

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Tiago Fazolo

Influência de uma esponja de poliuretano instalada no meio filtrante de um filtro lento intermitente, com destaque para aclimação do sistema

Florianópolis

2023

Tiago Fazolo

Influência de uma esponja de poliuretano instalada no meio filtrante de um filtro lento intermitente, com destaque para aclimação do sistema

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.

Coorientador: Ailton Borges Rodrigues, MSc.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra

Fazolo, Tiago

Influência de uma esponja de poliuretano instalada no meio filtrante de um filtro lento intermitente, com destaque para aclimatação do sistema / Tiago Fazolo ; orientador, Bruno Segalla Pizzolatti, coorientador, Ailton Borges Rodrigues, 2023.
59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Tratamento de água. 3. Filtro lento intermitente. 4. BioSand Filter. 5. Esponja de poliuretano. I. Pizzolatti, Bruno Segalla . II. Rodrigues, Ailton Borges. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Tiago Fazolo

**Influência de uma esponja de poliuretano instalada no meio filtrante de um filtro lento
intermitente, com destaque para aclimação do sistema**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Sanitarista e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 07 de agosto de 2023.

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Fernando Hymnô de Souza, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Mirella Klausen da Silveira, Eng^a.
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todos os momentos de luz e conforto. Por todas as idas e vindas, os altos e baixos e o dar e receber.

A meus pais, Altair e Joice, pelo amor incondicional, por me acompanhar nessa trajetória, torcendo pelo meu sucesso. Sem vocês, nada eu seria. Minha eterna gratidão!

Ao meu irmão André, pelo apoio e companheirismo, desde nossa infância até hoje.

A toda minha família, pelo incentivo e carinho. Obrigado por ser meu porto seguro.

Ao meu cãopaneirinho Costelinha, por me alegrar e pelas nossas caminhadas na UFSC.

A todos meus amigos que de alguma forma colaboraram para o meu desenvolvimento acadêmico, pessoal e profissional.

Ao meu orientador, Professor Bruno Segalla Pizzolatti, pela dedicação, paciência e atenção dada em todos os momentos em que necessitei de ajuda na elaboração do meu TCC.

Ao meu coorientador, Ailton Borges Rodrigues, pela paciência, amizade e ensinamentos durante esta etapa.

Aos membros da banca Fernando Hymnô de Souza e Mirella Klausen da Silveira, pela disponibilidade e pelo conhecimento em analisar a presente pesquisa.

A Universidade Federal de Santa Catarina e ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, principalmente aos professores, pelos conhecimentos adquiridos ao longo da graduação.

Ao Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOÁ) e ao Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), pela disponibilidade dos laboratórios, materiais e equipamentos.

Finalmente, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram em minha vida, para que esse momento chegasse.

RESUMO

Moradias isoladas de países em desenvolvimento geralmente são desprovidas de tratamento e abastecimento público de água. O filtro lento intermitente - FLI (*BioSand Filter* - BSF) é uma tecnologia que pode ser empregada nesses lugares com objetivo de amenizar o problema do acesso à água potável. Nesse sentido, esse trabalho tem como objetivo avaliar a influência de uma esponja de poliuretano instalada na parte superior do meio filtrante de um filtro lento intermitente, verificando a aclimatação do sistema, a eficiência de tratamento e o operacional da unidade. Para isso, foram construídos, em escala piloto, dois filtros lentos intermitentes com e sem esponja instalada na parte superior do meio filtrante. As duas unidades eram com escoamento descendente, operando a uma taxa de filtração inicial de 400 L / m² h. Para a avaliação da eficiência dos filtros, foram analisados os seguintes parâmetros: temperatura, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, oxigênio dissolvido, pH, turbidez, cor aparente e verdadeira, coliformes totais e *Escherichia coli*. Também foi observada a relação entre a capacidade de retenção da turbidez pela esponja e a duração das carreiras de filtração. Os resultados demonstraram que a utilização da esponja, resultou em remoções médias superiores ao filtro sem esponja em relação à turbidez, cor aparente, cor verdadeira e *Escherichia coli*. Durante o tempo de operação, de 169 dias, foram realizadas quatro carreiras de filtração para o FLI sem esponja e apenas uma para o FLI com esponja, evidenciando menor frequência de limpeza. Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam a potencialidade do emprego da esponja de poliuretano no tratamento de água para filtros lentos intermitentes, tendo impacto na qualidade da água e na duração das carreiras de filtração.

Palavras-chave: Tratamento de água; Filtro lento intermitente; *BioSand Filter*; Esponja de poliuretano.

ABSTRACT

Isolated houses in low income countries generally lack public water treatment and supply. The intermittent slow filter (BioSand Filter - BSF) is a technology that can be applied in these places in order to reduce the problem of access to drinking water. In this sense, this final paper aims to evaluate the influence of a polyurethane sponge installed on the upper part of the filtering layer of an intermittent slow filter, by verifying the system's acclimation, its treatment efficiency and the unit's operation. To do so, two intermittent slow filters were built on a pilot scale, one with and one without a sponge installed on the upper part of the filter layer. Both units had downward flow, operating at an initial filtration rate of 400 L/m² h. To evaluate the efficiency of the filters, the following parameters were analyzed: temperature, electrical conductivity, total dissolved solids, dissolved oxygen, pH, turbidity, apparent and true color, total coliforms and Escherichia coli. It was also observed the relationship between the sponge's turbidity retention capacity and the length of the filtration runs. The results have shown that the use of the sponge resulted in higher average removals in comparison to the filter without a sponge in terms of turbidity, apparent color, true color and Escherichia coli. During the 169 days operating time, four filtration runs were performed for the BSF without sponge and only one for the BSF with sponge, which means a lower cleaning frequency. The results obtained in this research indicate the potential use of polyurethane sponge in water treatment for intermittent slow filters, having an impact on the water's quality and the length of the filtration runs.

Keywords: Water treatment; Intermittent slow filter; BioSand Filter; Polyurethane sponge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes do BSF	21
Figura 2 - Zonas do BSF	23
Figura 3 - Eficiência do BSF	24
Figura 4 - Curva granulométrica da areia comumente utilizada em filtros lentos	26
Figura 5 - Instalação dos filtros pilotos no LAPOÁ.....	29
Figura 6 - Localização do lago na Universidade Federal de Santa Catarina.....	30
Figura 7 - Ponto de coleta.....	30
Figura 8 - Esponja sobre a camada filtrante com uma pedra impedindo a sua flutuação	32
Figura 9 - Layout dos filtros	33
Figura 10 - Modelo do <i>Biosand Filter</i> desenvolvido pela CAWST.....	34
Figura 11 - Beckers utilizados na lavagem da esponja de poliuretano.....	36
Figura 12 - Temperatura.....	41
Figura 13 - Condutividade elétrica	42
Figura 14 - Sólidos totais dissolvidos.....	43
Figura 15 - Oxigênio dissolvido	44
Figura 16 - pH	45
Figura 17 - Turbidez.....	47
Figura 18 - Cor Aparente.....	48
Figura 19 - Cor Verdadeira.....	50
Figura 20 - Beckers após a lavagem da esponja de poliuretano	54
Figura 21 - Esponja de poliuretano nova, antes e depois da lavagem nos beckers	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do <i>BioSand Filter</i>	28
Quadro 2 - Tubulações, conexões e materiais utilizados na construção dos filtros	32
Quadro 3 - Parâmetros de qualidade de água analisados.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor máximo de turbidez da água bruta	20
Tabela 2 - Resultados do monitoramento dos filtros	40
Tabela 3 - Resultados das análises de Coliformes Totais (NMP/100mL).....	51
Tabela 4 - Resultados das análises de <i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	52
Tabela 5 - Duração das carreiras de filtração	53
Tabela 6 - Valores de turbidez retida na esponja de poliuretano.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	American Public Health Association
AWWA	American Water Works Association
BSF	BioSand Filter
CAWST	Centre for Affordable Water and Sanitation Technology
d_{10}	diâmetro efetivo
DN	Diâmetro Nominal
ETA	Estação de Tratamento de Água
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
FLI	Filtro Lento Intermitente
LAPOA	Laboratório de Potabilização das Águas
LIMA	Laboratório Integrado de Meio Ambiente
MS	Ministério da Saúde
NBR	Norma Técnica Brasileira
OD	Oxigênio dissolvido
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OMS	Organização Mundial da Saúde
PVC	Policloreto de Vinila
POU	<i>Point of Use</i>
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para a Infância
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
WEF	Water Environment Federation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	O DESAFIO DO ACESSO À ÁGUA POTÁVEL.....	17
2.2	FILTRAÇÃO.....	17
2.3	FILTRAÇÃO LENTA.....	18
2.3.1	Mecanismos de Filtração Lenta.....	19
2.4	BIOSAND FILTER (BSF)	19
2.4.1	Aspectos construtivos e operacionais do BSF	21
2.4.2	Mecanismos do BSF.....	22
2.4.3	Camada Biológica	23
2.4.4	Material Filtrante	24
2.4.4.1	<i>Areia</i>	25
2.4.4.2	<i>Espunja de poliuretano.....</i>	26
2.4.5	Limpeza do BSF	27
2.4.6	Vantagens e Desvantagens	28
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	LOCALIZAÇÃO E PERÍODO DE MONITORAMENTO DO EXPERIMENTO	29
3.2	ÁGUA DE ESTUDO.....	30
3.3	DESCRIÇÃO DOS FILTROS LENTOS INTERMITENTES.....	31
3.4	DIMENSIONAMENTO DO VOLUME DE ABASTECIMENTO DOS FILTROS	34
3.5	LIMPEZA E MANUTENÇÃO	35
3.6	PARÂMETROS MONITORADOS.....	36

3.6.1	Qualidade da Água	36
3.6.2	Parâmetro Operacional.....	38
4	RESULTADOS	39
4.1	QUALIDADE DA ÁGUA DE ESTUDO E FILTRADA	39
4.1.1	Temperatura	40
4.1.2	Condutividade Elétrica	41
4.1.3	Sólidos Totais Dissolvidos	42
4.1.4	Oxigênio Dissolvido	43
4.1.5	pH.....	44
4.1.6	Turbidez	46
4.1.7	Cor Aparente.....	47
4.1.8	Cor Verdadeira	49
4.1.9	Coliformes totais	50
4.1.10	<i>Escherichia coli</i>	51
4.2	DURAÇÃO DAS CARREIRAS DE FILTRAÇÃO	53
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Segundo estimativas da UNICEF (2019), uma em cada três pessoas em todo o mundo não tem acesso a água potável, sendo que a maior parte desta população reside em zonas rurais.

No ano de 2015, para melhorar o índice de pessoas atendidas pela falta d'água, a ONU propôs entre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, o ODS 6: Água potável e Saneamento, que visa “assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos”. Para cumprir esse objetivo, tem-se como uma das metas até 2030, “alcançar o acesso universal e equitativo à água potável e segura para todos” (ONU, 2021).

Diante deste cenário e para conseguir alcançar essa meta, tecnologias de tratamento de água de uso no local (*Point of Use* - POU) surgem com intuito de propiciar o fornecimento de água de qualidade a populações isoladas (MACIEL, 2018).

O filtro lento intermitente é uma tecnologia descentralizada, recomendada para tratar água em escala domiciliar, sendo difundida por Organizações Não Governamentais em países menos desenvolvidos, como é o caso do *Centre for Affordable Water and Sanitation Technology* (CAWST), organização canadense que desenvolve tecnologias práticas, treinamentos e consultorias de tratamento de água para regiões pobres e que precisam de água tratada.

Essa tecnologia de tratamento de água foi desenvolvida nos anos de 1990 pelo Dr. David Manz, da Universidade de Calgary, no Canadá (CAWST, 2012). Segundo Freitas (2017), o desenvolvimento do *Biosand Filter* (BSF) se baseou na concepção do filtro lento convencional com algumas adaptações, tornando-o adequado para o uso domiciliar. Essas mudanças permitiram a utilização do filtro conforme a necessidade do usuário (fluxo intermitente) e a realização da limpeza sem retirada da areia do filtro (MANZ, 2004).

Nos últimos anos, o BSF tornou-se um dos dispositivos mais populares de filtração no POU, devido a sua facilidade de construção e operação, bem como a sua eficácia (DURAN, 2020). No entanto, uma das suas limitações é em relação a qualidade da água bruta, uma vez que o excesso de material em suspensão na água produz condições ambientais adversas para a camada biológica presente acima da camada filtrante, comprometendo a qualidade microbiológica da água filtrada (LLOYD, 1996 apud FREITAS, 2017). Além do mais, esse excesso do sobrenadante provoca a obstrução dos vazios intergranulares do filtro, gerando uma diminuição na duração da carreira de filtração e conseqüentemente aumento da frequência de limpeza do filtro (DI BERNARDO, SABOGAL PAZ, 2008).

Assim, com o propósito de atenuar os efeitos causados pelo material em suspensão na camada filtrante, foram projetados e construídos dois pilotos de filtros lentos intermitentes. Apenas um dos filtros tinha esponja de poliuretano instalada na parte superior do meio filtrante, para avaliação da eficiência desta esponja no tratamento e na operação de limpeza da unidade. Este experimento foi desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina, *campus* Florianópolis, visando a construção de filtros economicamente viáveis, de fácil construção e operação e que a água produzida alcance os padrões estabelecidos pela Portaria de Consolidação GM/MS nº 5/2017, anexo XX, alterada pela Portaria nº 888/2021, do Ministério da Saúde, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (BRASIL, 2021).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliação da influência de uma esponja de poliuretano instalada na superfície do meio filtrante de um filtro lento intermitente domiciliar, com destaque para aclimatação do sistema, eficiência de tratamento e realização da limpeza.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Instalação do sistema piloto de filtração lenta intermitente com e sem esponja de poliuretano na parte superior do meio filtrante;
- Comparação em termos de qualidade a água produzida nos filtros lentos intermitentes estudados;
- Avaliação do desempenho da esponja de poliuretano com relação a carreira de filtração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O DESAFIO DO ACESSO À ÁGUA POTÁVEL

Aproximadamente 2,2 bilhões de habitantes em todo o mundo não tem acesso a água potável, das quais a maior parte reside em zonas rurais (UNICEF, 2019). No Brasil, segundo estimativas, apenas 28% das moradias rurais estão ligadas à rede pública de abastecimento (FUNASA, 2019b). Anualmente ocorrem mais de 800 mil mortes, consequência de doenças diarreicas ocasionadas pela falta de acesso à água potável e outras estruturas de saneamento (WHO; UNICEF, 2015).

Este déficit está relacionado não apenas com a inexistência da fonte de água, mas da falta de acessibilidade, seja por sua má qualidade ou pela distância em que se encontra, uma vez que em muitas localidades é inviável a ligação na rede pública de abastecimento de água (MACIEL, 2018).

No Brasil, a água é definida como um bem comum e seu acesso é garantido por lei (BRASIL, 2010). Além disso, a ampliação do acesso à água potável traria grandes benefícios econômicos, diminuindo os gastos com saúde da população e reduzindo as desigualdades sociais (OMS, 2011).

À vista disso, o acesso universal à água potável é um desafio para a comunidade científica na busca de tecnologias apropriadas. Dentre as tecnologias que fazem parte do POU, a filtração lenta em escala domiciliar permite produzir água suficiente diariamente, além de pouco investimento na instalação e ser sustentável (SOBSEY *et al.*, 2008).

2.2 FILTRAÇÃO

A filtração é um processo que se baseia na remoção de partículas, coloidais ou suspensas, e microrganismos da água, através da sua passagem por um meio poroso, geralmente areia (LIMA, 2019). Em uma Estação de Tratamento de Água, a filtração é o último processo que remove os sólidos remanescentes das unidades a montante, o que resulta do seu tratamento uma água com padrões de potabilidade (LIBÂNIO, 2010; DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008).

A filtração por gravidade pode ser classificada em rápida ou lenta. Estas se diferem pela taxa de filtração, onde a filtração lenta é de 20 a 50 vezes menor que a rápida. Dessa forma,

o filtro rápido tem uma área menor, cerca de 2 a 5% da área do filtro lento, mas necessita de estágios de pré-tratamento, como coagulação e floculação (HUISMAN; WOOD, 1974). De acordo com Isolani (2000), usualmente, os filtros rápidos funcionam com taxas de filtração entre 150 e 600 m³/m².d, enquanto os filtros lentos operam com taxas geralmente inferiores a 6 m³/m².d, embora na literatura existam indicações de taxas superiores.

2.3 FILTRAÇÃO LENTA

A tecnologia da filtração lenta é amplamente utilizada em todo o mundo e possivelmente uma das mais antigas formas de tratamento da água, segundo NAKAMOTO *et al.* (2014 apud FUNASA, 2019a).

Esse sistema é considerado a tecnologia mais apropriada para tratar água em pequenas comunidades por ser de simples construção, operação e manutenção, o que representa geralmente custos mais acessíveis (NASCIMENTO *et al.*, 2012). É utilizada em localidades do Brasil onde os recursos econômicos são escassos e a falta de mão de obra especializada impede a instalação de Estação de Tratamento de Água convencional (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999).

A filtração lenta é também conhecida como filtração biológica, pois as baixas taxas de filtração prolongam a carreira de filtração, permitindo um elevado tempo de detenção hidráulica no filtro, assim favorecendo a intensa atividade biológica na parte superior da camada filtrante auxiliando no tratamento da água (PIZZOLATTI, 2014). As baixas taxas de filtração aplicadas, entre 3 e 12 m³/m².d, permitem a remoção de material suspenso na superfície do meio filtrante por mecanismos físicos e a remoção de patógenos principalmente pela atividade biológica (FUNASA, 2019a). Os microrganismos presentes nessa atividade, atuam na remoção dos sólidos e principalmente de bactérias, vírus e cistos de *Giardia* (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999).

Além da taxa de filtração, o desempenho dos filtros lentos depende de uma série de outros fatores, tais como: temperatura, profundidade do meio filtrante, tamanho dos grãos de areia, idade do *schmutzdecke* e maturidade microbiológica do meio filtrante. Outro fator de limitação na filtração lenta convencional é a qualidade de água bruta, sendo que o valor máximo recomendado para a turbidez é de 10 NTU (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999).

Os filtros lentos são classificados conforme a sua operação, podendo ser de escoamento descendente ou ascendente, com fluxo contínuo ou intermitente, de nível constante ou variável.

2.3.1 Mecanismos de Filtração Lenta

Caracterizados pelas baixas taxas de filtração, nos filtros lentos atuam principalmente os seguintes mecanismos de filtração: transporte, aderência e purificação. Sendo que o mecanismo de purificação é regido principalmente pelas atividades biológicas (HUISMAN; WOOD, 1974).

Os mecanismos de filtração por transporte baseiam-se no transporte de partículas entre os poros do meio filtrante (LIMA, 2019). As atividades que mais se destacam são: ação física de coar, sedimentação, impacto inercial, difusão, atração de massas e atração eletrostática (HUISMAN; WOOD, 1974).

O mecanismo de aderência entre as partículas pode ocorrer diretamente na superfície dos grãos ou em partículas previamente retidas (PIZZOLATTI, 2010). Segundo Ferreira Filho (2017), atuam, principalmente, forças de Van der Waals, forças de origem eletrostática, pontes de hidrogênio e adsorção.

Por fim, as atividades biológicas são consideradas o mecanismo mais importante da purificação dentro da filtração lenta (HUISMAN; WOOD, 1974). De acordo com Haarhoff e Cleasby (1991 apud PIZZOLATTI, 2010), os principais mecanismos biológicos são: predação, limpeza (por vermes aquáticos), morte natural/inativação (quando exposto a ambientes hostis) e o efeito bactericida da luz solar. Os microrganismos provenientes da água bruta e da própria colonização do filtro lento estão presentes no meio filtrante, aderidos à superfície dos grãos e principalmente nos primeiros centímetros formando o *schmutzdecke*, onde ocorre com maior intensidade a atividade biológica.

2.4 BIOSAND FILTER (BSF)

Essa tecnologia de tratamento de água foi inventada nos anos de 1990 pelo Dr. David Manz, da Universidade de Calgary (Canadá), quando a desenvolveu através da variação do tratamento por filtração lenta, porém, com operação em fluxo intermitente (CAWST, 2009). O objetivo do autor era criar um filtro eficiente, barato e em pequena escala para possibilitar o

tratamento de água em comunidades desfavorecidas de países subdesenvolvidos (FREITAS, 2017).

Nos últimos anos, o BSF tornou-se um dos dispositivos mais populares de tratamento de água de uso no local (*Point of Use* - POU), devido a sua facilidade de construção e operação, bem como a sua eficácia (DURAN, 2020). De acordo com o relatório de 2016 da CAWST, cerca de 10 milhões de pessoas foram atendidas com a instalação dos BSF (CAWST, 2017). Esse crescimento é fruto do trabalho de diversas organizações que contribuem com o acesso universal à água tratada, como é o caso da CAWST, organização canadense que desenvolve tecnologias práticas, treinamentos e consultorias de tratamento de água para regiões pobres.

Em termos de eficiência, o BSF apresenta remoção de até 100% das partículas maiores que o material coloidal e a eliminação das bactérias e vírus é de 90 a 99% (MANZ, 2007). Para que ocorra essa eficiência de tratamento, é importante que o usuário opere e mantenha o seu filtro adequadamente (CAWST, 2009).

O BSF é um filtro que pode ser abastecido por diversas fontes de água, por exemplo, água da chuva, águas subterrâneas profundas ou rasas, rios, lagos ou outros tipos de águas superficiais (CAWST, 2009). Dessa maneira, independentemente da fonte de água bruta, as principais limitações são cor e turbidez elevadas (DURAN, 2020). Conforme CAWST (2009), ao utilizar água bruta com elevados níveis de turbidez, os filtros acabam colmatando mais rapidamente, diminuindo a carreira de filtração e ocasionando o procedimento de limpeza. A Tabela 1 demonstra os valores de turbidez da água bruta indicados por alguns autores para uso em filtros lentos intermitentes.

Tabela 1 - Valor máximo de turbidez da água bruta

Autor	Turbidez (NTU)
CAWST (2009)	< 50
Manz (2007)	< 20
Young-Rojanschi; Madramootoo (2014)	12,6 ± 7,6

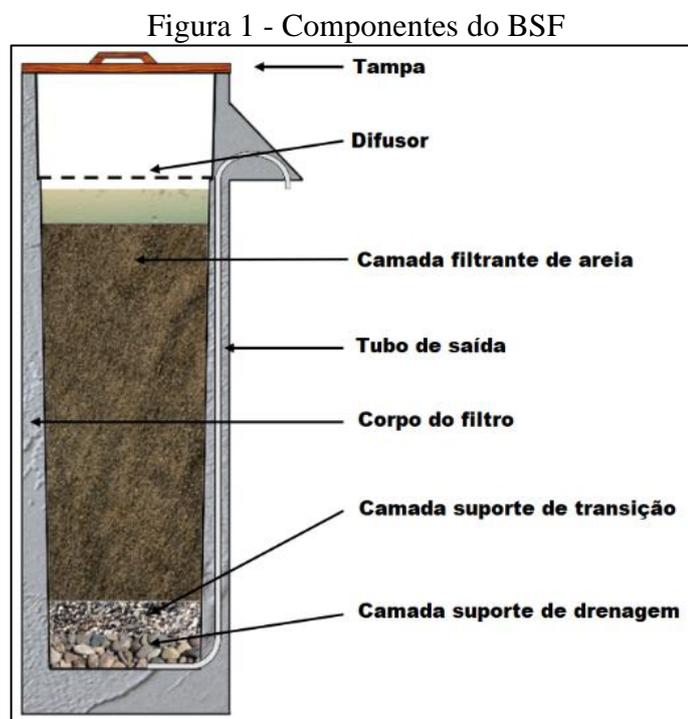
Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

O valor máximo da turbidez do efluente recomendado por CAWST (2009) na entrada do BSF é de 50 NTU, devido ao padrão de potabilidade em alguns países ser de 5 NTU. No Brasil, a portaria nº 888, de 2021, do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), estabelece o parâmetro mais restritivo, de 1 NTU para água filtrada, sendo assim recomendado utilizar valores menores que CAWST (2009), no efluente, para não sobrecarregar o filtro. Dessa forma,

segundo Freitas (2017) pode ser utilizada água bruta com valores máximos de turbidez de 10 NTU tolerando picos de 50 NTU por curtos períodos de tempo.

2.4.1 Aspectos construtivos e operacionais do BSF

A Figura 1 apresenta os componentes do modelo de filtro presente no manual *Biosand Filter Manual – Desing, Construction, Installation, Operation and Maintenance*, desenvolvido pelo *Centre for Affordable Water and Sanitation Technology - CAWST* em 2009.



Fonte: Adaptado CAWST, 2009.

Entre os componentes, podemos encontrar a tampa, o difusor, a camada filtrante de areia, a camada suporte de transição, a camada suporte de drenagem, o tubo de saída e o corpo do filtro. A tampa tem como função impedir a contaminação e a entrada indesejável de pragas. O difusor tem pequenos orifícios que fazem com que a água escoe lentamente evitando a formação de caminhos preferenciais, mantendo a camada de areia estável. A camada filtrante de areia é responsável pela remoção dos patógenos e redução dos sólidos suspensos. A camada suporte de transição sustenta o meio filtrante e bloqueia a saída de areia pela tubulação. A camada suporte de drenagem permite o escoamento da água filtrada para o tubo de saída. O

tubo de saída conduz a água filtrada para o exterior do filtro. O corpo do filtro armazena as camadas de areia e suportes.

Com dimensões de aproximadamente 1,0 m de altura e 0,30 m de largura, e capacidade no reservatório de 12 L de água bruta, esse filtro é uma adaptação do filtro lento convencional (CAWST, 2012). Com escala reduzida pode ser facilmente transportado e utilizado em ambiente doméstico, sendo uma tecnologia que não necessita de mão de obra especializada na sua construção.

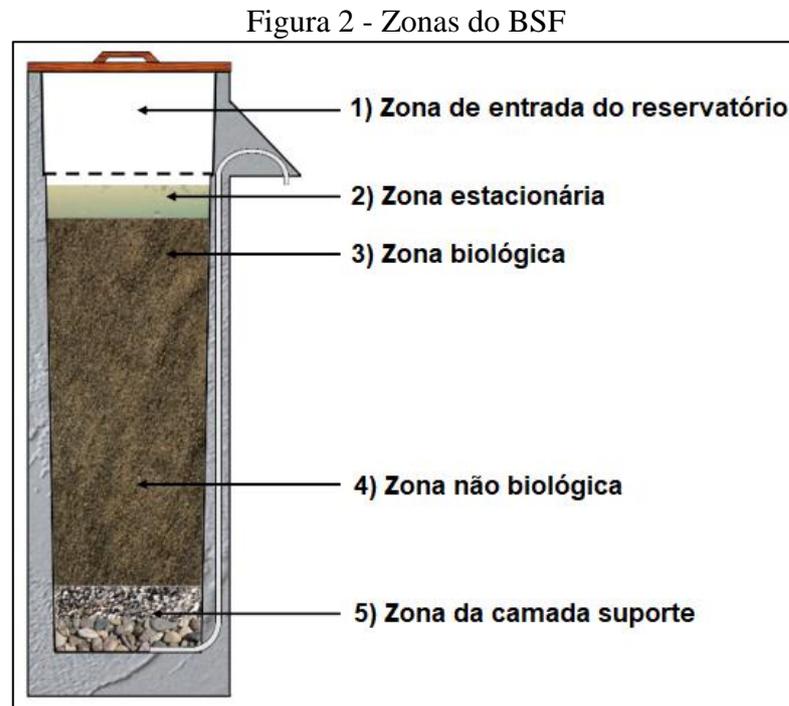
De acordo com CAWST (2009), o BSF é mais eficaz e eficiente quando operado de forma intermitente e alimentado continuamente. O período de pausa, tempo necessário para que os mecanismos atuantes no *schmutzdecke* tratem a água, deve ser de 1 a 48 h depois que a água tiver parado de fluir. Esse período é importante porque dá tempo para que os microrganismos presentes no *schmutzdecke* consumam os patógenos e nutrientes provenientes da água bruta.

Para que ocorra a filtração, o filtro é alimentado com água bruta pela parte superior. Devido à elevada carga hidráulica, a água é empurrada através do difusor para o topo da camada filtrante. O nível d'água dentro do filtro desce à medida que flui uniformemente pela areia. Com a diminuição da coluna de água sobre o material filtrante, haverá diminuição da pressão para forçar a passagem da água através do filtro, ocasionando na diminuição da taxa de fluxo com o tempo. Em um dado momento, quando o nível d'água dentro do filtro estiver na mesma altura do tubo de saída, a água tratada finalmente para de fluir (CAWST, 2009).

2.4.2 Mecanismos do BSF

Como apresentado anteriormente, na filtração lenta as partículas e os patógenos são removidos por três mecanismos: transporte, aderência e, principalmente, pelas atividades biológicas. Segundo Manz (2007), o BSF nada mais é que uma variação do filtro lento tradicional. Nesse sentido, CAWST (2012) evidencia que os patógenos e os sólidos suspensos são removidos por quatro maneiras diferentes dentro da zona biológica e da camada filtrante de areia do BSF. No primeiro meio ocorre o aprisionamento mecânico, onde os sólidos suspensos e os patógenos são fisicamente retidos por serem maiores que os grãos da camada filtrante de areia. Na predação, os patógenos são consumidos por outros microrganismos na zona biológica. Na adsorção, os sólidos suspensos e os patógenos ficam aderidos nos grãos de areia. Por último, ocorre a morte natural porque não há quantidade suficiente de alimento e oxigênio para que os patógenos sobrevivam.

Na Figura 2 são apresentadas as cinco zonas distintas, com diferentes funcionalidades, aonde acontecem os mecanismos de filtração do BSF desenvolvido por CAWST (2009): 1) zona de entrada do reservatório, 2) zona estacionária, 3) zona biológica, 4) zona não biológica e 5) zona da camada suporte.



Fonte: Adaptado CAWST, 2009.

A zona de entrada do reservatório é onde a água é despejada na entrada do filtro. A zona estacionária mantém úmida a areia enquanto deixa o oxigênio passar para a camada biológica. A zona biológica se desenvolve no topo (5-10 cm) da camada filtrante de areia. A superfície de areia remove patógenos, partículas suspensas e outros contaminantes. Como nos filtros de areia lentos, uma camada biológica de microrganismos (*schmutzdecke*) se desenvolve no topo (1-2 cm) da superfície da camada filtrante de areia. A zona não biológica não contém praticamente nenhum microrganismo vivo devido à falta de nutrientes e oxigênio. A zona da camada suporte mantém a areia no lugar e protege o tubo de saída do entupimento.

2.4.3 Camada Biológica

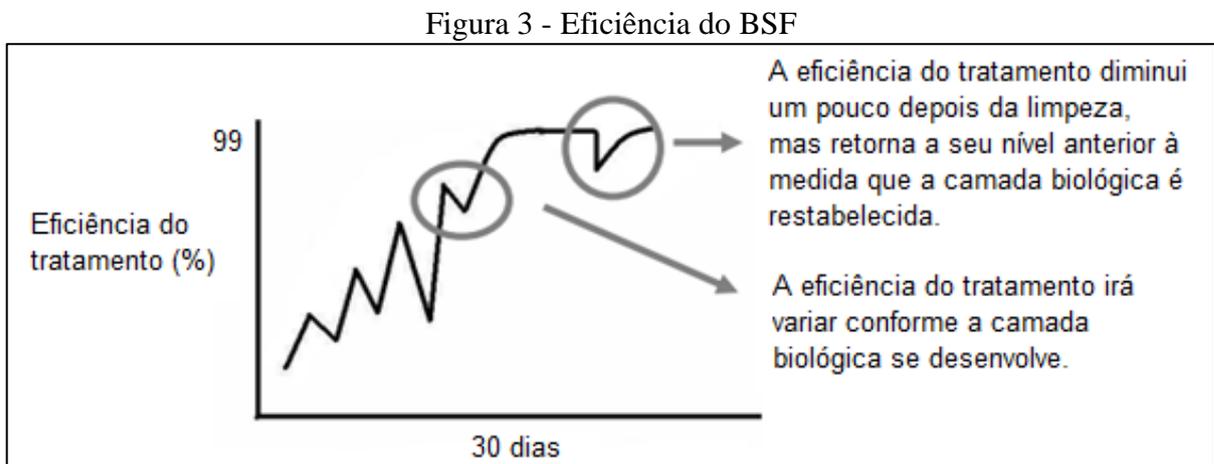
A camada biológica formada nos primeiros centímetros da camada filtrante de areia, é também conhecida como *schmutzdecke*, termo alemão que significa camada de sujeira. É

composta por uma variedade de formas de vida, como algas, plâncton, diatomáceas, protozoários, rotíferos e bactérias (HUISMAN; WOOD, 1974). Esta camada está localizada no topo do leito filtrante de areia, e pode apresentar uma coloração mais escura, decorrente dos sólidos suspensos retidos (CAWST, 2009).

O filtro com areia nova tem normalmente um tempo de amadurecimento, o que pode levar dias para a formação do *schmutzdecke* e melhora da qualidade da água (PIZZOLATTI, 2014). De acordo com CAWST (2009), o *schmutzdecke* pode levar até 30 dias para se estabilizar biologicamente. Nesse intervalo de tempo, a eficiência e a demanda de oxigênio aumentarão à medida que a camada biológica crescer.

A camada biológica é o componente chave da remoção dos patógenos. Sem ela, o filtro remove cerca de 30-70% dos patógenos através de aprisionamento mecânico e adsorção, sendo que, com a sua formação ideal a sua eficiência aumentará para até 99% (CAWST, 2009).

A Figura 3 ilustra como funciona a camada biológica. O processo pode variar, pois alguns filtros necessitam de um período de tempo mais curto ou mais longo para o seu desenvolvimento, dependendo da quantidade e da fonte de água utilizada (CAWST, 2009).



Fonte: Adaptado CAWST, 2009.

2.4.4 Material Filtrante

Para Sorgato (2019), “as características do meio filtrante representam um aspecto relevante para o processo de filtração”. Dessa forma, desde a sua criação, a filtração lenta evoluiu significativamente através de estudos realizados para determinar quais características da areia empregada como material filtrante maximizam a eficiência do tratamento (LIMA, 2019).

A areia é o principal material empregado como meio filtrante nos filtros das ETAs. Diversas pesquisas estão sendo realizadas com outros tipos de materiais capazes de substituir, integralmente ou parcialmente, a areia comumente utilizada, sem que ocasione perdas na eficiência do tratamento (LIMA, 2019). Nesse sentido, por exemplo, a remoção de matéria orgânica dissolvida é beneficiada ao empregar uma camada intermediária de carvão ativado, fato não encontrado no meio filtrante, de filtros lentos, composto somente por areia (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999). As mantas sintéticas não tecidas, devido ao aumento da duração da carreira de filtração e da facilidade de limpeza, podem ser outro material apto a substituir a areia em filtros lentos (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008).

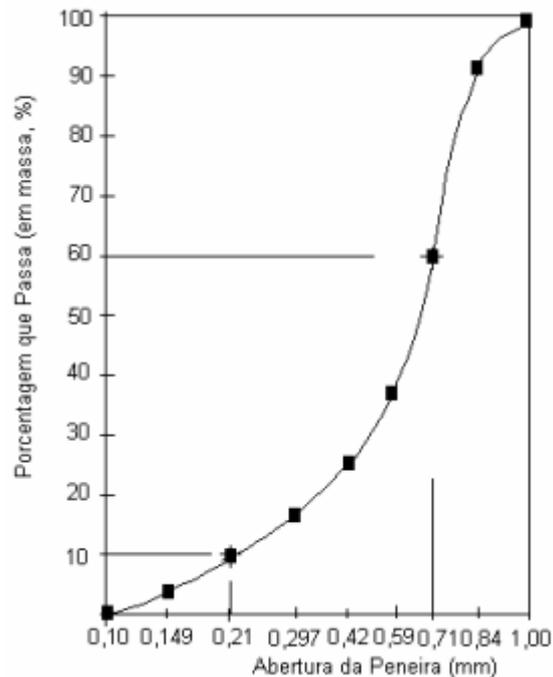
2.4.4.1 Areia

Em 1703, o pesquisador Phillippe La Hire sugeriu o tratamento da água em domicílio através da utilização do filtro de areia e cisterna. No início de 1800, a filtração lenta de areia estava começando a ser usada regularmente na Europa (USEPA, 2000). De acordo com Pizzolatti (2010), os filtros lentos de areia têm uma longa história de sucesso no tratamento da água, quando aplicado à fonte apropriada, construída e utilizada adequadamente.

A NBR 12216 (ABNT, 1992) estabelece para os filtros lentos, constituídos de areia, as seguintes características da camada filtrante: espessura mínima de 0,90 m; tamanho efetivo de 0,25 a 0,35 mm e coeficiente de uniformidade menor que 3. Para cada tipo de filtro existe uma diferente granulometria da camada, para o *Biosand Filter* recomenda-se diâmetro efetivo de 0,15 mm enquanto que para o filtro lento tradicional 0,35 mm (MANZ, 2007).

As características da areia utilizada nos filtros lentos, são obtidas pela curva granulométrica, que relaciona, no eixo das abscissas a abertura das peneiras da série granulométrica e, no das ordenadas, a porcentagem acumulada da areia que passa (em massa) nas peneiras (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999). A Figura 4 apresenta uma curva granulométrica da areia comumente usada nos filtros lentos.

Figura 4 - Curva granulométrica da areia comumente utilizada em filtros lentos



Fonte: Di Bernardo; Brandão; Heller (1999).

O BSF desenvolvido por CAWST (2009) possui espessura da camada filtrante de areia de aproximadamente 55 cm. Estudos demonstram que os sólidos e as bactérias são removidos, principalmente, nos primeiros 30 cm de profundidade, além dessa profundidade, os parâmetros de coliformes totais, *Escherichia coli*, turbidez e cor aparente apresentam variações inexpressivas nos resultados (MURTHA; HELLER, 1999).

Bellamy *et al.* (1985) evidenciaram que variações na profundidade da camada filtrante não causam grandes alterações na remoção de coliformes. Na sua pesquisa, os autores obtiveram eficiência de remoção de 97%, com uma profundidade de 97 centímetros. Ao reduzirem a profundidade para 48 centímetros, a eficiência caiu somente 2%, indo para 95%.

2.4.4.2 Esponja de poliuretano

Em 1746, foi patenteado o primeiro projeto de filtro pelo cientista francês Joseph Amy, o seu interior era composto basicamente de esponja e areia com uma variedade de configurações (RIWRB, 2009 apud PIZZOLATTI, 2010). No ano de 1991, os pesquisadores Sens, Azou e Martin utilizaram a esponja de poliuretano em filtração de água para fins de potabilização. Na continuação dos seus estudos, em 1992, Sens, Martin e a Bectra International S. A. desenvolveram um projeto de uma estação transportável de tratamento de água para fins

militares, onde utilizaram esponja de poliuretano impregnada de carvão ativado na etapa de filtração (ISOLANI, 2000).

De acordo com Isolani (2000), na fabricação do poliuretano, além da reação de polimerização, ocorre também uma outra reação que libera gás, fazendo com o poliuretano cresça e fique cheio de bolhas no seu interior. A filtração em esponjas assemelha-se com o sistema granular, porém pelas suas características no processo de fabricação possibilita um meio poroso não granular. A utilização das esponjas permite uma construção leve, compacta e com facilidade de limpeza do meio filtrante.

De maneira semelhante, estudos evidenciam que a colocação de mantas sintéticas não tecidas, no topo da camada filtrante, facilita a limpeza dos filtros lentos. O uso desse tipo de material, propicia apenas a limpeza da manta para que o filtro seja colocado novamente em operação, não sendo necessário a remoção da camada superior de areia, lavagem da areia e posterior recolocação. Além disso, há os benefícios da redução na camada filtrante de areia para cerca de 40 cm e as carreiras de filtração são prolongadas até cinco vezes mais do que as comparadas com a camada de areia da mesma espessura sem a utilização das mantas (DI BERNARDO, SABOGAL PAZ, 2008).

2.4.5 Limpeza do BSF

Ao longo do tempo, o excesso de material em suspensão na água bruta, provoca obstrução da camada filtrante, gerando diminuição da duração da carreira de filtração e aumento da frequência da limpeza do filtro (DI BERNARDO, SABOGAL PAZ, 2008). Do mesmo modo que, com o meio filtrante obstruído resultará na diminuição da vazão. A vazão mais lenta melhora a qualidade da água, porém pode ficar lenta o suficiente para se tornar inconveniente para o usuário por demorar muito tempo para o filtro produzir água tratada, podendo optar por não utilizar mais o filtro (DURAN, 2020).

CAWST (2009) determina que quando a vazão se tornar muito mais lenta do que a taxa de filtração recomendada, o usuário precisará realizar a limpeza pelo método *Swirl and Dump*. O procedimento consiste em remover o difusor e então agitar o sobrenadante com a palma da mão através de movimentos circulares. Após isso, retirar a água suja com auxílio de um copo, nivelar o meio filtrante, repor o difusor e finalmente reabastecer o filtro.

Esse método possibilita recuperar a taxa de filtração após a limpeza, pois não afeta a capacidade de remoção de microrganismos dos filtros, o que permite que o *schmutzdecke* alcance o amadurecimento mais rápido se não houver retirada da areia (MANZ, 2004).

2.4.6 Vantagens e Desvantagens

O BSF foi uma das tecnologias estudadas por Loo *et al.* (2012) na avaliação de diferentes alternativas de tecnologias de tratamento de água para situações emergenciais. As vantagens e desvantagens obtidas por Loo *et al.* (2012) estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do *BioSand Filter*

Vantagens	Desvantagens
Nenhum produto químico necessário	Eficiência de desinfecção afetada pela turbidez
Simple de usar	Longo tempo de arranque (maturação do filtro)
Pode ser construído com materiais locais	Difícil implantação rápida
Baixo custo	Requer manutenção regular
Redução documentada de protozoários e bactérias	Baixo rendimento
Redução documentada dos riscos de diarreia	Pouca remoção de vírus

Fonte: LOO *et al.* (2012).

3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos neste estudo, foram dimensionados, construídos e operados dois filtros lentos intermitentes, com e sem esponja de poliuretano sobre a camada filtrante de areia.

3.1 LOCALIZAÇÃO E PERÍODO DE MONITORAMENTO DO EXPERIMENTO

Os filtros foram construídos e operados nas instalações do Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOÁ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sendo este um local protegido das ações do tempo. O abastecimento acontecia diariamente e os filtros foram alocados próximos à janela, de modo que, nos finais de semanas e feriados quando o LAPOÁ encontrava fechado, era possível o abastecimento (Figura 5). O período de monitoramento iniciou em 04 de junho de 2021 e finalizado em 27 de dezembro de 2021, compreendendo 207 dias.

Figura 5 - Instalação dos filtros pilotos no LAPOÁ



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

3.2 ÁGUA DE ESTUDO

A água utilizada nesse estudo era proveniente do lago localizado entre o Centro de Convivência e o Centro de Cultura e Eventos, da UFSC (Figura 6). A água deste lago não é utilizada para consumo, somente para paisagismo do campus e também como habitat principalmente de aves e peixes ornamentais (Figura 7). A água bruta era coletada diariamente e levada até o LAPOÁ, onde era diluída com a água da torneira, a qual ficava reservada em galões por, pelo menos, um dia, para ocorrer evaporação do cloro residual. A proporção de diluição era de 1:4 para que a água de estudo tivesse uma turbidez entre 4 e 10 NTU.

Figura 6 - Localização do lago na Universidade Federal de Santa Catarina



Fonte: Google Earth (2023).

Figura 7 - Ponto de coleta



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

3.3 DESCRIÇÃO DOS FILTROS LENTOS INTERMITENTES

Os filtros lentos implementados são de regime intermitente, com fluxo descendente. Foram construídos com tubos de PVC de diâmetro nominal de 100 mm e diâmetro interno de 96,4 mm. A altura de cada filtro é de 1,0 m, sendo que para a camada filtrante de areia foi adotado 40 cm de altura, com diâmetro efetivo (d_{10}) de 0,30 mm e coeficiente de uniformidade de 1,6. A camada suporte é formada por três camadas de pedregulhos, totalizando 10 cm de altura, onde a granulometria da camada inferior é de 6,65 a 12,7 mm (4 cm de altura), da camada intermediária de 3,18 a 6,65 mm (3 cm de altura) e da camada superior de 2 a 3,18 mm (3 cm de altura). Os materiais utilizados na camada filtrante e na camada suporte, que estavam disponíveis no LAPOÁ durante o período de realização desta pesquisa, eram de procedência da empresa Clarifil Rheiss Saneamento Ambiental Ltda, especializada na produção e fornecimento de materiais filtrantes.

As saídas dos filtros são de PVC com diâmetro de 20 mm, no começo dessa tubulação há uma tela de *Nylon* com objetivo de impedir a passagem dos pedregulhos na água coletada para análise. Na parte superior das saídas há um tê de ampliação de 25 mm, onde é possível introduzir a sonda e coletar os dados de temperatura e oxigênio dissolvido diretamente dos filtros, evitando interferência externa. Os filtros encontram-se alocados sobre blocos de concreto. O Quadro 2 apresenta as tubulações, conexões e materiais utilizados na construção dos filtros.

A diferença entre os dois filtros, é que um apresenta sobre sua camada filtrante uma esponja de poliuretano com 2 cm de espessura e densidade de 15 Kg/m³. Foi colocada uma pedra sobre a esponja impedindo a sua flutuação (Figura 8). Dessa forma, o filtro com esponja terá acima da camada filtrante a esponja de 2 cm de espessura com mais 5 cm de lâmina d'água mínima, já o outro filtro terá 7 cm de lâmina d'água mínima acima da camada filtrante. Essa lâmina d'água tem como função proteger a camada biológica contra o gotejamento da água proveniente do difusor, além de mantê-la úmida.

Quadro 2 - Tubulações, conexões e materiais utilizados na construção dos filtros

Corpo do Filtro	Tubo PVC esgoto DN 100 mm CAP PVC esgoto DN 100 mm Anel de borracha DN 100 mm Tubo PVC esgoto DN 100 mm cortado – suporte difusor
Tubulação de saída	Abraçadeira de <i>Nylon</i> Tela de <i>Nylon</i> Adaptador soldável com anel 20 mm Tubo soldável DN 20 mm União soldável DN 20 mm Joelho 90° soldável DN 20 mm Registro esfera soldável DN 20 mm Tê soldável DN 25 mm
Difusor	CAP DN 100 mm cortado e perfurado
Tampa	Pote
Suporte	Blocos de concreto

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

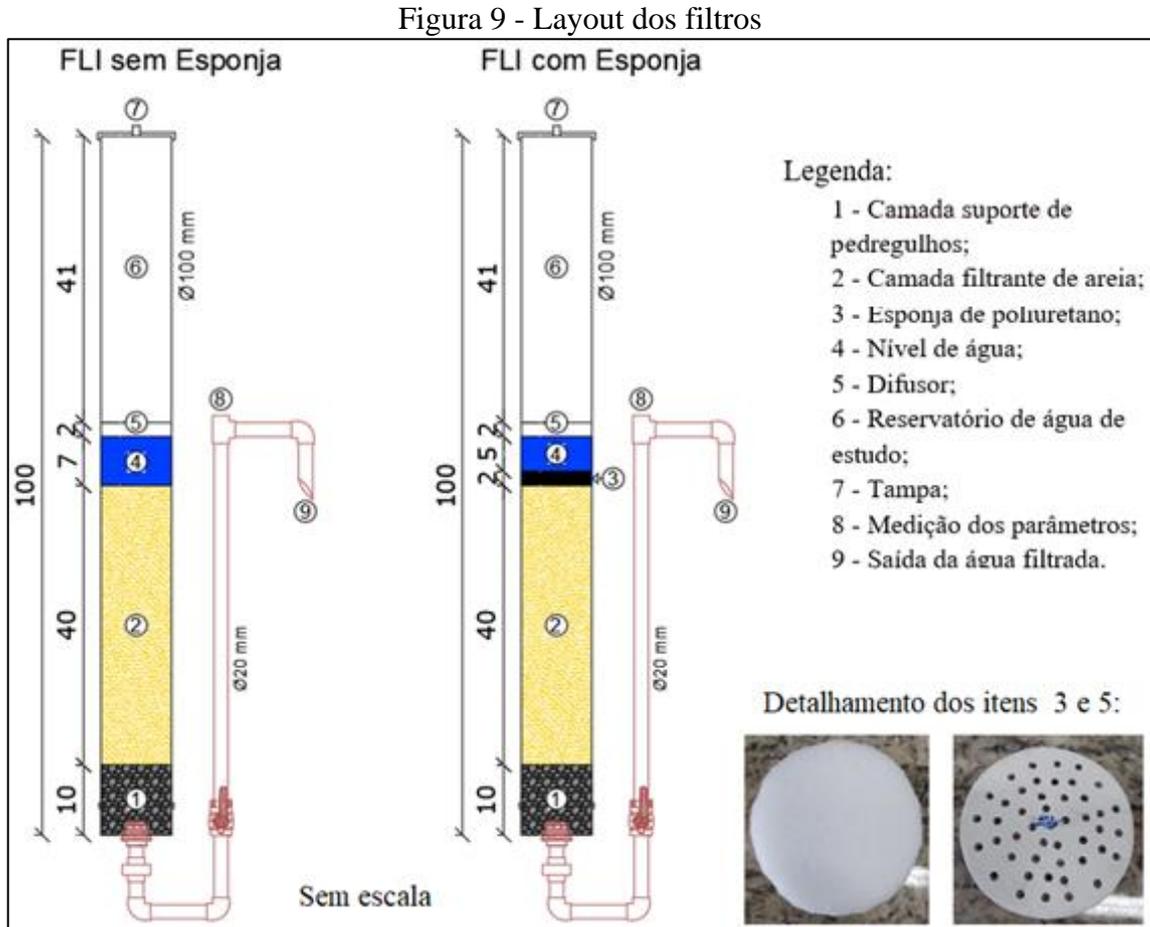
Em cada filtro há um prato difusor, fazendo com que a água de estudo escorra lentamente e de forma equivalente sobre a lâmina d'água, evitando a perturbação do *schmutzdecke*.

Figura 8 - Esponja sobre a camada filtrante com uma pedra impedindo a sua flutuação



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

A Figura 9 apresenta, de forma ilustrativa, o *layout* dos filtros com as dimensões e disposição dos materiais.



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

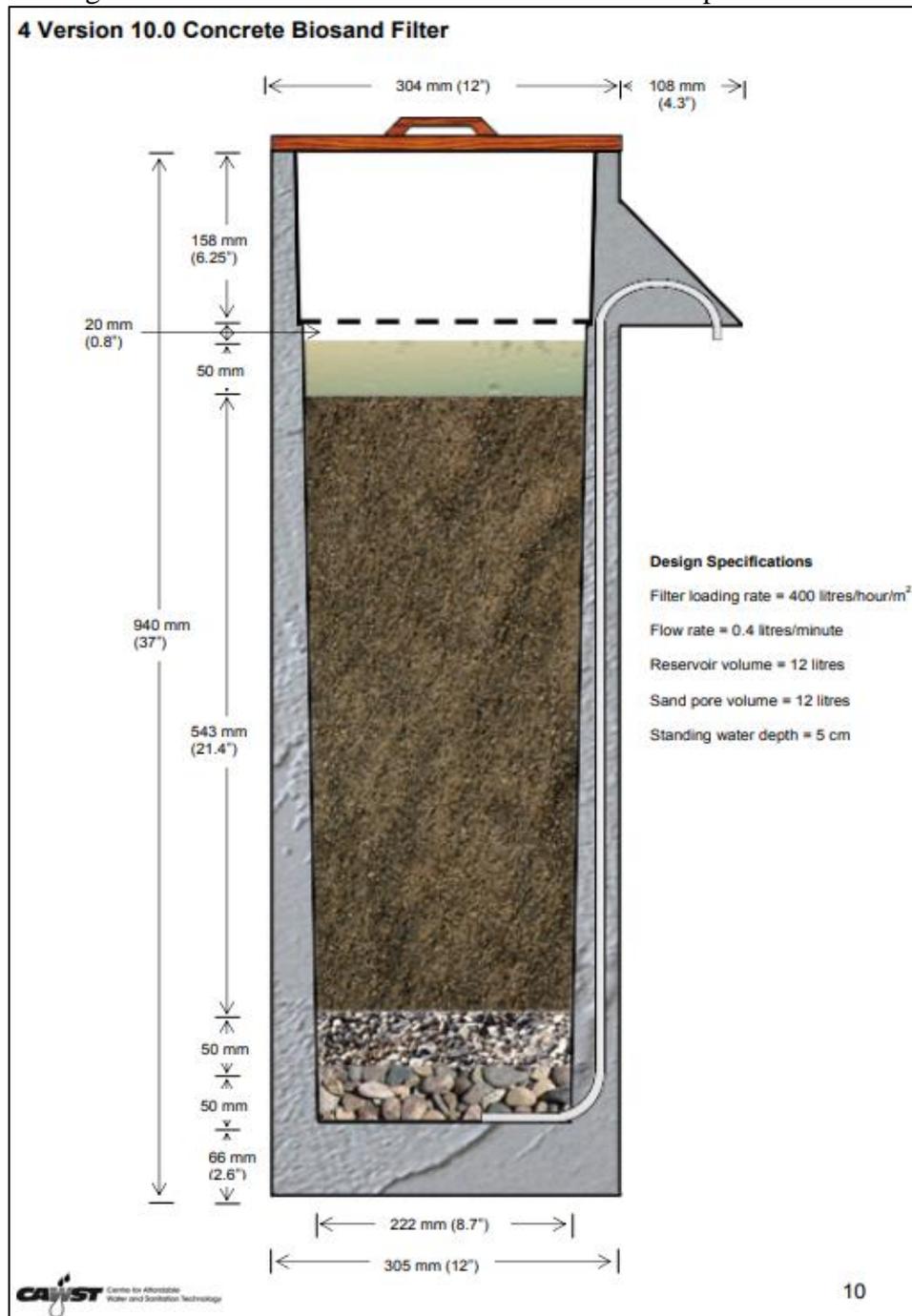
O teste de estanqueidade foi realizado após a construção dos filtros, antes da colocação das camadas suporte e filtrante, onde os filtros foram enchidos com água potável e deixados durante um final de semana para verificar se não havia vazamento. Após a colocação das camadas suporte e do material filtrante, os filtros foram alimentados com água potável, por um período de 3 dias, para lavagem do meio filtrante e remoção de impurezas.

A partir deste período, os filtros foram colocados em pré operação sendo alimentados com água de estudo por 38 dias. Durante este período de aclimatação, analisou-se a turbidez da água filtrada verificando a presença de material filtrante na saída dos filtros e também do oxigênio dissolvido com o intuito de averiguar a formação da camada biológica. Seguidamente, entrou-se na etapa de operação, onde todos os parâmetros começaram a ser monitorados entre os dias 12 de julho a 27 de dezembro de 2021, totalizando 169 dias.

3.4 DIMENSIONAMENTO DO VOLUME DE ABASTECIMENTO DOS FILTROS

Os filtros são baseados na versão nº 10 do manual desenvolvido pela organização CAWST (2009). As especificações encontram-se na Figura 10, a qual traz que a taxa de carregamento do filtro ou a taxa de filtração inicial não deve ser superior a 400 litros por hora por metro quadrado (400 L/h /m²) da área de superfície de areia.

Figura 10 - Modelo do *Biosand Filter* desenvolvido pela CAWST



Fonte: CAWST (2009).

Através dessas informações, para o dimensionamento desses filtros será adotado o valor máximo da taxa de filtração, pois será feito apenas uma alimentação por dia. Por meio da Equação 1 foi determinada a vazão de infiltração de 2,919 L/h. Adotou-se que os filtros seriam abastecidos com 3,0 L/dia de água de estudo, com período de intermitência de 24 horas.

$$Q = T \cdot A_f \quad (1)$$

onde:

Q = vazão do filtro (L/h);

T = taxa de filtração (L/m² h);

A_f = área superficial de filtração (m²).

3.5 LIMPEZA E MANUTENÇÃO

A versão atualizada do manual nº 10, desenvolvido pela CAWST (2012), denota que a vazão deve ser de 300 a 450 mL/min, sendo o valor recomendado de 400 mL/min quando o reservatório estiver cheio. Se a vazão for superior a 450 mL/min, os patógenos podem ser forçados através das camadas do filtro muito rapidamente e não serem removidos da água tratada. Se a vazão for inferior a 300 mL/min, o filtro tratará bem a água, porém pode-se tornar inconveniente para o usuário por demorar muito tempo para o filtro produzir água tratada.

Dessa forma, utilizando o valor de 300 mL/min como referência, foi calculada proporcionalmente à vazão mínima inicial para os filtros em estudo, pois as áreas de filtração dos pilotos instalados no LAPOÁ são menores em relação ao sistema desenvolvido pela CAWST (2012). Sendo assim, a limpeza seria realizada quando a vazão inicial ficasse abaixo do valor mínimo calculado de 36,48 mL/min.

O método convencional de raspagem foi utilizado para limpeza dos filtros. Esse método consiste em remover o prato difusor, com auxílio de uma espátula realiza a raspagem dos primeiros centímetros do meio filtrante e após o sobrenadante é sifonado para fora do filtro com uma mangueira. A partir disso, nivela-se o meio filtrante, coloca-se o prato difusor no suporte, adiciona-se novamente água de estudo até o nível de saída da água filtrada e completa com o abastecimento dos 3,0 L de água de estudo para que o filtro entre em operação novamente. Esse mesmo processo é realizado no filtro com esponja, a única diferença é que a

esponja de poliuretano é retirada e lavada em cinco beckers consecutivos com 500 mL de água de estudo, demonstrados na Figura 11.

Figura 11 - Beckers utilizados na lavagem da esponja de poliuretano



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

3.6 PARÂMETROS MONITORADOS

Para monitorar a eficiência dos filtros foram realizadas coletas da água de estudo e das águas filtradas. As análises eram feitas, de segunda a sexta-feira, nos laboratórios localizados no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC.

Os parâmetros monitorados nesta pesquisa foram divididos em qualidade da água e operacional.

3.6.1 Qualidade da Água

De acordo com o objetivo do trabalho, para analisar o desempenho dos filtros, definiram-se os parâmetros de qualidade de água, unidade, equipamentos utilizados e a frequência de cada análise (Quadro 3). Alguns dos parâmetros avaliados nas águas em estudo estão presentes na Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021, do Ministério da Saúde, que dispõe sobre a qualidade de água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Os procedimentos para realização das análises foram seguidos de acordo com as metodologias descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017). As análises de cor aparente, cor verdadeira, coliformes totais, *Escherichia coli* e do pH com o pHmetro KASVI foram realizados no LIMA, enquanto que a

turbidez, oxigênio dissolvido, temperatura, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e pH com a sonda HACH foram analisadas no LAPOÁ.

Quadro 3 - Parâmetros de qualidade de água analisados

Análise	Unidade	Equipamento	Frequência
Turbidez	NTU	Turbidímetro HACH 2100N	segunda a sexta-feira
OD	mg/L	Sonda HACH multiparâmetros-HQ40d	segunda a sexta-feira
Temperatura	°C	Sonda HACH multiparâmetros-HQ40d	segunda a sexta-feira
Condutividade Elétrica	µS/cm	Medidor portátil 8306 AZ	segunda a sexta-feira
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	Medidor portátil 8306 AZ	segunda a sexta-feira
pH		Sonda HACH multiparâmetros-HQ40d e pHmetro KASVI modelo K39-0014PA	segunda a sexta-feira e terça a sexta-feira
Cor Aparente	uH	Espectrofotômetro HACH DR 3900	terça a sexta-feira
Cor Verdadeira	uH	Espectrofotômetro HACH DR 3900	terça e sexta-feira
Coliformes totais	NMP/100 mL	COLILERT®	A cada 7 dias
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 mL	COLILERT® + Luz UV	A cada 7 dias

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Todas análises eram realizadas após a retirada de 935 mL de água filtrada, dessa forma a água avaliada era a que ficava em contato com a camada filtrante de areia durante o período de intermitência de 24 horas.

Temperatura, oxigênio dissolvido e pH com a sonda HACH foram medidos diretamente nas saídas dos filtros. Durante o período de monitoramento, a sonda HACH, utilizada para monitorar o pH, estragou e foi substituída pelo pHmetro KASVI, ocasionando diferença nos valores obtidos.

3.6.2 Parâmetro Operacional

A vazão inicial dos filtros era aferida volumetricamente, com auxílio de um becker graduado e um cronômetro, para averiguar se o valor não era inferior a 36,48 mL/min, tornando necessária a realização de limpeza dos filtros.

4 RESULTADOS

Para responder os objetivos traçados nesta pesquisa foi inicialmente instalado um sistema piloto de filtração lenta intermitente no LAPOÁ, com intuito de avaliar a qualidade da água produzida a partir dos parâmetros descritos na metodologia.

Por fim, foi analisada a relação entre a duração da carreira de filtração com a capacidade de retenção de sólidos pela esponja, pois no FLI sem esponja foram realizadas quatro carreiras de filtração enquanto que o FLI com esponja somente uma.

4.1 QUALIDADE DA ÁGUA DE ESTUDO E FILTRADA

Nesta seção será abordada a qualidade da água filtrada, sendo comparada com os parâmetros da Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021, do Ministério da Saúde, que dispõe sobre a qualidade de água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (BRASIL,2021). Os demais parâmetros que não estão estabelecidos nesta Portaria serão monitorados com intuito de avaliar o desempenho dos filtros. A Tabela 2, apresenta os resultados obtidos durante o período de monitoramento da água de estudo e das águas filtradas. Na continuação desta seção será realizada a análise específica para cada parâmetro monitorado.

Conforme mencionado no item 2.4, Manz (2007) recomenda que o valor máximo de turbidez para água bruta, na filtração lenta, seja de 20 NTU. Pela Tabela 2, pode-se observar que os valores da turbidez da água de estudo ficaram dentro do valor sugerido pelo autor.

Tabela 2 - Resultados do monitoramento dos filtros

Parâmetro	Água de Estudo	FLI sem esponja	FLI com esponja
Temperatura (°C) n = 108	21,46 ^a ± 2,56 ^b (14,70 – 26,70) ^c	21,81 ± 2,82 (14,10 – 28,50)	21,37 ± 2,80 (13,60 – 27,30)
Condutividade Elétrica (µS/cm) n = 113	90,00 ± 6,01 (76,10 – 101,80)	91,71 ± 5,06 (79,50 – 100,80)	90,86 ± 5,48 (76,90 – 101,30)
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L) n = 113	45,01 ± 3,02 (38,10 – 51,30)	45,87 ± 2,53 (39,80 – 50,40)	45,45 ± 2,74 (38,50 – 50,70)
OD (mg/L) n = 113	8,74 ± 0,44 (7,93 – 9,98)	1,63 ± 1,74 (0,21 – 7,56)	1,14 ± 1,15 (0,19 – 5,85)
pH n = 101	7,92 ± 0,76 (6,30 – 8,81)	7,56 ± 0,58 (6,30 – 8,77)	7,46 ± 0,51 (6,30 – 8,02)
Turbidez (NTU) n = 113	6,22 ± 1,21 (4,14 – 8,88)	3,06 ± 3,14 (0,37 – 21,90)	2,88 ± 2,58 (0,34 – 14,90)
Cor Aparente (uH) n = 87	77,29 ± 15,33 (48 – 119)	34,61 ± 29,41 (8 – 188)	30,62 ± 21,73 (7 – 101)
Cor Verdadeira (uH) n = 46	28,28 ± 4,38 (21 – 39)	20,93 ± 12,46 (6 – 63)	20,59 ± 14,70 (6 – 67)
Coliformes Totais (NMP/100 mL) n = 15	18337,27 ± 12952,22 (1450 – 47210)	758,77 ± 769,03 (38,80 – 1986,3)	968,99 ± 1576,61 (23,10 – 6131)
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL) n = 15	128,29* ± 86,42* (51 – 310)	6,94* ± 7,18* (1 – 20)	6,01* ± 5,31* (1 – 20)

n número de amostras; a média; b desvio padrão; c intervalo de dados

* Os valores das médias e dos desvios padrão estão subestimados, pois houve amostras que ultrapassaram o limite de detecção

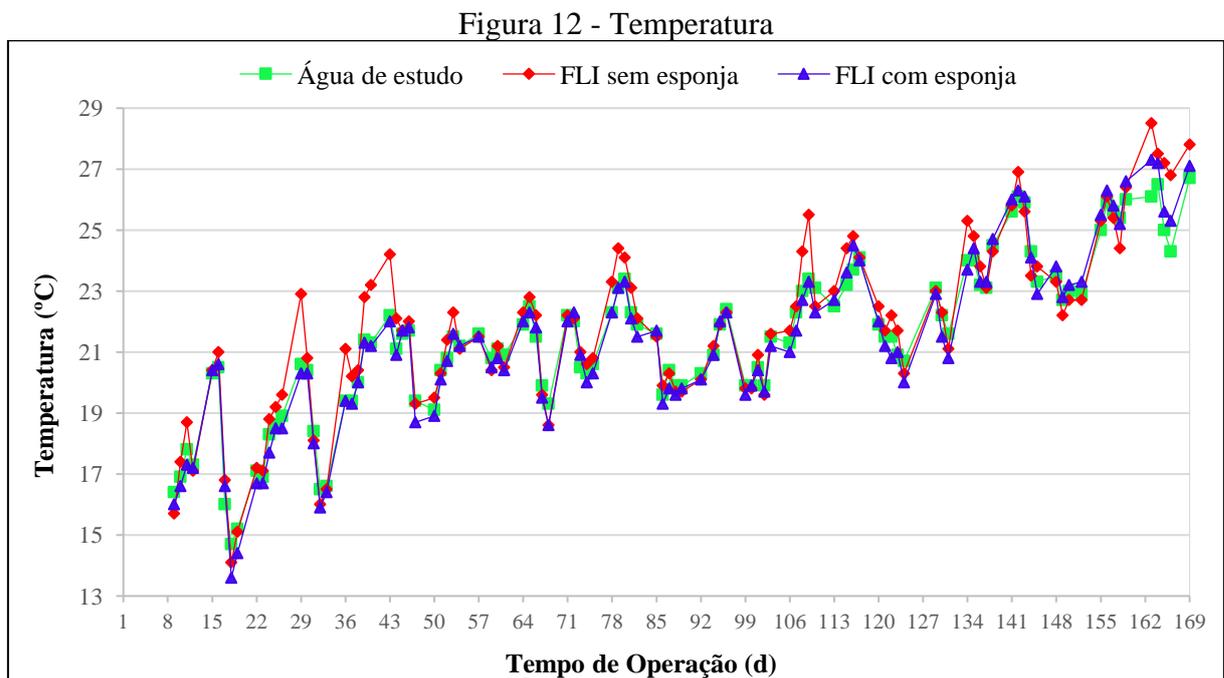
4.1.1 Temperatura

A temperatura é um parâmetro importante no desenvolvimento da atividade biológica dos microrganismos presentes nos filtros. A estabilidade microbiana e as taxas de amadurecimento são afetadas pela temperatura (ELLIOTT *et al.*, 2008). Cumbi (2013) cita que a temperatura está associada também à velocidade das reações químicas, solubilidade das substâncias, concentração de oxigênio dissolvido, metabolismo dos organismos presentes no ambiente aquático, formação de subprodutos e recrudescimento biológico.

A temperatura média apresentada pelo FLI sem e com esponja foi de 21,81 °C e 21,37 °C respectivamente, bem próximas à média da água de estudo 21,46 °C. De acordo com Lima (2019), essa pouca diferença de temperatura entre a água de estudo com as águas tratadas, ocorre devido às leis da termodinâmica, pois a água de estudo ao ficar armazenada nos filtros tende a manter a sua temperatura, devido a sua massa e ao próprio material do corpo do filtro,

ocasionando assim em um equilíbrio entre a temperatura da água armazenada e a do ambiente do LAPOÁ.

Em seu trabalho, Pizzolatti (2010) relata que a temperatura da água bruta e das águas filtradas variam ao longo do tempo de operação, resultante das alterações das estações do ano e das condições climáticas no momento da coleta. Essas alterações são evidenciadas na Figura 12, onde pode ser observado que a temperatura apresentou tendência de aumento devido as estações do ano, pois as análises iniciaram no outono finalizando no verão.



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Conforme Sant` Anna Junior (2010 apud LIMA, 2019), temperaturas entre 10 e 40°C são as mais propícias para ocorrer atividade biológica, em temperaturas menores que 5°C há redução na taxa de crescimento bacteriano e superiores a 40°C torna-se prejudicial para grande parte dos microrganismos existentes na água. A Figura 12 demonstra que a temperatura de operação dos filtros ficou dentro do intervalo adequado.

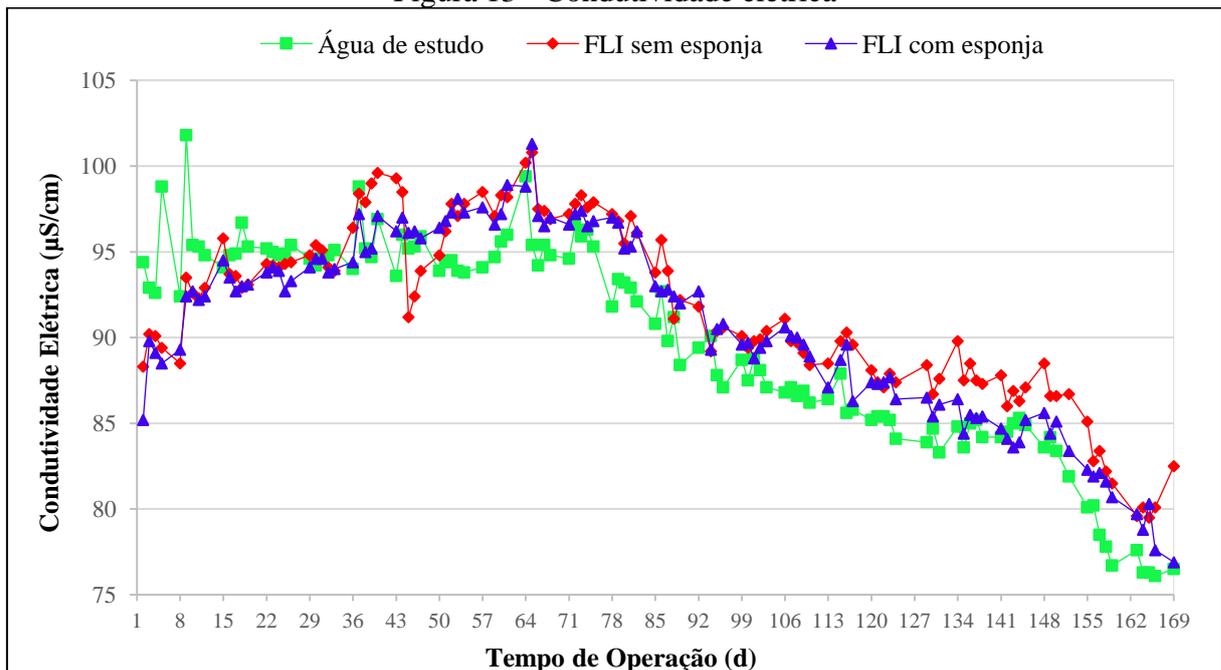
4.1.2 Condutividade Elétrica

Segundo Lima (2019), a condutividade elétrica é responsável por indicar a capacidade que a água possui de conduzir corrente elétrica em razão da presença de substâncias dissolvidas, principalmente íons de ferro e manganês.

A Portaria nº 888 do MS (BRASIL, 2021), não estabelece padrão de potabilidade para esse parâmetro. De acordo com Jaques (2005 apud SORGATO, 2019), níveis superiores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ indicam que o ambiente esteja impactado, e se os valores forem muito altos podem sinalizar características corrosivas da água. Em seu trabalho, Pinto (2006) comparou as legislações relativas à qualidade da água para consumo humano na América do Sul, de todos os países observados apenas seis estabelecem valores para CE, sendo encontrado na Colômbia o valor mais restritivo, de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Os FLI sem e com esponja apresentaram médias de 91,71 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 90,86 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, valores ligeiramente acima da água de estudo com CE de 90,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 13). Maciel (2018) e Lima (2019), também não observaram alterações significativas entre a condutividade elétrica da água de estudo e filtrada, sugerindo que os mecanismos dos filtros lentos não conseguiram exercer forte influência neste parâmetro.

Figura 13 - Condutividade elétrica



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

4.1.3 Sólidos Totais Dissolvidos

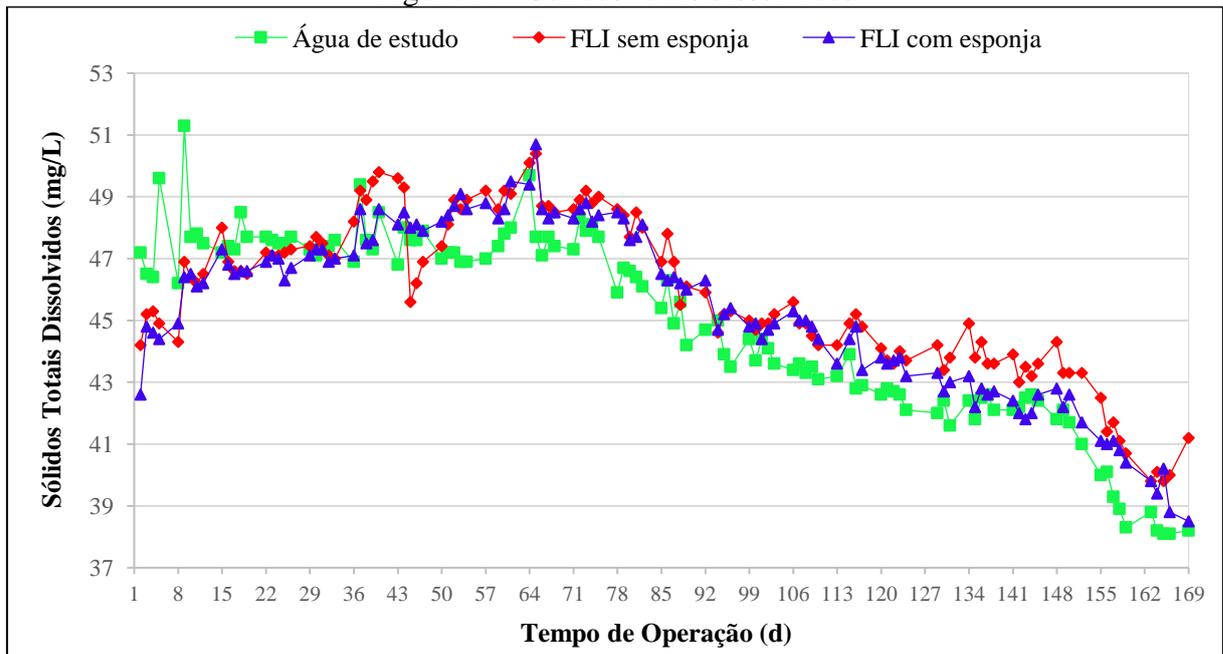
Libânio (2010), afirma que a concentração de sólidos totais dissolvidos está relacionada com a condutividade elétrica. De acordo com Jaques (2005 apud SORGATO,

2019), ao adicionar mais sólidos dissolvidos na água, conseqüentemente os valores de CE também aumentarão.

O valor máximo recomendado de acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), para os sólidos totais dissolvidos, é de 500 mg/L. Concentrações em excesso, de sólidos totais dissolvidos, tornam a água desagradável ao paladar, danificam tubulações e o seu consumo pode acumular sais na corrente sanguínea, provocando a formação de cálculos renais (SANTOS; MOHR, 2013).

Os resultados obtidos para sólidos totais dissolvidos, foram na média de 45,01 mg/L para a água de estudo e para o FLI sem e com esponja, 45,87 mg/L e 45,45 mg/L respectivamente. Conforme apresentado na Figura 14, durante o tempo de operação dos filtros os valores para água de estudo e filtrada sempre estiveram dentro do padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria nº 888 do MS (BRASIL, 2021).

Figura 14 - Sólidos totais dissolvidos



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

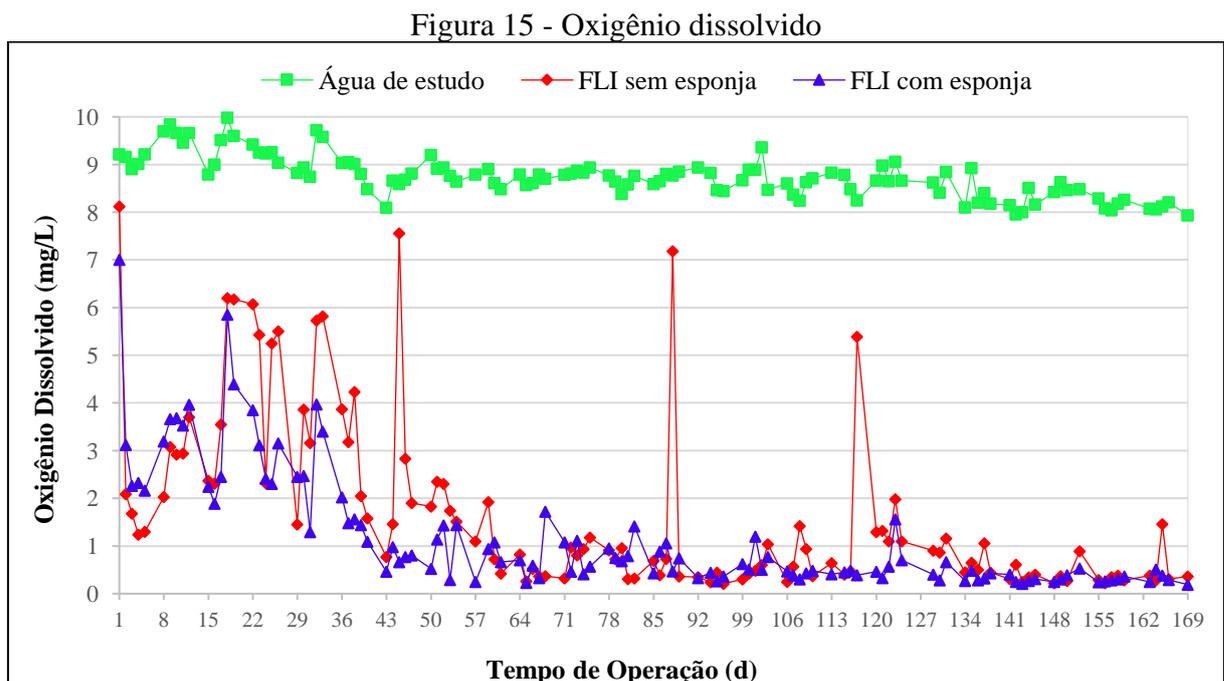
4.1.4 Oxigênio Dissolvido

A demanda no consumo de oxigênio dissolvido é um indicador importante de atividade microbiológica, pois, uma redução na quantidade de OD dá evidências do desenvolvimento e maturação do leito filtrante. Os microrganismos presentes nessa atividade, atuam na remoção dos sólidos e principalmente de bactérias, vírus e cistos de *Giardia* provenientes da água bruta

(DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999). Segundo Manz (2007), é fundamental que o OD esteja presente na água bruta, de forma significativa, para que os microrganismos possam consumi-lo no seu metabolismo.

A água de estudo apresentou valor médio de OD de 8,74 mg/L, enquanto que o FLI com esponja resultou em 1,14 mg/L e o FLI sem esponja obteve 1,63 mg/L (Figura 15). Os resultados das análises dos FLI apontaram redução nos níveis de OD em relação a água de estudo, sendo que a maior redução média ocorreu no filtro lento intermitente com esponja.

Na Figura 15, nota-se tendência à redução na concentração de OD dos filtros para os primeiros 60 dias de experimento. Após isto, houve estabilização nos valores de OD, indicando que os filtros aclimataram e que a comunidade biológica no meio filtrante se desenvolveu. Os três picos que ocorreram com tempo de operação de: 45, 88 e 117 dias, representam quando foi realizado a limpeza do FLI sem esponja.



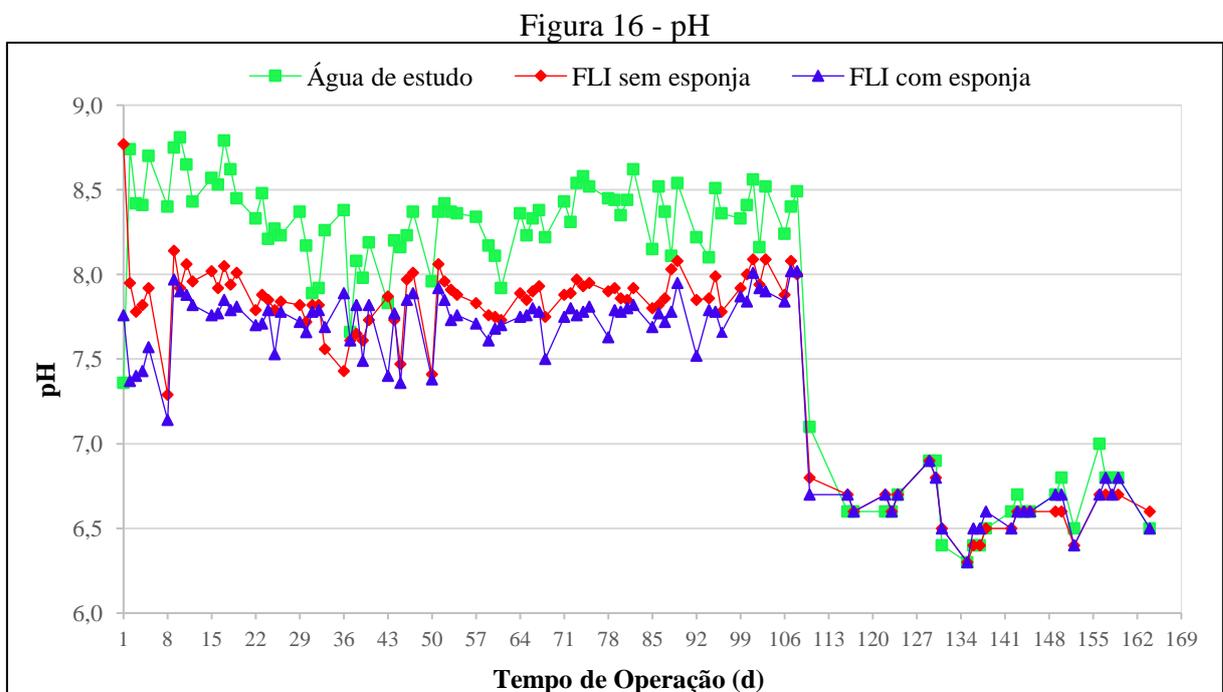
Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

4.1.5 pH

Segundo Sorgato (2019) o desenvolvimento dos microrganismos existentes na camada biológica é influenciado pelo pH. Oliveira *et al.* (2008 apud CUMBI, 2013) relata que o pH ótimo para a atividade microbiológica ocorre entre 6,5 e 9,5, valores de pH inferior a 4,0 ou superior a 9,5 dificultam na reprodução das bactérias.

A Portaria nº 888 do MS (BRASIL, 2021), não estabelece diretamente o padrão de potabilidade para esse parâmetro, mas atribui valores de pH entre 6,0 e 9,0, que devem ser analisados em conjunto com outros parâmetros, para garantir o processo de desinfecção. Neste estudo não foi realizada a desinfecção.

A Figura 16 apresenta a comparação entre o pH da água de estudo e das águas filtradas. O valor médio encontrado para o pH da água de estudo, foi de 7,92, à medida que para os FLI sem e com esponja foram de, respectivamente, 7,56 e 7,46. Logo, não se observou diferenças significativas nas médias de pH de cada filtro. Murtha (1998) relacionou o tempo de operação com as variações de pH da água tratada, observando elevação nos valores à medida que a camada biológica fosse desenvolvendo, com tendência à estabilização.



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Durante o período de monitoramento, a sonda HACH, utilizada para monitorar o pH, estragou e foi substituída pelo pHmetro KASVI, ocasionando nas diferenças dos valores obtidos a partir do dia 110 do tempo de operação. No entanto, o pH da água produzida pelos filtros manteve-se dentro da faixa recomendada pela Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021).

4.1.6 Turbidez

A turbidez indica a concentração de partículas suspensas e coloidais presentes na massa líquida. Sua origem é causada por fragmentos de argila, silte, plâncton, microrganismos, e matéria orgânica e inorgânica particulada.

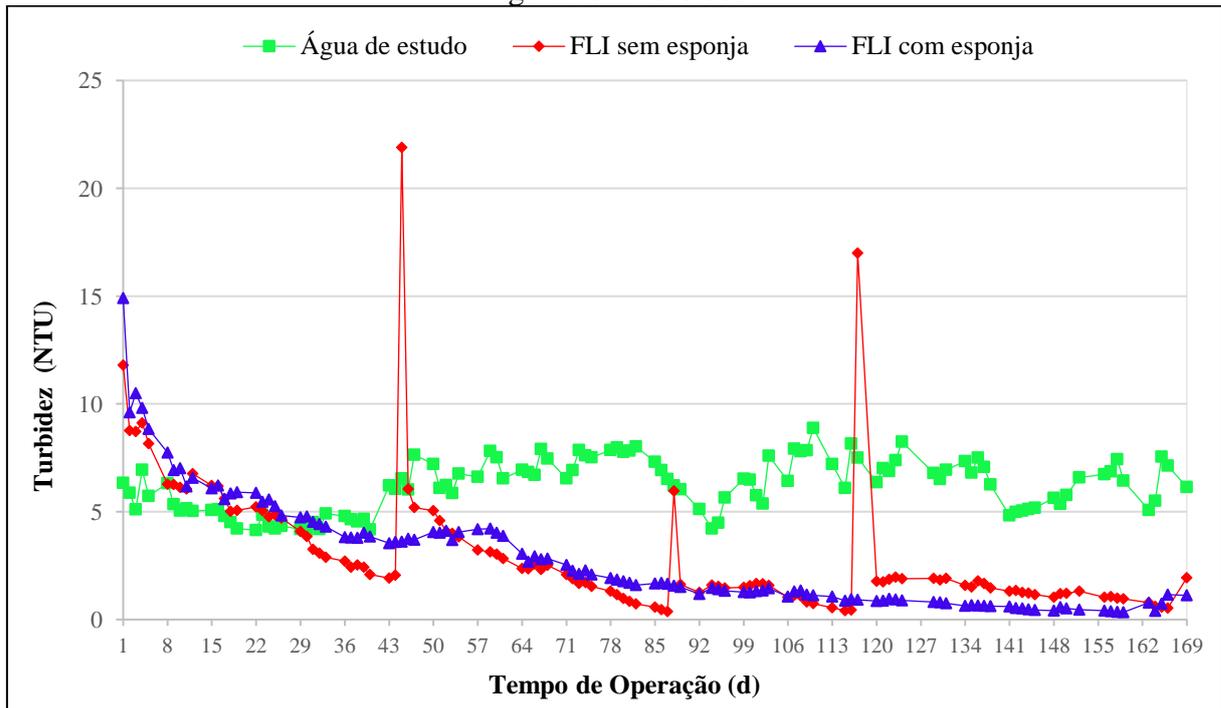
Os valores da turbidez da água de estudo e dos FLIs, durante o período de operação, são apresentados na Figura 17. Durante os primeiros 29 dias de operação, os valores de turbidez do FLI sem esponja foram superiores ao da água bruta, enquanto que para o FLI com esponja demoraram 33 dias. Esse tempo para remoção da turbidez, ocorreu provavelmente pelo amadurecimento da camada biológica dos filtros, que durou em torno de 60 dias, conforme a seção 4.1.4, que descreve sobre o OD.

Os três picos de valores de turbidez demonstrados na Figura 17, ocorreram ao realizar a limpeza do FLI sem esponja (dia 45, 88 e 117). Em um primeiro momento, essa limpeza ocasionou um aumento momentâneo nos valores, que logo em seguida já foram restabelecidos, indicando que o filtro estava maduro o suficiente para manter a qualidade da água entre as limpezas periódicas.

A Portaria nº 888/2021, do Ministério da Saúde, estabelece, em seu anexo 2, que o valor máximo permitido de turbidez para filtração lenta deve ser de 1,0 NTU em 95% das amostras (BRASIL, 2021). Os valores médios encontrados para o FLI sem e com esponja, foram de 3,06 NTU e 2,88 NTU, respectivamente, enquanto que para água de estudo foi de 6,22 NTU.

Durante o período de monitoramento, 15,04% das amostras do FLI sem esponja e 28,32% das amostras do FLI com esponja apresentaram turbidez menor ou igual a 1,0 NTU, conforme preconiza a Portaria nº 888 do MS (BRASIL, 2021).

Figura 17 - Turbidez



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

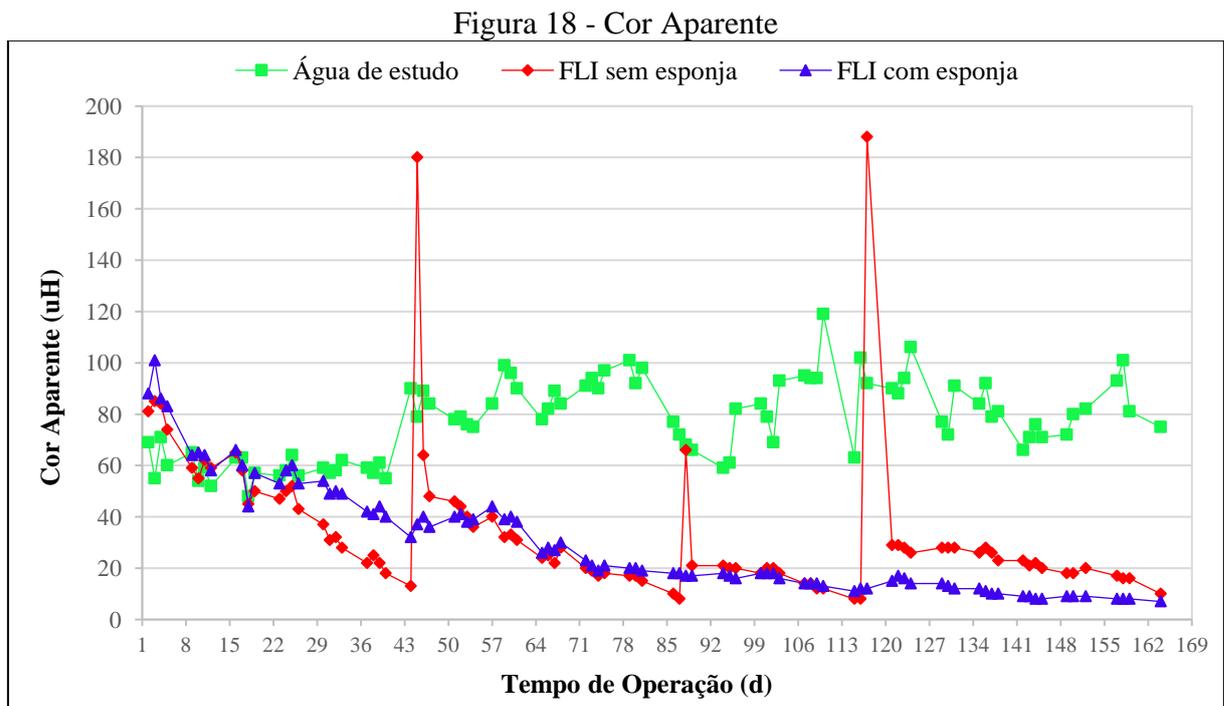
Em sua pesquisa Young-Rojanschi e Madramootoo (2014), conseguiram uma eficiência de remoção da turbidez de 87%, para o filtro lento intermitente. O FLI sem esponja obteve eficiência de remoção de 50,85%, enquanto que para o FLI com esponja foi de 53,64%, essas baixas taxas de remoção geral ocorreram devido ao tempo necessário para a maturidade do *schmutzdecke*.

Dessa forma, foi verificado a remoção da turbidez após os 60 dias, quando houve aclimação dos filtros, onde foi encontrado valores médios para água de estudo de 6,70 NTU e para o FLI sem esponja e com esponja, de 1,68 NTU e 1,26 NTU, respectivamente. Com isto, os valores de eficiência de remoção da turbidez foram de 74,99% no FLI sem esponja e 81,14% no FLI com esponja.

4.1.7 Cor Aparente

Libânio (2010) define que para efeito de caracterização das águas de abastecimento, a cor aparente distingue-se da cor verdadeira por também considerar as partículas suspensas presentes na água. A cor aparente resulta da adição de turbidez à cor verdadeira (ISOLANI, 2000).

Conforme a Figura 18, nota-se que, de fato, os filtros provocaram alterações na cor aparente da água de estudo, constatadas pelas diferenças significativas entre a água de estudo e filtradas. A água de estudo apresentou valor médio de cor aparente de 77,29 uH, enquanto que para os FLI sem e com esponja foram de, respectivamente, 34,61 uH e 30,62 uH.



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

A Portaria nº 888 do Ministério da Saúde, de 4 de maio de 2021, estabelece o valor máximo para a cor aparente de 15 uH como padrão de potabilidade (BRASIL, 2021). De acordo com WHO (2017), por questões de estética, valores inferiores a 15 uH são mais aceitáveis pelos consumidores, pois essa água potável praticamente não apresentará cores visíveis para grande parte das pessoas.

No período monitorado, o FLI sem esponja ficou com 12,64 % das amostras analisadas com cor igual ou inferior a 15 uH, já o FLI com esponja obteve 31,03 % dos valores atendendo a Portaria nº 888 do MS (BRASIL, 2021).

A eficiência média de remoção da cor aparente, foi de 55,22% para o FLI sem esponja enquanto que o FLI com esponja obteve 60,38%. O melhor resultado apresentado pelo FLI com esponja em comparação ao FLI sem esponja, se deve ao fato da retenção dos sólidos suspensos pela esponja e a não necessidade de realização de limpeza no FLI com esponja. Os valores encontrados foram superiores ao de Freitas (2017), que ao operar um filtro lento em escala domiciliar, alimentado de forma intermitente, obteve remoção média de 48,4%.

Na Figura 18 é possível verificar a presença de três picos de cor aparente no FLI sem esponja, os quais estão relacionados com as três limpezas realizadas nesse filtro (dia 45, 88 e 117).

Na análise dos filtros, após os 60 dias do tempo de operação, quando houve o amadurecimento da camada biológica, a água de estudo apresentou valor médio de cor aparente de 84,17 uH, o FLI sem esponja de 24,06 uH e o FLI com esponja de 15,56 uH, valor próximo ao recomendado pela Portaria nº 888 do MS (BRASIL, 2021). Nesse período, a eficiência de remoção da cor aparente foi de 71,42% para o FLI sem esponja e de 81,52% para o FLI com esponja.

4.1.8 Cor Verdadeira

De acordo com Isolani (2000), a cor verdadeira ou real é causada pela existência de material dissolvido e colóides na água. Para Libânio (2010), a cor verdadeira representa um importante indicador da concentração de matéria orgânica presente nas águas naturais. Não há menção a este parâmetro para água tratada na Portaria nº 888, de 2021, do Ministério da Saúde.

A Figura 19 demonstra os valores obtidos nas análises da cor verdadeira, a água de estudo apresentou resultado médio de 28,28 uH, enquanto que os FLI sem e com esponja foram de, respectivamente, 20,93 uH e 20,59 uH.

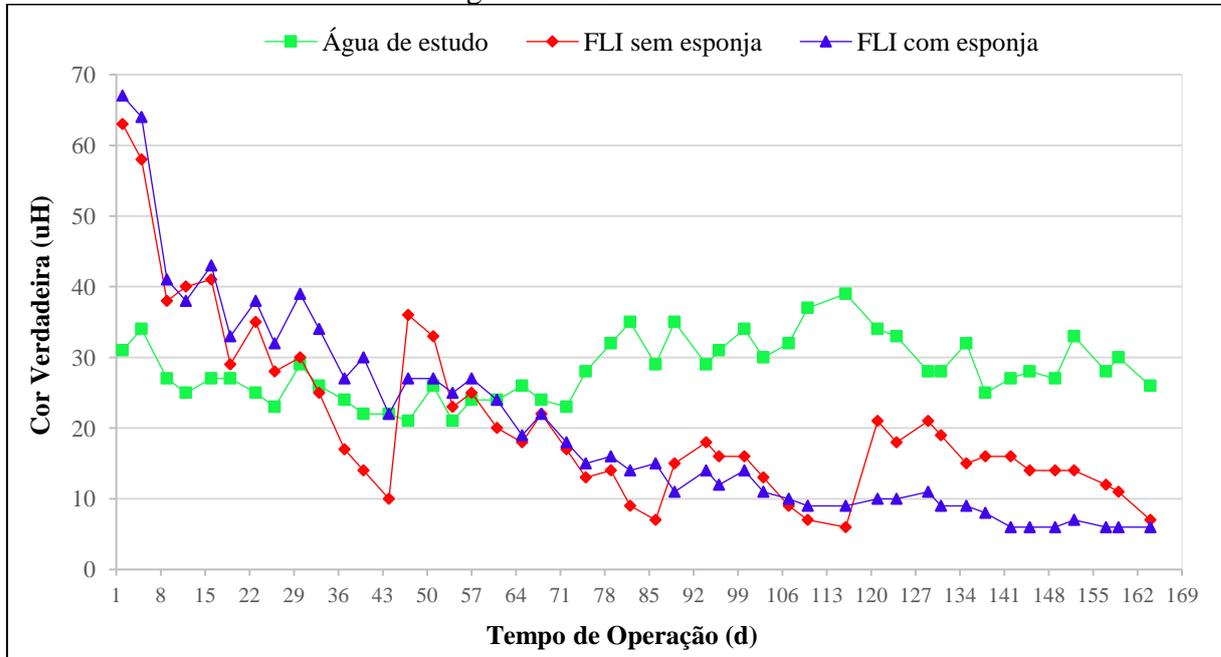
A remoção da cor verdadeira, teve uma eficiência média de 25,98% para o FLI sem esponja e para o FLI com esponja foi de 27,21%. O baixo desempenho dos filtros é constatado por Di Bernardo; Brandão e Heller (1999), em seus estudos evidenciaram que os filtros lentos não são uma boa alternativa para a remoção de cor verdadeira. Este parâmetro está relacionado com as substâncias dissolvidas ou coloidais, principalmente substâncias húmicas, que não são removidas somente por processos físicos de separação, dependendo de uma etapa de coagulação química.

Destaca-se, que depois de 60 dias do tempo de operação, quando os filtros já estavam com o *schmutzdecke* desenvolvido, apresentaram remoção de cor verdadeira de 51,79% para o FLI sem esponja e de 61,59% para o FLI com esponja.

Conforme Sorgato (2019), existe uma relação de proporcionalidade entre a condutividade elétrica e a presença de sólidos totais dissolvidos na água, os quais estão associados à cor verdadeira. Neste estudo foi possível observar tal relação entre os parâmetros,

uma vez que o FLI sem esponja produziu água com valor médio de cor verdadeira superior ao FLI com esponja, da mesma forma ocorreu com a condutividade elétrica.

Figura 19 - Cor Verdadeira



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

4.1.9 Coliformes totais

Os coliformes totais englobam as bactérias bacilares, aeróbicas e facultativas anaeróbicas, Gram-negativas, não formadoras de esporas, as quais fermentam a lactose com formação de gás num período de 48 horas a 35 °C ou 36 °C (DURAN, 2020). De acordo com Freitas (2017), as bactérias do grupo coliformes totais incluem as espécies que podem sobreviver tanto em esgoto como em águas naturais, podendo ser excretadas pelas fezes ou se multiplicar em ambientes aquáticos ou no solo. Desta forma, os coliformes totais não são apropriados para indicação de contaminação fecal, pois a sua presença não pode ser relacionada apenas às fezes.

A Portaria nº 888 do Ministério da Saúde, em seu anexo 1, não estabelece valor para esse parâmetro, quando o tratamento for do tipo solução alternativa individual, onde o abastecimento de água para consumo humano atende domicílios residenciais com uma única família, incluindo seus agregados familiares (BRASIL, 2021).

A Tabela 3 apresenta os resultados das análises realizadas durante o período de monitoramento. A média dos valores de remoção de coliformes totais foi de 95,86% para o FLI sem esponja e de 94,72% para o FLI com esponja.

Tabela 3 - Resultados das análises de Coliformes Totais (NMP/100mL)

Tempo de Operação (d)	Água de Estudo	FLI sem esponja	FLI com esponja
23	34480	1793	6131
30	36540	520	2603
37	20460	41	816
44	16580	50,4	727
51	20140	1782	1203,3
59	12360	1986,3	214,1
65	8840	920,8	166,4
72	5450	290,9	191,8
79	17329	204,6	224,7
87	15531	38,8	172,2
95	12033	920,8	613,1
101	24196	1986,3	1119,9
108	47210	727,0	191,8
115	1450	42,6	137,4
157	2460	77,1	23,1

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Conforme CAWST (2012), um *BioSand Filter* ideal remove acima de 99% dos patógenos. Os autores (BELLAMY *et al.*, 1985; MURTHA; HELLER, 2003) obtiveram, em suas pesquisas, valores superiores a 99% de remoção de coliformes totais, mas os filtros foram operados por um intervalo de tempo maior, quando o *schmutzdecke* teoricamente já se encontrava mais desenvolvido. Segundo Di Bernardo; Brandão e Heller (1999), em um leito filtrante com areia nova, a remoção de coliformes pode ser de 85% a 98 % comparada a 99% a 100% num leito biologicamente maduro.

4.1.10 *Escherichia coli*

A bactéria *Escherichia coli* é utilizada como indicador de contaminação fecal, devido a sua presença permanente na flora intestinal dos seres humanos e dos animais de sangue quente (ROMERO, 2009).

Quando a forma de abastecimento for do tipo solução alternativa individual, a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde, em seu anexo 1, exige ausência de *Escherichia coli*, em 100 mL de água para consumo humano (BRASIL, 2021). Com base nos resultados demonstrados na Tabela 4, é possível verificar que os FLI não apresentaram resultados em conformidade com o padrão de potabilidade brasileiro. É importante destacar que neste estudo não houve etapa de desinfecção, o que eliminaria esse contaminante.

Tabela 4 - Resultados das análises de *Escherichia coli* (NMP/100mL)

Tempo de Operação (d)	Água de Estudo	FLI sem esponja	FLI com esponja
23	<100	10	20,0
30	100	<10	10,0
37	<100	<10	10,0
44	<100	1,0	11,8
51	310	20	8,6
59	<100	16,9	6,3
65	<100	16,1	6,3
72	<100	3,1	2,0
79	84	2,0	2,0
87	93	1,0	2,0
95	160	13,1	3,1
101	51	2,0	1,0
108	<100	2,0	2,0
115	<100	1,0	4,1
157	100	2,0	1,0

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Alguns dos valores presentes na Tabela 4 para a água de estudo e para o FLI sem esponja, demonstram que houve amostras que apresentaram valores de concentração abaixo do limite de detecção. Portanto, a porcentagem de remoção obtida será superestimada, já que a quantidade de *Escherichia coli* para água de estudo e para o FLI sem esponja foi menor que a apresentada.

A eficiência de remoção média para *Escherichia coli* foi de 94,59% para o FLI sem esponja e de 95,31% para o FLI com esponja. Young-Rojanschi e Madramootoo (2014), encontraram em filtros lentos remoção de aproximadamente 99,98% para alimentação contínua e aproximadamente 98% para operação intermitente. A Tabela 4 aponta que com 157 dias de operação o FLI sem esponja atingiu 98% de remoção para *Escherichia coli*, enquanto que o FLI com esponja obteve 99%. Segundo Elliott *et al.* (2008), com o avanço das carreiras de filtração

há uma tendência de redução da *Escherichia coli* na água tratada, devido ao amadurecimento da camada biológica.

As boas taxas de remoção de coliformes totais e *Escherichia coli*, podem estar relacionadas ao consumo de oxigênio pela atividade microbiológica (SORGATO, 2019). O *schmutzdecke* consegue remover parasitas, bactérias e vírus oriundos da água bruta. Essa remoção acontece se a água bruta tiver oxigênio dissolvido em quantidade significativa para que os microrganismos utilizem no metabolismo (MANZ, 2007).

4.2 DURAÇÃO DAS CARREIRAS DE FILTRAÇÃO

As carreiras de filtração são determinadas pelo tempo entre duas limpezas. De acordo com Elliott *et al.* (2008), carreiras de filtração mais longas favorecem a remoção de patógenos, devido ao desenvolvimento do *schmutzdecke*. Sánchez; Latorre e Galvis (1999 apud SORGATO, 2019) evidenciam que quanto maior a carreira de filtração, maior será o equilíbrio entre as colônias de microrganismos presentes no filtro. Singer *et al.* (2017), retratam que após efetuar a limpeza há perda de eficiência na unidade.

Durante o período de monitoramento do sistema piloto, foram realizadas quatro carreiras de filtração para o FLI sem esponja e uma para o FLI com esponja, conforme a Tabela 5. Paterniani (1991) obteve aumento de 1,1 a 3,6 vezes na duração da carreira de filtração ao utilizar mantas não tecidas como pré-tratamento de filtros lentos convencionais.

Tabela 5 - Duração das carreiras de filtração

Carreira nº	Duração das carreiras de filtração (d)	
	FLI sem esponja	FLI com esponja
1	45	165
2	43	
3	29	
4	52	

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Segundo CAWST (2009), uma das limitações dos BSF é que se for abastecido com água bruta com elevados níveis de turbidez resulta em uma rápida colmatação, encerrando a carreira de filtração e tornando necessário à sua limpeza. Segundo Di Bernardo e Sabogal-Paz (2008), o emprego de mantas sintéticas favorece o processo de limpeza, pois evitam praticamente que ocorra a penetração de impurezas na camada de areia.

O FLI com esponja obteve maior duração na carreira de filtração devido a esponja de poliuretano estar instalada sobre a camada filtrante, a qual conseguiu reter parte dos sólidos suspensos provenientes da água de estudo, conforme apresentado na Tabela 6. A Figura 20 demonstra a retenção da turbidez nos cinco beakers após a lavagem consecutiva da esponja de poliuretano em 500 mL de água de estudo, assim como na Figura 21 é possível observar a esponja nova, sem utilização, antes e depois da lavagem, respectivamente.

Tabela 6 - Valores de turbidez retida na esponja de poliuretano

Turbidez retida na esponja de poliuretano (em 500 mL de água de estudo) (NTU)					
Becker	1	2	3	4	5
Turbidez (NTU)	1625	606	272	77,0	43,6

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Figura 20 - Beckers após a lavagem da esponja de poliuretano



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Figura 21 - Esponja de poliuretano nova, antes e depois da lavagem nos beakers



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

5 CONCLUSÃO

Ao final desta pesquisa chegaram-se as seguintes conclusões:

- A aclimação dos filtros ocorreu por volta dos 60 dias de operação;
- Houve amadurecimento da camada biológica, evidenciado pelo consumo de oxigênio entre a água de estudo e a água tratada pelos filtros;
- Os filtros foram capazes de remover os parâmetros de turbidez, cor aparente e *Escherichia coli*, porém não atenderam aos valores estabelecidos pela Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021);
- Conforme são retratados em estudos por diversos autores, a remoção da cor verdadeira nos filtros foi baixa;
- Na análise realizada após os 60 dias de operação, quando o *schmutzdecke* já se encontrava desenvolvido, os parâmetros: turbidez, cor aparente e cor verdadeira tiveram significativa melhora na sua eficiência de remoção;
- Os coliformes totais apresentaram bom desempenho de remoção, visto que com o desenvolvimento da camada biológica, os microrganismos presentes nessa atividade atuaram na remoção deste contaminante;
- A utilização da esponja no meio filtrante proporcionou remoção média superior ao do FLI sem esponja, para os parâmetros: turbidez, cor aparente, cor verdadeira e *Escherichia coli*;
- A esponja de poliuretano conseguiu reter a turbidez proveniente da água de estudo, possibilitando carreiras de filtração mais longas e menor frequência de limpezas.

Através das experiências obtidas nesse trabalho, recomenda-se para o auxílio e encaminhamento de futuras pesquisas:

- Avaliar o desempenho dos filtros por um maior período de tempo;
- Testar diferentes taxas de filtração;
- Usar esponjas de poliuretano com diferentes espessuras e densidades;
- Utilizar métodos complementares para desinfecção da água filtrada.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento.** Rio de Janeiro, 1992, 18p.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 23. ed. Washington DC: American Public Health Association. 2017. 1504 p.

BELLAMY, W. D. *et al.* **Removing Giardia Cysts with Slow Sand Filtration.** Journal of American Water Works Association, p. 52- 60, 1985.

BRASIL. **Decreto no 7.217, de 21 de junho de 2010. Regulamenta a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007.** Diário Oficial da União. Brasília-DF, 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021 - Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Diário Oficial da União. Brasília-DF, 2021.

CAWST – Centre of Affordable Water and Sanitation Technology. **Biosand Filter Manual - design, construction, installation and maintenance.** Calgary, Canada, 2009.

CAWST – Centre of Affordable Water and Sanitation Technology. **Biosand Filter Construction Manual.** Calgary, Canada, 2012.

CAWST – Centre of Affordable Water and Sanitation Technology. **Annual Report 2016.** Calgary, Canada, 2017.

CLARIFIL RHEISS SANEAMENTO AMBIENTAL LTDA. **Areia Filtrante.** Disponível em: <http://www.clarifil.com.br/materiais>. Acesso em: 10 maio 2021.

CUMBI, H. A. **Avaliação do desempenho de mantas sintéticas não tecidas no tratamento de água para consumo humano visando utilização em comunidades rurais - ensaio em escala piloto.** 105 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2013.

DI BERNARDO, L.; BRANDÃO, C. C. S.; HELLER, L. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas.** Rio de Janeiro: ABES, 1999. 114 p.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de tecnologia de tratamento de água.** São Carlos – SP, Ed. LDiBe, 2008.

DURAN, D. A. R. **Filtro Biosand como método de tratamento de água no ponto de uso para consumo a nível familiar em zonas rurais: Influência da turbidez.** 2020. 133 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2020.

ELLIOTT, M. A.; STAUBER, C. E.; KOKSAL, F.; DIGIANO, F. A.; SOBSEY, M. D. Reductions of *E. coli*, Echovirus type 12 and Bacteriophages in an intermittently operated household-scale slow sand filter. **Water Research**, vol. 42, 2008.

FERREIRA FILHO, S. S. **Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. 1º ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

FREITAS, B. L. S. **Filtros lentos em escala domiciliar como alternativa de tratamento de águas com risco microbiológico em comunidades isoladas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. doi:10.11606/D.18.2017.tde-18102017-165857.

FUNASA. **Caderno técnico: projeto e operação de filtros lentos retrolaváveis para o tratamento de água para abastecimento/ Fundação Nacional de Saúde**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019a.

FUNASA. **Programa Nacional de Saneamento Rural**. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2019b.

HUISMAN, L.; WOOD, W. E. **Slow sand filtration**. Geneva: World Health Organization, 1974.

ISOLANI, D. **Filtração de águas de abastecimento com esponjas de poliuretano**. 2000. 156 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3ª edição, Campinas-SP: Editora Átomo, 2010.

LIMA, A. J. **Análise comparativa da eficiência de filtros lentos com meios filtrantes convencional e não convencionais**. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.

LOO, Siew-Leng et al. Emergency water supply: A review of potential technologies and selection criteria. **Water Research**. v. 46, n. 10, p. 3125-3151, 2012.

MACIEL, P. M. F. **Filtração lenta domiciliar como alternativa de tratamento de água em comunidades isoladas: eficiências com e sem controle de nível da água e aceleração do amadurecimento**. 2018. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. doi:10.11606/T.18.2019.tde-18032019-163138.

MANZ, D. H. **New Horizons for Slow Sand Filtration**. In: The Eleventh Canadian National Conference and Second Policy Forum on Drinking Water and the Biennial Conference of the Federal – Provincial – Territorial Committee on Drinking Water, Abril 3-6, Calgary, Canada. p. 682-692, 2004.

MANZ, D. H. **BioSand Water Filter Technology Household Concrete Design**. April 30, 2007.

MURTHA, N. A. **Avaliação da influência de variáveis hidráulicas, parâmetros de projeto e das características da água bruta na eficiência de filtros lentos de areia**. 1998. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1998.

MURTHA, N. A.; HELLER, L. **Avaliação da eficiência da filtração lenta em areia segundo a profundidade do leito filtrante**. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. p. 1280–1289, 1999.

MURTHA, N. A.; HELLER, L. **Avaliação da influência de parâmetros de projeto e das características da água bruta no comportamento de filtros lentos de areia**. Engenharia sanitária e ambiental, p. 257-267, 2003.

NASCIMENTO, A. P.; PELEGRINI, R. T.; BRITO, N. N. Filtração lenta para o tratamento de águas para pequenas comunidades rurais. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 4, n. 2, 2012. DOI: 10.5216/reec.v4i2.19705. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/19705>. Acesso em: 04 maio 2021.

ONU. **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6**. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6>. Acesso em: 08 maio 2021.

PATERNIANI, J. E. S. **Utilização de mantas sintéticas não tecidas na filtração lenta em areia de águas de abastecimento**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 245p. 1991.

PINTO, V. G. **Análise comparativa de legislações relativa à qualidade da água para consumo humano na América do Sul**. 2006. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2006.

PIZZOLATTI, B. S. **Estudo de limpeza de filtro lento por raspagem e retrolavagem**. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.

PIZZOLATTI, B. S. **Influência da técnica de limpeza de filtros lentos e diâmetro dos grãos sobre a qualidade da água produzida, com destaque para remoção de carbamatos e oocistos de *Cryptosporidium* (simulados por microesferas)**. 2014. 225p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.

ROMERO, J. A. **Calidad del Agua**. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia. 2009.

SANTOS, R. S.; MOHR, T. Saúde e qualidade da água: Análises microbiológicas e físico-químicas em águas subterrâneas. **Revista Contexto & Saúde**. Editora Unijuí. v. 13, n. 24/25, p. 46-53, 2013.

SINGER, S; SKINNER, B; CANTWELL, R. E. Impact of surface maintenance on BioSand filter performance and flow. **Journal of Water and Health**. p. 262-272, 2017.

SOBSEY, M, D. et al. Point of use household drinking water filtration; A practical, effective solution for providing sustained access to safe drinking water in the developing world. **Environmental Science & Technology**. v.42, n. 12. 2008.

SORGATO, A. C. **Desempenho de filtro lento intermitente utilizando diferentes meios filtrantes e granulometrias**. 2019. 121 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2019.

UNICEF. **Progresso na água potável para uso doméstico, saneamento e higiene, 2000-2017**. 2019. Disponível em: <https://data.unicef.org/resources/progress-drinking-water-sanitation-hygiene-2019/>. Acesso em: 04 maio 2021.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **The History of Drinking Water Treatment**. Office of Water, Washington, 2000.

WHO; UNICEF. **Key Facts from JMP 2015 Report**: Geneva: World Health Organization (WHO) and the United Nations Children’s Fund (UNICEF) 2015.

WHO. **Guidelines for drinking-water quality fourth edition incorporating the first addendum**. Geneva: World Health Organization (WHO); 2017.’

YOUNG-ROJANSCHI, C.; MADRAMOOTOO, C. Intermittent versus continuous operation of biosand filters. **Water Research**, v. 49, p. 1-10, Fev. 1 2014.