidades do meio aderente e as diferentes escalas dos sistemas.

4. METODOLOGIA

No presente trabalho foi operado dois sistemas de mesma escala em períodos distintos, porém de mesma duração. O primeiro consiste em reator anaeróbio de fluxo descendente e o segundo sendo o mesmo sistema de tratamento, porém com fluxo ascendente, ambos contendo pneu triturado com granulometria de 2,4 mm como meio aderente. Dessa forma espera-se determinar a interveniência do sentido de escoamento dentro da digestão anaeróbia.

4.1. REATORES ANAERÓBIOS

O primeiro reator utilizado na operação foi construído utilizando um tubo de PVC, por ser um material relativamente barato e de boa resistência para fins hidráulicos. Para a retenção do material suporte no descarte do efluente foi adicionado um fundo falso que consistiu em introduzir o reator dentro de outro tubo de PVC, com diâmetro maior que o anterior, para que este último realizasse o descarte do efluente.

O reator possuía 100 mm de diâmetro e 75 cm de altura, com volume reacional de 5,9 litros e foi utilizado o pneu triturado com pequena granulometria como meio aderente. O reator era constituído restritamente por zona anaeróbia, ou seja, o sistema era totalmente isolado do oxigênio natural. A Figura 4 mostra a configuração do reator em estudo.

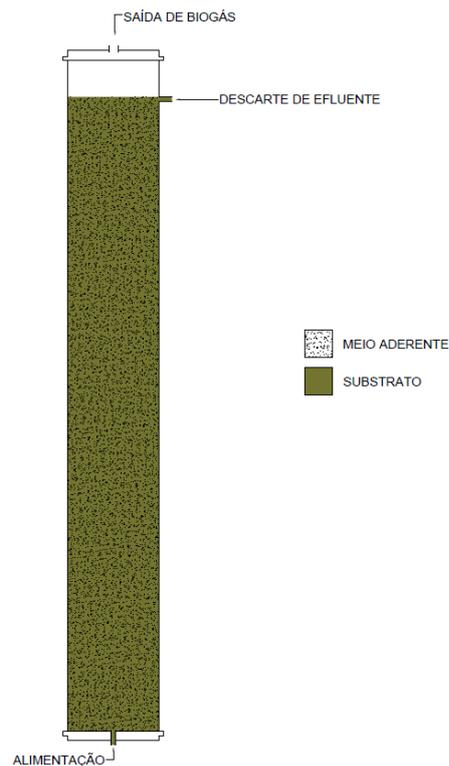
Figura 4 - Filtro Biológico Anaeróbio Descendente.



Fonte: O autor (2019).

O segundo sistema em estudo possuía as mesmas características no que diz respeito às suas dimensões, volume e material suporte, diferenciando apenas o sentido de escoamento do substrato e pela ausência da necessidade de fundo falso. A Figura 5 demonstra a disposição do reator em questão.

Figura 5 - Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente.



Fonte: O autor (2019).

A alimentação dos reatores foi feita a partir de uma bomba dosadora do tipo diafragma com fluxo em pulso, demonstrada a seguir na Figura 6.

Figura 6 - Bomba dosadora do tipo diafragma com fluxo em pulso.



Fonte: O autor (2019).

4.2. MEIO ADERENTE

O meio aderente escolhido para o preenchimento dos reatores foi o pneu triturado. A escolha foi baseada na viabilidade ambiental, baixo custo, grande disponibilidade e pela grande eficiência dentro do tratamento de esgoto sanitário.

Alguns trabalhos mostram a eficiência desse tipo de material suporte. Em estudos já citados anteriormente, Santos et al. (2018) e Santos (2018) encontrou eficiências superiores a 80%, o que demonstra a boa capacidade do material para aderência da população microbiana do sistema de tratamento. O material foi devidamente lavado para evitar que impurezas interfiram no sistema. A Figura 7 mostra o material suporte utilizado na operação em estudo em seu processo de lavagem.

Figura 7 - Pneu triturado em processo de lavagem para inserção no reator.



Fonte: O autor (2019).

4.3. OPERAÇÃO DO SISTEMA

Devido a limitações de laboratório, os dois filtros foram analisados em períodos distintos. O primeiro operou entre os dias 16/04/2018 e 23/05/2018 e o segundo entre os dias 30/01/2019 e 28/02/2019, totalizando pouco mais de um mês de operação para ambos.

Para o cálculo do tempo de detenção hidráulica do filtro anaeróbio recorreu-se as recomendações da NBR 13969:1997, onde para uma temperatura maior que 25°C recomenda-se uma TDH de aproximadamente 22 horas. Porém, tendo em vista o volume dos reatores, as bombas disponíveis no laboratório não ofereciam capacidade de vazão o suficiente para atingir o TDH recomendado por norma, dessa forma, os dois reatores operaram com vazão de 0,125 mL/s, com o TDH igual a 13 horas para ambos os reatores, valor mais próximo ao recomendado.

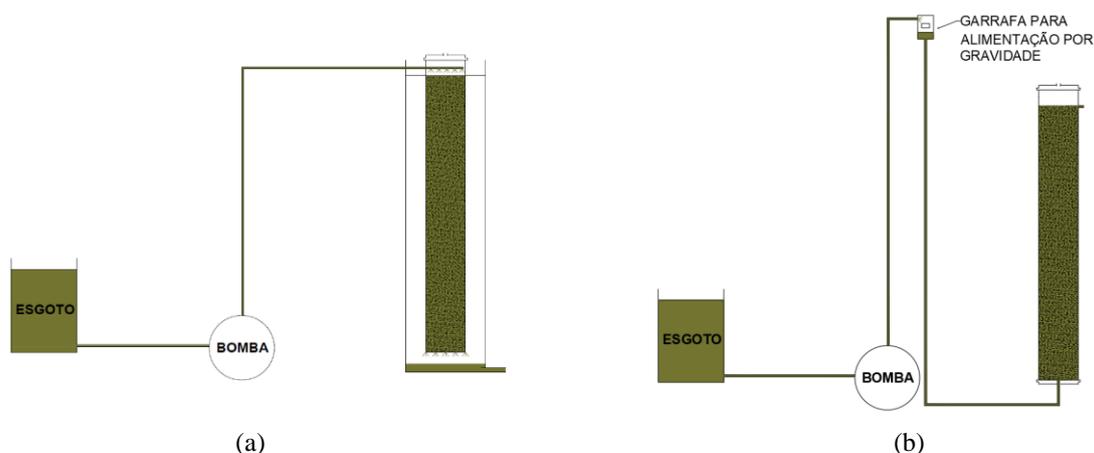
Antes de dar início às operações, o material suporte foi inoculado a fim de catalisar a adesão da população microbiana no material, o que resulta na aceleração da estabilização do sistema, encurtando o tempo de operação. A inoculação foi feita como descreveu Oliveira Netto (2007), onde foi coletado o lodo do fundo da fossa séptica, misturando-o com o meio aderente em um recipiente. Após duas horas, quando o lodo estava visualmente aderido, o material suporte foi colocado dentro dos filtros e foi dado início as operações.

A coleta de esgoto para a alimentação do sistema era feita a partir da fossa séptica da UFAL – Campus do Sertão, três vezes na semana, sempre no período da manhã e no mesmo horário para evitar alterações bruscas nas características do substrato. O esgoto era coletado por uma bomba manual inserida pelo tubo de ventilação da fossa, succionando esgoto de um nível intermediário, a fim de evitar o lodo decantado no fundo, como também o líquido mais superficial que já possui uma concentração de matéria orgânica mais baixa, tendo em vista que a fossa também é um sistema de tratamento.

Depois de coletado, o esgoto era direcionado ao Laboratório de Saneamento Ambiental da UFAL – Campus do Sertão e despejado em um recipiente de aproximadamente 120L para que fosse viabilizada a alimentação contínua aos reatores através da bomba dosadora do tipo diafragma com fluxo em pulso já demonstrada na Figura 6.

Para o reator de fluxo descendente, a alimentação acontecia de forma direta, ou seja, o reator era alimentado diretamente da bomba. Já para o reator de fluxo ascendente, a bomba alimentava uma garrafa que, por sua vez, era conectada a parte inferior do reator, dessa forma, o reator era alimentado por gravidade. A utilização da garrafa era importante para evitar problemas na operação em faltas de energia, de modo a evitar o retorno do esgoto contido no interior do reator, podendo causar problemas na bomba de alimentação, além de evitar perturbações no leito reacional provenientes dos pulsos da bomba dosadora de esgoto. A configuração dos dois sistemas em estudo está disposta a seguir na Figura 8.

Figura 8 – (a) Configuração do sistema referente ao reator de fluxo descendente. (b) Configuração do sistema referente ao reator de fluxo ascendente.



Fonte: O autor (2019).

Durante a operação, eram coletadas 300 mL de amostras de afluente e efluente duas vezes na semana. Às terças e quintas eram coletadas amostras de afluente e às quartas e sextas eram coletas amostras de efluente dos respectivos reatores.

4.4. ENSAIOS

Para a análise das amostras, foi utilizada a estrutura do Laboratório de Saneamento da UFAL – Campus do Sertão, onde foram feitas análises de remoção de Turbidez, Sólidos Suspensos Totais (SST), Fixos (SSF), e Voláteis, como também de Sólidos Totais (ST), Fixos (STF) e Voláteis (STV).

Para os ensaios de turbidez e pH, foi utilizado um turbidímetro e um peagâmetro de bancada, respectivamente, já para os demais ensaios a metodologia utilizada foi seguida conforme apostila intitulada como Metodologia de Análises de Águas e Efluentes Líquidos elaborada pelo Laboratório de Saneamento Ambiental do Centro de Tecnologia (CTEC) da UFAL – Campus A.C. Simões.

Os valores de pH não foram utilizados como parâmetro neste trabalho, as medições durante a operação foram feitas apenas para o monitoramento da digestão anaeróbia, ou seja, verificar se os valores estão aceitáveis para a viabilidade da mesma.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

É válido salientar que as operações foram realizadas em períodos distintos e a discussão será feita em função do número da amostra. Foram coletadas oito amostras para cada reator nas datas descritas conforme a Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Descrição das amostras coletadas.

Número da amostra	Fluxo ascendente	Fluxo descendente
1	30/01/2019	05/05/2018
2	31/01/2019	07/05/2018
3	04/02/2019	09/05/2018
4	06/02/2019	11/05/2018
5	11/02/2019	14/05/2018
6	13/02/2019	16/05/2018
7	18/02/2019	21/05/2018
8	20/02/2019	23/05/2018

Fonte: O autor (2019).

Seguindo a metodologia abordada, os resultados obtidos no que diz respeito a Sólidos Totais (ST), para os dois reatores em estudo, estão dispostos na Tabela 3.

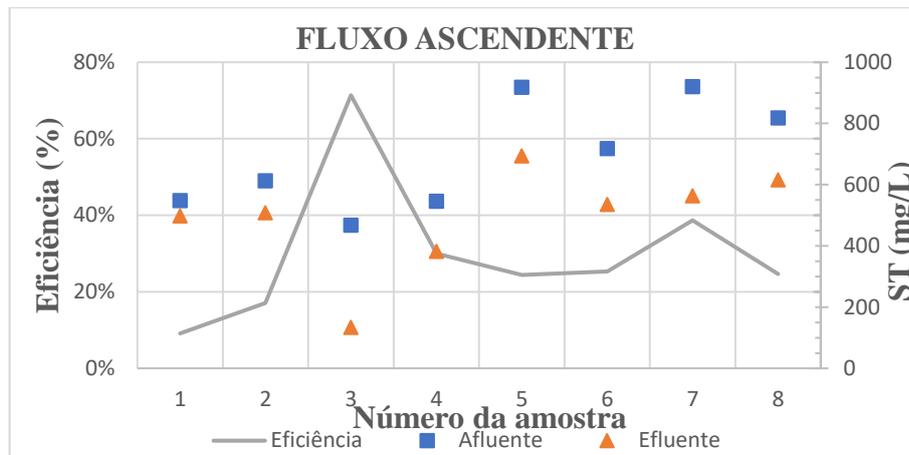
Tabela 3 – Valores médios para ST em mg/L.

Sentido de escoamento	Afluente	Efluente
Ascendente	702,86 ± 157,45	493,6 ± 151,86
Descendente	761 ± 142,37	503,75 ± 133,34

Fonte: O autor (2019).

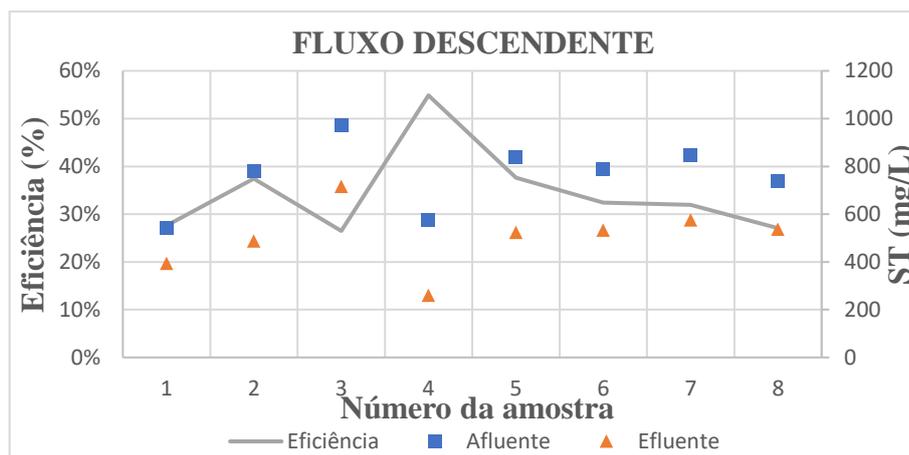
Observa-se que os valores de concentração sólidos totais afluentes são próximos, o que mostra a similaridade da característica do substrato. O reator de sentido de escoamento descendente obteve uma remoção percentual ligeiramente superior em relação ao reator de sentido ascendente, sendo elas de 34 e 30%, respectivamente. As Figuras 9 e 10 mostram o comportamento dos dois reatores em relação ao presente parâmetro.

Figura 9 – Perfil temporal da operação completa para o reator de fluxo ascendente.



Fonte: O autor (2019).

Figura 10 – Perfil temporal da operação completa para o reator de fluxo descendente.



Fonte: O autor (2019).

Os resultados para ST se mostraram plausíveis quando comparados com estudo similar realizado por Fia et al. (2012), onde comparou-se a eficiência de dois reatores anaeróbios com sentidos inversos e foram obtidas eficiências respectivas de remoção de ST de 28 e 33% para os reatores de fluxo ascendente e descendente, observando-se a mesma superioridade para o último, este que no presente trabalho, obteve menor desvio padrão significando maior estabilidade do sistema.

Foi possível notar que o sistema obteve maiores eficiências quando recebeu menores concentrações de afluentes, o que pode ser justificado pela menor sobrecarga no sistema em relação ao parâmetro em questão, visto que na amostra 3 da Figura 9 e na amostra 4 da Figura 10 observa-se picos de remoção correspondidos pelas menores concentrações de afluente.

Os dois sistemas obtiveram maior sucesso no que se diz respeito aos Sólidos Totais Voláteis (STV). A Tabela 4 mostra os valores médios de concentração do parâmetro em questão.

Tabela 4 – Valores médios para STV em mg/L.

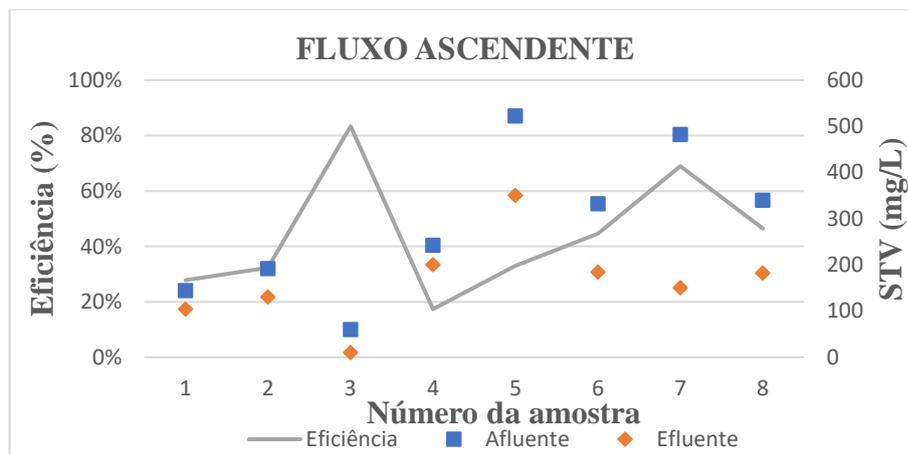
Sentido de escoamento	Afluente	Efluente
Ascendente	289,25 ± 160,83	163,75 ± 96,57
Descendente	291,25 ± 71,34	103,75 ± 56,53

Fonte: O autor (2019).

Com valores afluentes similares foi observada uma diferença notável na eficiência de remoção de STV entre os dois sistemas. Para o reator de sentido de escoamento descendente foi obtido valor de eficiência média de aproximadamente 66% de remoção. Para o sistema de fluxo ascendente obteve-se, para o mesmo parâmetro, eficiência média de 45% de remoção.

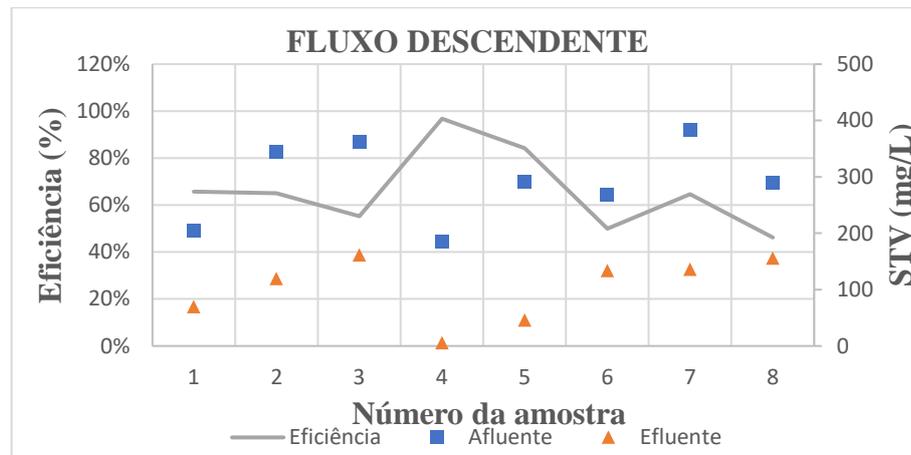
Observa-se também que, comparando os dois sistemas em relação a este parâmetro, foram obtidos valores de desvio padrão discrepantes, o que reforça a maior estabilidade do reator com fluxo descendente, o qual obteve valores quase duas vezes menores em relação ao reator de sentido inverso, justificando sua melhor eficiência. As Figuras 11 e 12 mostram o perfil temporal de toda a operação para STV.

Figura 11 – Perfil temporal de toda a operação do sistema de sentido ascendente para STV.



Fonte: O autor (2019).

Figura 12 – Perfil temporal de toda a operação do sistema de sentido descendente para STV.



Fonte: O autor (2019).

Pode-se observar que para STV o sistema seguiu o mesmo padrão em relação ao parâmetro anterior no que diz respeito aos picos de remoção nas amostras onde os reatores receberam menores cargas de sólidos.

O maior sucesso de remoção em relação aos STVs pode ser justificado por esse parâmetro representar a parcela de sólidos orgânicos. Dessa forma, a maior remoção de STV pode representar o bom funcionamento das vias metanogênicas dentro dos dois sistemas em estudo, apesar da maior remoção do reator de fluxo descendente.

Em estudo realizado por Povinelli & Leite (1999), foi analisado o comportamento de sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos e urbanos e foram encontrados valores de 81% de remoção para STVs e 77% para STs, corroborando com a superioridade de remoção de STV em sistemas de remoção de matéria orgânica.

No que se refere aos Sólidos Totais Fixos (STF), parcela inorgânica dos sólidos totais, observou-se a menor porcentagem de remoção para os dois sistemas. A Tabela 5 mostra os valores médios encontrados para os dois reatores em estudo.

Tabela 5 – Valores médios para STF em mg/L.

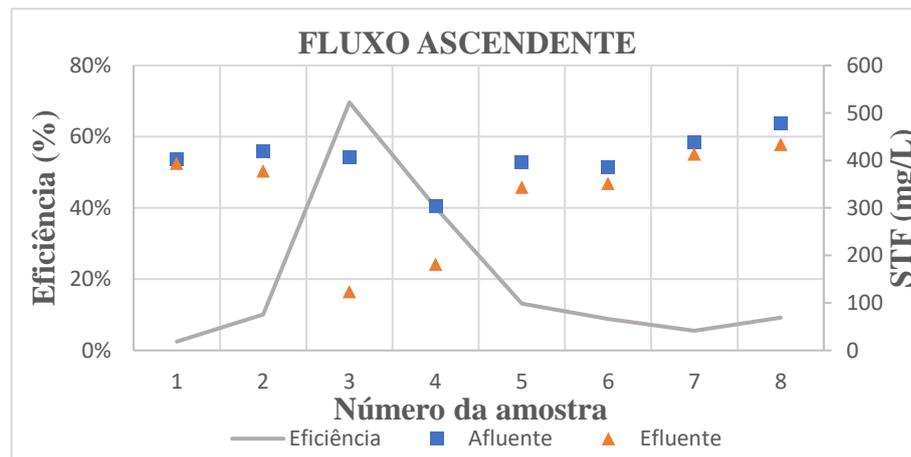
Sentido de escoamento	Afluente	Efluente
Ascendente	404,32 ± 49,73	327,75 ± 112,92
Descendente	469,75 ± 87,79	400 ± 92,46

Fonte: O autor (2019).

Analisando a Tabela 5 observa-se uma baixa remoção para os dois sistemas, com leve superioridade para o reator de sentido ascendente. Em termos percentuais, foram encontrados valores de 20 e 15% para os reatores de sentido ascendente e descendente, respectivamente.

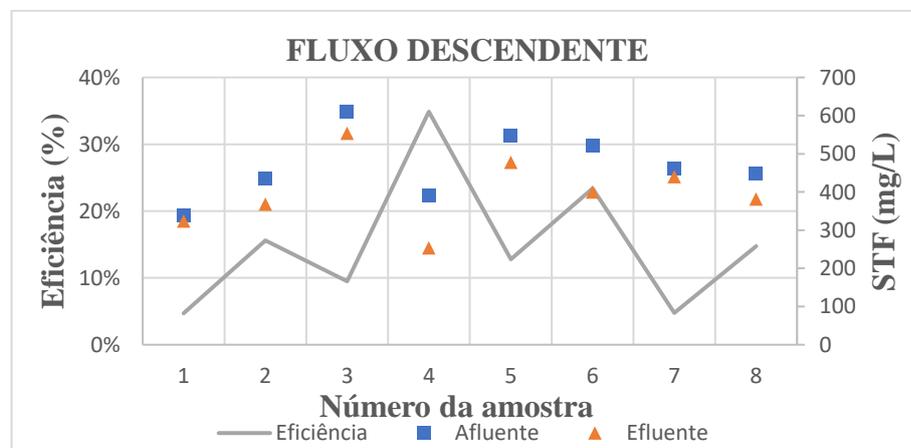
A remoção de STF não é realizada por vias metanogênicas, pois esse parâmetro corresponde a parcela inorgânica do substrato e sua remoção é realizada por barreiras físicas, o que pode justificar a baixa remoção encontrada para os dois sistemas. É válido salientar que há superioridade considerável nos valores de STV em relação aos valores de STF, o que reforça que a baixa remoção para este parâmetro não influi de forma considerável na metanogênese. As Figuras 13 e 14 mostram o perfil temporal de toda a operação para os dois sistemas em relação a STF.

Figura 13 - Perfil temporal de toda a operação do sistema de sentido ascendente para STF.



Fonte: O autor (2019).

Figura 14 - Perfil temporal de toda a operação do sistema de sentido descendente para STF.



Fonte: O autor (2019).

A baixa remoção de STF para os dois sistemas evidencia que o pneu triturado com granulometria de 2,4 mm não oferece resistência física suficiente para retenção de sólidos inorgânicos e esse fator pode indicar alta presença de vazios, o que não é interessante para o funcionamento do reator.

Para a série de sólidos suspensos, para ambos os sistemas, foram obtidas as melhores eficiências, com superioridade para o sentido de escoamento descendente. Outros estudos envolvendo a digestão anaeróbia realizados por Fia et al. (2012) e ARAÚJO (2014), também encontraram disparidades nas eficiências de remoção entre STs e SSTs, o que corrobora com os valores encontrados no presente trabalho.

Para Sólidos Suspensos Totais (SST) foram obtidos os seguintes valores médios, para ambos os sistemas, conforme mostra a Tabela 6.

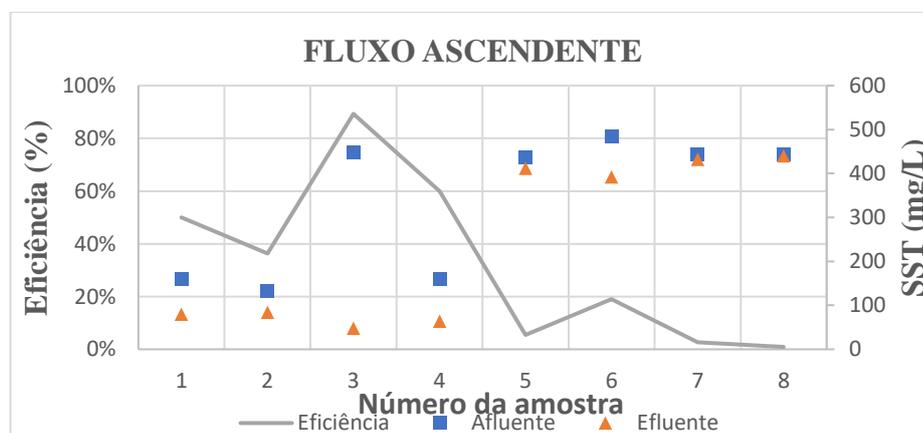
Tabela 6 – Valores médios para SST em mg/L.

Sentido de escoamento	Afluente	Efluente
Ascendente	338,5 ± 156,43	244 ± 187,92
Descendente	199 ± 87,52	98,66 ± 47,40

Fonte: O autor (2019).

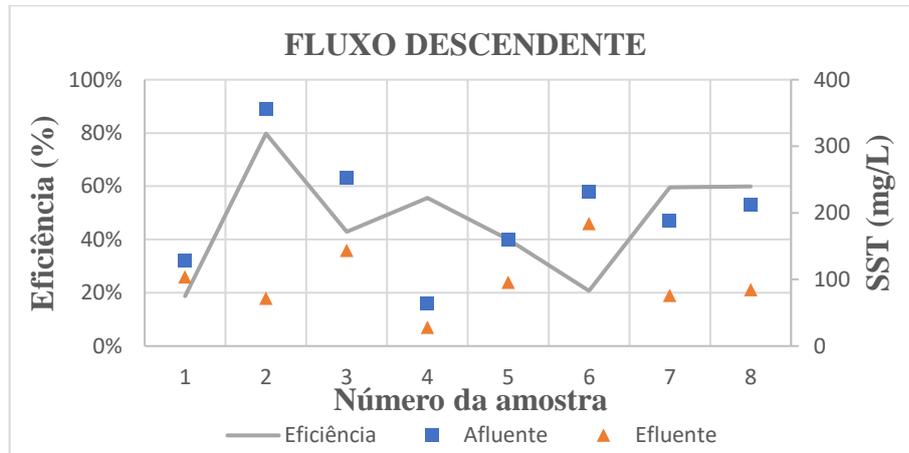
O valor percentual de eficiência de remoção encontrado para o reator de sentido ascendente foi de 33%, valor este muito inferior ao valor de 47% encontrado para o reator de sentido descendente. Esta discrepância pode ser justificada pela maior estabilidade do sistema evidenciada pelo menor desvio padrão para o último reator. As Figuras 15 e 16 mostram o comportamento dos reatores em estudo.

Figura 15 – Perfil temporal do comportamento do reator de fluxo ascendente para SST.



Fonte: Os autores (2019).

Figura 16 – Perfil temporal do comportamento do reator de fluxo descendente para SST.



Fonte: Os autores (2019).

Analisando a Figura 15 observa-se que houve uma queda considerável na eficiência de remoção a partir da amostra 4. A queda pode ser justificada pelo aumento brusco na concentração de SST da amostra 5 em diante, o que pode ter sobrecarregado o sistema e afetado sua capacidade de remoção.

Para o reator de fluxo descendente observa-se, a partir da Figura 16, mudanças mais suaves na característica do esgoto com o passar do tempo, o que proporcionou maior estabilidade para o sistema. Em estudo já citado realizado por Fia et al. (2012), foram obtidas eficiências de aproximadamente 77 e 79%, respectivamente, para os reatores de sentido ascendente e descendente, o que corresponde a mesma superioridade de remoção do sentido descendente, apesar da menor discrepância entre os valores.

Analisando os resultados obtidos para Sólidos Suspensos Voláteis (SSV), observa-se os melhores valores de eficiência de remoção, quando comparado com os demais parâmetros. A Tabela 7 contém os valores médios para ambos os sistemas em estudo.

Tabela 7 – Valores médios para SSV em mg/L.

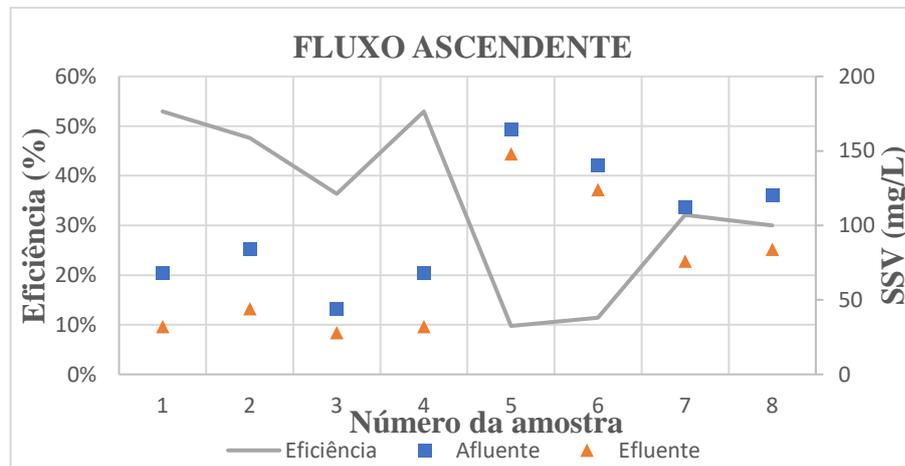
Sentido de escoamento	Afluente	Efluente
Ascendente	100 ± 40,85	71 ± 45,59
Descendente	75 ± 26	37 ± 19,91

Fonte: O autor (2019).

A justificativa para o maior sucesso de remoção de SSV se assemelha com a utilizada para STV, onde a metanogênese se sobressai na remoção para este parâmetro. As eficiências médias de remoção para SSV para os dois reatores são de 34 e 48%, constatando novamente superioridade do sentido descendente.

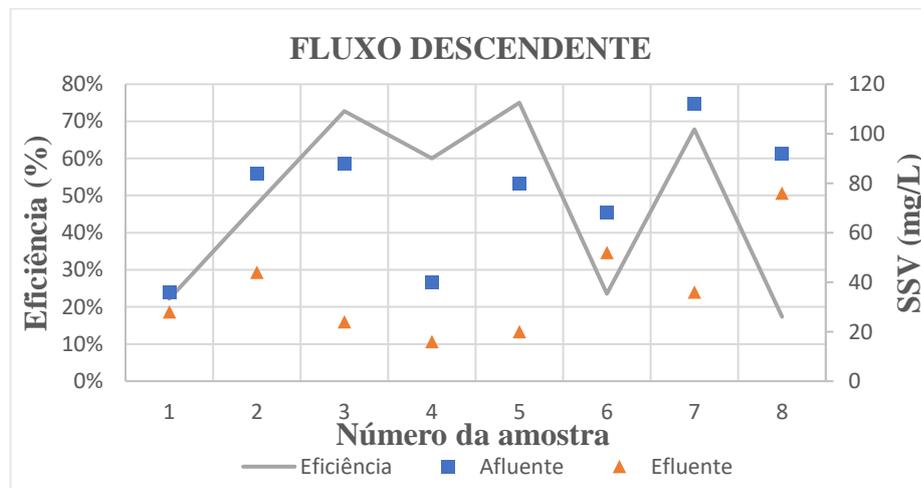
É válido salientar que o comportamento da remoção dos SSVs, apesar de similar, se mostrou superior a SST. O mesmo foi observado em estudo realizado por Oliveira Netto (2007) onde se analisou a eficiência de um reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo, sendo encontrados valores de eficiência na zona anaeróbia de 68% para SST e de 82% para SSV. As Figuras 17 e 18 mostra o perfil temporal para os dois sistemas no que diz respeito a SSV.

Figura 17 – Perfil temporal do comportamento do reator de fluxo ascendente para SSV.



Fonte: O autor (2019).

Figura 18 – Perfil temporal do comportamento do reator de fluxo descendente para SSV.



Fonte: O autor (2019).

Analisando a Figura 17 é notória uma mudança brusca na característica do esgoto afluente a partir da amostra 5, o que pode ter prejudicado a remoção de SSV por sobrecarga da população microbiana. Para o segundo reator, a Figura 18 mostra uma maior estabilidade da característica do esgoto, o que pode ter contribuído para o maior sucesso do sistema.

Os resultados obtidos para Sólidos Suspensos Fixos (SSF), para os dois sistemas em questão, foram ligeiramente inferiores aos valores de SSV. A Tabela 8 mostra os valores médios para os respectivos sistemas.

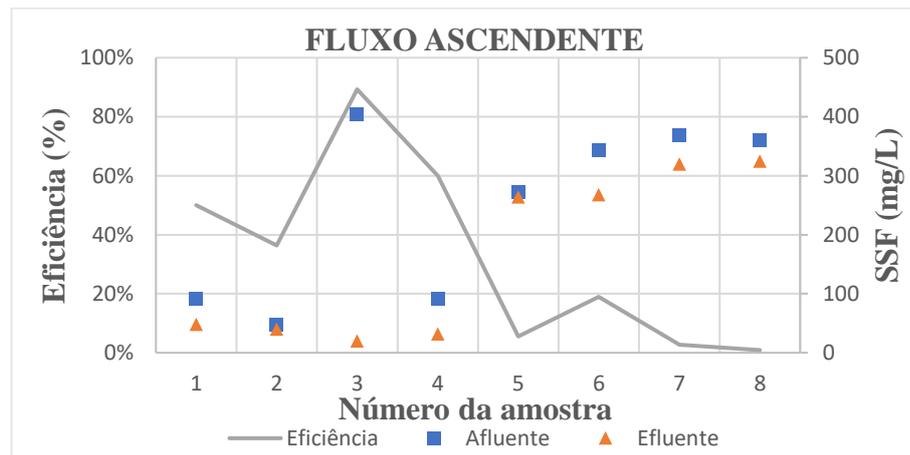
Tabela 8 – Valores médios para SSF em mg/L.

Sentido de escoamento	Afluente	Efluente
Ascendente	247 ± 146,25	165,63 ± 139,38
Descendente	124 ± 75,95	61,66 ± 47,17

Fonte: O autor (2019).

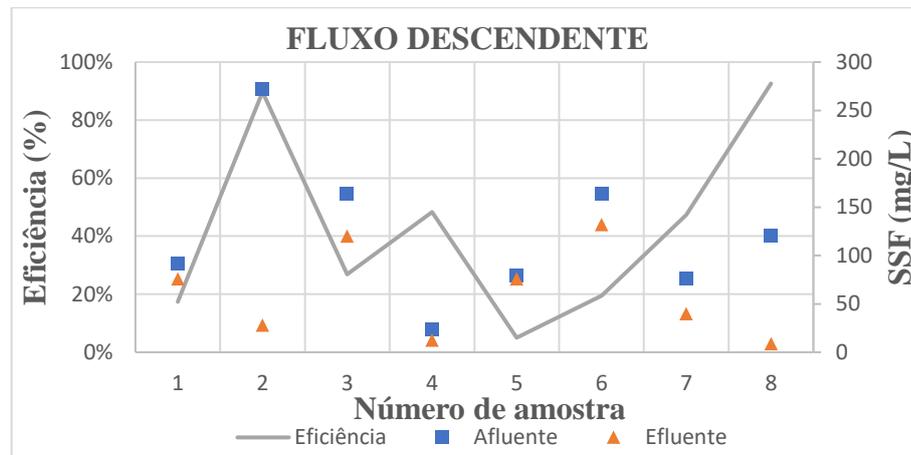
Para os reatores de sentido de escoamento ascendente e descendente foram obtidos valores respectivos de eficiência de remoção de 33 e 43%, prevalecendo a maior remoção para o sistema de fluxo descendente. As Figuras 19 e 20 mostram o comportamento do reator, em função do tempo, para os dois sistemas em relação ao parâmetro a seguir.

Figura 19 - Perfil temporal do comportamento do reator de fluxo ascendente para SSF.



Fonte: O autor (2019).

Figura 20 - Perfil temporal do comportamento do reator de fluxo descendente para SSF.



Fonte: O autor (2019).

Novamente, foi possível notar que na Figura 19 a mudança brusca, a partir da amostra 5, da característica do substrato afluente prejudicou de forma significativa a eficiência de remoção de SSF, o que não aconteceu de forma contínua para o reator de sentido de escoamento descendente.

No presente estudo, os valores de turbidez médios encontrados para os dois sistemas encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores médios para turbidez em NTU.

Sentido de escoamento	Afluente	Efluente
Ascendente	125,36 ± 29	67 ± 32,75
Descendente	110,21 ± 57,16	20,51 ± 8,35

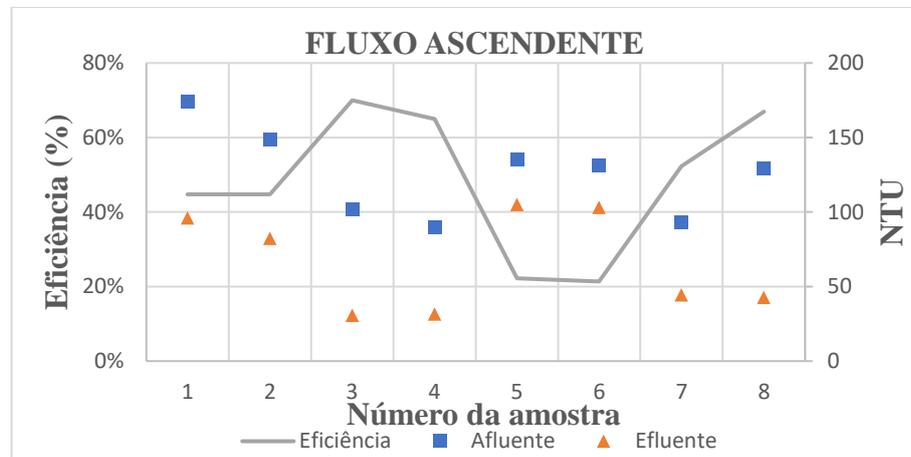
Fonte: O autor (2019).

Ao analisar os valores da Tabela 9, é notória a superioridade do reator de sentido de escoamento descendente. Em valores percentuais, os valores respectivos dos reatores de fluxo ascendente e descendente são de 48 e 76%, o que mostra disparidade na eficiência entre os dois sistemas.

A maior eficiência para o reator de sentido de escoamento descendente pode ser justificada pela maior remoção de sólidos suspensos do mesmo. Em estudo realizado por Chagas (2015), foi analisada a relação entre a concentração de sólidos suspensos e turbidez e foi constatada correlação significativa entre os dois parâmetros, de tal forma, que possibilitou estimar concentrações de sólidos suspensos por valores de turbidez.

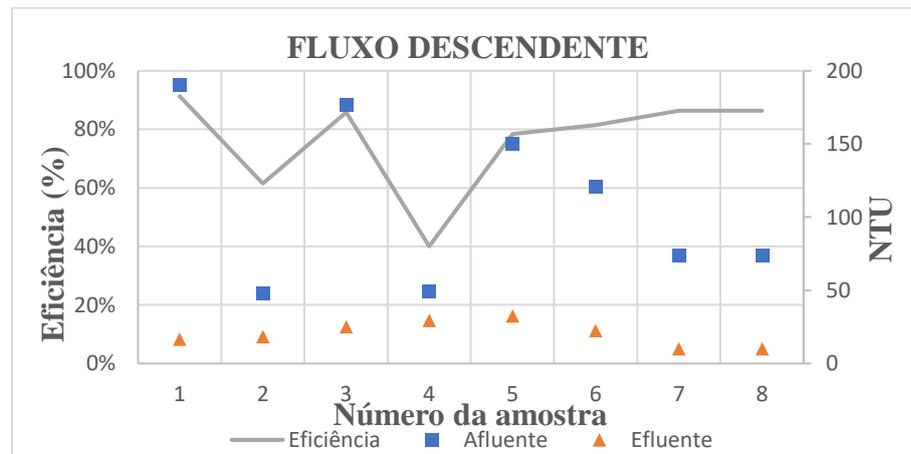
As Figuras 21 e 22 mostram o comportamento do reator em função do tempo para os dois sistemas em relação ao parâmetro a seguir.

Figura 21 - Perfil temporal do comportamento do reator de fluxo ascendente para turbidez.



Fonte: O autor (2019).

Figura 22 - Perfil temporal do comportamento do reator de fluxo descendente para turbidez.



Fonte: O autor (2019).

Analisando as Figuras 21 e 22 e comparando-as com as Figuras 19 e 20, pode-se notar que uma relação entre Turbidez e SSF. As amostras com menores remoção percentuais apresentaram menor remoção de unidades de turbidez, da mesma forma que também se mostram similares o comportamento da remoção de SSF e turbidez para o caso contrário.

É válido salientar que os dois reatores apresentaram comportamentos inversos em relação a remoção de turbidez. Com base na Figura 21, nas amostras de maiores valores de NTU, houve queda na eficiência de remoção, o que não aconteceu para o segundo sistema.

O Quadro 1 mostra de forma compacta os resultados obtidos de todos os parâmetros, juntamente com suas eficiências de remoção (e), para ambos os sistemas em estudo.

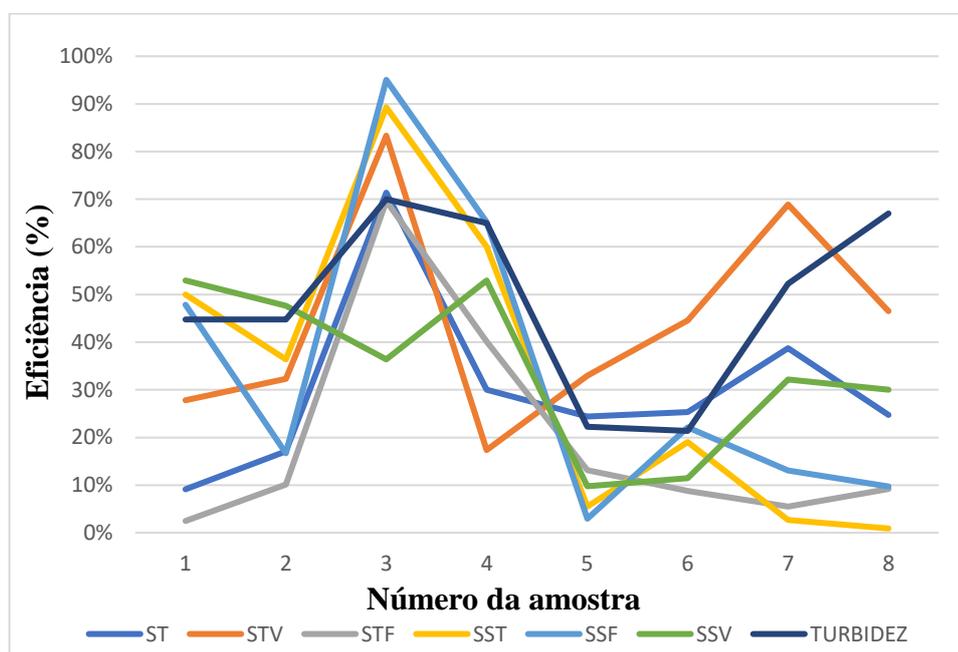
Quadro 1 – Resultados médios obtidos durante a operação do reator.

Parâmetro	Fluxo Ascendente			Fluxo Descendente		
	Afluente	Efluente	e (%)	Afluente	Efluente	e (%)
Turbidez	125,36 ± 29	67 ± 32,75	48	110,21 ± 57,16	20,51 ± 8,35	76
ST	702,86 ± 157,45	493,6 ± 151,86	30	761 ± 142,37	503,75 ± 133,34	34
STV	289,25 ± 160,83	163,75 ± 96,57	44	199 ± 87,52	103,75 ± 56,53	66
STF	404,32 ± 49,73	327,75 ± 112,92	20	469,75 ± 87,79	400 ± 92,46	15
SST	338,5 ± 156,43	244 ± 187,92	33	199 ± 87,52	98,66 ± 47,40	47
SSV	100 ± 40,85	71 ± 45,59	34	75 ± 26	37 ± 19,91	43
SSF	247 ± 146,26	165,63 ± 139,38	34	124 ± 75,95	61,66 ± 47,17	48

Fonte: O autor (2019).

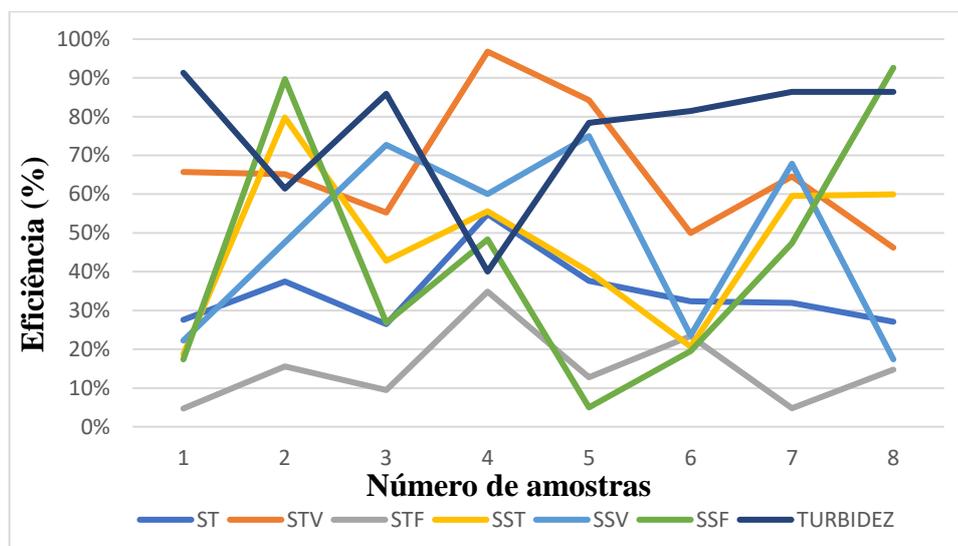
A Figura 23 e 24 mostra o perfil temporal das eficiências de remoção para ambos os sistemas.

Figura 23 – Eficiências de todo o sistema de fluxo ascendente.



Fonte: O autor (2019).

Figura 24 – Eficiências de todo o sistema de fluxo descendente.



Fonte: O autor (2019).

A partir da análise global de todo o sistema é notório o melhor desempenho do reator anaeróbio de fluxo descendente, onde seus menores desvios padrões para os dados de efluente, mostram maior estabilidade do sistema como um todo, o que favorece para seu melhor desempenho. Em estudo já citado, Fia et al. (2012) encontra-se o mesmo padrão de superioridade para o sentido descendente em todos os parâmetros analisados relacionados a remoção de sólidos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a análise dos resultados obtidos e com base na bibliografia consultada, nota-se que o reator anaeróbio com sentido de escoamento descendente apresenta melhor desempenho em relação ao sistema de fluxo ascendente, este último apresentando superioridade de remoção apenas para STFs para o presente estudo. Em relação a série de sólidos totais, encontrou-se maior similaridade entre os dois sistemas, o que não foi constatado em relação a série de sólidos suspensos. Tal diferença se mostrou coerente quando verificada a turbidez para os dois sistemas, a qual apresentou grande superioridade de remoção por parte do reator de fluxo descendente em relação ao reator de sentido inverso.

A baixa remoção de STFs para os dois sistemas evidencia a baixa resistência física que o pneu triturado de granulometria de 2,4 mm oferece para reter sólidos de características inorgânicas. Este fator indica uma alta presença de vazios, esta que diminui o contato do

substrato com a população microbiana aderida e pode ter decaído a eficiência de remoção para ambos os reatores.

6.1. PRINCIPAIS DIFICULDADES

Durante a operação do reator anaeróbio de fluxo ascendente, houve um período de falta de energia que durou cerca de 6 horas, apesar do reator ter ficado cheio durante esse tempo, a escassez de matéria orgânica pode ter causado estresse microbiano e ter comprometido a eficiência de remoção do sistema. Outro problema frequente durante a operação do sistema foi o entupimento frequente das mangueiras que causavam a interrupção da vazão do reator. Esse problema aconteceu por 5 vezes e também pode ter causado problemas em relação ao equilíbrio de microrganismos.

No que se diz respeito a coleta do substrato, procurou-se colhê-los em horários fixos para preservar a característica do esgoto. Porém é impossível garantir que a característica seja idêntica para os dois sistemas e esse fator pode ter interferido na diferença de desempenho entre os dois reatores em estudo, visto que os dois funcionaram em períodos distintos devido a incapacidade do laboratório.

O déficit de infraestrutura do laboratório impossibilitou análises de parâmetros importantes como a DQO, o que poderia enriquecer o estudo e trazer mais detalhes que poderiam ser comparados para os dois sentidos de escoamentos.

6.2. SUGESTÕES

Para trabalhos futuros, recomenda-se a operação simultânea dos dois reatores com sentidos inversos de modo a analisar o substrato afluyente com mesmas características para melhor comparação, como também, analisar a remoção de DQO para uma visão mais completa do desempenho da metanogênese.

Em relação a parte construtiva do reator, é recomendável utilizar de mangueiras novas e adequadas para evitar entupimentos que prejudicam a eficiência final dos sistemas, como também, de bombas dosadoras com maior precisão de vazão para melhor monitoramento.

Quanto ao material de enchimento, recomenda-se usar com maior granulometria, mantendo certa proporção em relação a escala do reator, afim de aumentar a área superficial para adesão da população microbiana.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA et al. **Operação de filtros biológicos percoladores pós-reatores UASB sem a etapa de decantação secundária.** SCIELO – Eng. Sanit. Ambient. Vol.16, 2011. ISSN:1413-4152
- ARAUJO, T. L. S. **Desempenho de reator anaeróbio híbrido (leito fixo e manta de lodo) tratando esgoto sanitário em escala piloto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209/2011: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário.** Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969/1997: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação.** Rio de Janeiro, 1997.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Falta de água potável no mundo aparece relacionada a 80% das mortes e doenças.** Disponível em: <https://www.ana.gov.br/noticias-antigas/falta-de-a-gua-pota-vel-no-mundo-aparece.2019-03-14.1777251782>. Acesso em 29 de julho de 2019.
- ATLAS ESGOTO. **Despoluição das Bacias Hidrográficas.** Disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br/> Acesso em 23 de julho de 2019.
- BELLI FILHO, Paulo et al. **Controle e tratamento de odores de um reator anaeróbio com biofiltração.** Coletânea de Trabalhos Técnicos volume 2. Universidade de Brasília, 2016.
- BITTON, G. **Wasterwater Microbiology.** University of florida Gainesville, Department of Environmental Engineering Sciences. Viley-Liss. 478 p, 1994.
- BUSATO, R. de. **Desempenho de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente como tratamento de efluente de reator UASB: Estudo de caso da ETE Imbituva.** 237 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.
- CAMARGO, EDUARDO FREITAS M. **Tratamento anaeróbio de águas residuárias, em batelada, com microrganismos imobilizados e circulação da fase aquosa.** 230 p, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.
- CAMPOS et al. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.** (Projeto PROSAB). São Carlos, 1999.
- CHAGAS S. D. **Relação entre concentração de sólidos suspensos e turbidez da água medida com sensor de retroespalhamento óptico.** 78 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias volume 5: reatores anaeróbios** 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2016.

DUDA & OLIVEIRA. **Tratamento de águas residuárias de suinocultura em reator UASB e filtro anaeróbio em série seguidos de filtro biológico percolador.** SCIELO – Eng. Sanit. Ambient. Vol.16, 2011. ISSN:1413-4152

EMBRAPA SUÍNOS E AVES. **Sistemas de Tratamento de Dejetos Suínos.** Disponível em: <http://www.cnpqa.embrapa.br/invtec/27.html>. Acesso em 23 de julho de 2019.

ENVIRONQUIP. **Equipamentos.** Disponível em: <http://www.vironquip.com.br/sistemas/equipamentos/>. Acesso em 23 de julho de 2019.

FENG, et al. (2009). **Effect of solids retention time and temperature on waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation under alkaline conditions in continuous-flow reactors.** Bioresource Technology (100), 44-49.

FIA, et al (2009). **Influence of flow Direction in the performance of anaerobic filters.** Acta Scientiarum. ISSN: 1807-8621

FLORÊNCIO, T. M. **Degradação anaeróbia de efluente têxtil simu/lado com corante azo Direct Black 22 na presença de íons sulfato em reator anaeróbio de leito estruturado com fluxo ascendente.** 175 p. Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2018.

HOYOS, NESTOR LEONEL M. **Análise comparativa do desempenho de reator anaeróbio híbrido e reator de manto de lodo de fluxo ascendente (UASB) aplicados ao tratamento de esgoto sanitário.** 156p, Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

LEITE et al. **Análise comparativa dos efeitos da carga orgânica e do tempo de detenção hidráulica na digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto** SCIELO – Eng. Sanit. Ambient. Vol.20, 2015. ISSN:1413-4152

LIMA, ANA BEATRIZ B. V. de. **Pós-Tratamento de efluente de reator anaeróbio em sistema sequencial constituído de ozonização em processo biológico aeróbio.** 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

OLIVEIRA NETTO, A. P. de. **Reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo em escala piloto, com recirculação da fase líquida, aplicado ao tratamento de esgoto sanitário.** 195 p, Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

OLIVEIRA NETTO, A. P. de. **Reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo, com recirculação da fase líquida, aplicado ao tratamento de esgoto sanitário.** 207 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **ONU: 4,5 bilhões de pessoas não dispõem de saneamento seguro no mundo.** Disponível em: <https://nacoesunidas.org/onu-45-bilhoes-de-pessoas-nao-dispoem-de-saneamento-seguro-no-mundo/>. Acesso em: 29/07/2019.

POVINELLI & LEITE. **Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 1999.

SANTOS et al. **Tratamento biológico de águas residuárias em filtro biológico de fluxo descendente utilizando pneu triturado como material suporte.** 70ª Reunião Anual da SBPC, 2018.

SANTOS, J. V. T.; **Avaliação do desempenho de filtro biológico como pós-tratamento de reator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo visando o reuso de esgoto sanitário.** 50p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão. Delmiro Gouveia, 2018.

TONETTI et al. **Avaliação da partida e operação de filtros anaeróbios tendo bambu como material de recheio.** SCIELO – Eng. Sanit. Ambient. Vol.16, 2011. ISSN:1413-4152

TRATA BRASIL. **Novo Ranking do Saneamento Básico evidencia: melhores cidades em saneamento investem 4 vezes mais que as piores cidades no Brasil.** Disponível em: http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/ranking2019/PRESS_RELEASE___Ranking_do_Saneamento___NOVO.pdf/. Acesso em 29 de julho de 2019.

VIANA, A. B. **Tratamento anaeróbio de vinhaça em reator UASB operando em temperatura na faixa termofílica e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica.** 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias volume 1: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto 2 ed.** Belo Horizonte: UFMG, 1996