

Fernando Worma

DESENVOLVIMENTO DE UM FILTRO LENTO BIFLUXO COM
RETROLAVAGEM

Dissertação de mestrado submetida ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Ambiental da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Luiz
Sens

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Segalla
Pizzolatti

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Worma, Fernando

DESENVOLVIMENTO DE UM FILTRO LENTO BIFLUXO COM
RETROLAVAGEM / Fernando Worma ; orientador, Maurício
Luiz Sens, coorientador, Bruno Segalla Pizzolatti,
2018.

110 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis,
2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Engenharia
Ambiental. 3. Filtro Lento Bifluxo. 4. Tratamento
de Água. 5. Retrolavagem. I. Luiz Sens, Maurício.
II. Segalla Pizzolatti, Bruno. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental. IV. Título.

Fernando Worma

DESENVOLVIMENTO DE UM FILTRO LENTO BIFLUXO COM
RETROLAVAGEM

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

Florianópolis, 4 de abril de 2018.

Prof.^a Maria Eliza Nagel Hassemer, Dr.^a
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental

Banca Examinadora:

Prof.^o Maurício Luiz Sens, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^o Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^o Paulo Belli Filho, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Renata Iza Mondardo, Dr.^a
Universidade do Sul de Santa Catarina

Romeu Francisco Gadotti, Dr.
Fundação Nacional de Saúde

Este trabalho é dedicado aos meus colegas do Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOA), a minha filha, minha mulher, aos meus queridos pais e meu irmão.

AGRADECIMENTOS

No LAPOÁ tive a oportunidade de poder contar com a ajuda de muitas pessoas, cada uma com suas habilidades, puderam colaborar de alguma forma para a realização dessa pesquisa.

Primeiramente, agradeço à minha família, pela dedicação que sempre tiveram comigo. Aos meus tios e primos pela união da nossa família. Aos meus avós por sempre terem sido um exemplo de honestidade, justiça, força e humildade na vida. Em especial, meu avô Pilatti, que nos deixou no ano passado, devido a uma doença, nos deixando ricos ensinamentos. Ao meu pai Vitório, pelo exemplo de pessoa séria e honesta, me cobrando sempre boas atitudes, à minha mãe Leci por ser uma pessoa guerreira e batalhadora, e ao meu irmão Junior por ter sempre andado comigo achando soluções para nossos problemas da vida. À minha filha, que acaba de nascer e a minha mulher que caminha comigo na luta pelas coisas que acreditamos.

Aos professores Maurício L. Sens e Bruno Segalla Pizzolatti agradeço a orientação na composição e execução desse projeto de pesquisa. Também a todos os professores do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC.

Ao meu colega de engenharia, eng.º Alexandre que atua nas fiscalizações de execução de obras do setor do saneamento e que me incentivou na busca do título de mestre.

Ao meu colega Hymnô pelo apoio durante o período do mestrado. Aos demais colegas do LAPOÁ e ao colega Gustavo pelo apoio na mão de obra e monitoramento do sistema piloto montado.

Ainda, à ajuda dos colegas de engenharia da divisão de engenharia em saúde pública da FUNASA, fundação que atua em importantíssimas ações do saneamento básico do país.

RESUMO

Esta dissertação objetivou o desenvolvimento de um Filtro Lento Bifluxo (FLB) com sistema de limpeza por retrolavagem. O FLB é uma alternativa para a potabilização de água para consumo humano. Essa tecnologia permite aumentar a capacidade de filtração, mantendo a qualidade da água e viabilizando a operação de limpeza dos sistemas de drenagem do filtro. A filtração lenta com retrolavagem já foi motivo de muitos estudos, principalmente do Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOÁ) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Os objetivos específicos dessa pesquisa foram: desenvolver um Filtro Lento Bifluxo com retrolavagem, viabilizar a operação de limpeza dos sistemas de drenagem deste filtro, que podem ser colmatados pela fina granulometria dos grãos de areia do leito filtrante; avaliar a quantidade e a qualidade de água filtrada produzida no sistema piloto de filtração lenta com duplo sentido de escoamento; e avaliar o sistema de limpeza do FLB por retrolavagem e o processo de descarga de fundo com entrada de água na interface entre o meio filtrante e a camada suporte. Para isso, foi construído e operado um Filtro Lento Bifluxo piloto com retrolavagem, a uma taxa de filtração média de $11 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. O filtro foi alimentado com água de um lago com alta densidade de cianobactérias, para acelerar a pesquisa. Elaborou-se também, um sistema que permitia a limpeza dos bocais drenantes que podem ser colmatados com a fina granulometria do meio filtrante. A limpeza por meio da retrolavagem desses filtros se demonstrou positiva, eliminando os trabalhos manuais dessa operação. O estudo mostrou a possibilidade de se aplicar essa técnica em novos projetos de filtração lenta, dobrando a produção de água por área de aplicação e desenvolvendo uma nova forma de limpeza dos bocais drenantes de água filtrada, posicionados no meio do leito filtrante.

Palavras-Chave: Filtro Lento. Bifluxo. Retrolavagem.

ABSTRACT

This work aimed to develop a Biflow Slow Sand Filter (BSF) with a backwash cleaning system. The BSF is an alternative for drinking water treatment. This technology enhances the filtration capacity, maintaining water quality and allows the cleaning of the filter drainage systems. Slow Sand Filtration with backwashing has already been subject of many studies, especially at the Water Purification Laboratory (Laboratório de Potabilização das Águas – LAPOÁ) of the Sanitary and Environmental Engineering Department of the Federal University of Santa Catarina (UFSC). The specific objectives of this research were: to develop a Biflow Slow Sand Filter pilot experiment with backwash cleaning system; to enable the cleaning of the filter drainage systems, which can be filled with sand of fine grain size from the filter bed; to evaluate the quantity and quality of filtered water produced by BSF filtration system; to evaluate the SBF backwash cleaning system and the bottom-discharge process with water coming from the interface between the filter medium and the support layer. For this, a BSF pilot system with backwash cleaning was designed, constructed and operated with an average filtration rate of $11 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. To speed up the research, the filter was fed with water withdrawn from a lake with high density of cyanobacteria. The cleaning system was also developed in order to allow the cleaning of the nozzles that can be filled with fine grain size particles from the filter medium. The cleaning of these filters through backwashing was positive, eliminating the manual work operation. The study showed the possibility of applying this technique in new slow filtration projects, doubling the water production per area and developing a new way of cleaning the draining nozzles, positioned in the middle of the filter bed.

Keywords: Slow Sand Filter, Biflow Filter, Backwash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Filtro de fluxo descendente.....	32
Figura 2 – Filtro de fluxo ascendente.....	35
Figura 3 – Esquema do filtro rápido bifluxo.....	37
Figura 4 – Filtro Bifluxo com Retrolavagem.....	43
Figura 5 – Esquema do sistema utilizado para ensaio de expansão.....	48
Figura 6 – Detalhe do suporte do bocal.....	54
Figura 7 – Foto do bocal utilizado.....	55
Figura 8 – Gráfico do resultado obtido pelo ensaio granulométrico.....	60
Figura 9 – Gráfico do resultado obtido pelo ensaio expansão do material filtrante.....	61
Figura 10 – Níveis de cargas hidráulicas dos fluxos descendente e ascendente e Eficiência do FLB – Fase 1.....	64
Figura 11 – Níveis de cargas hidráulicas dos fluxos descendente e ascendente e Eficiência do FLB – Fase 2.....	67
Figura 12 – Níveis de cargas hidráulicas dos fluxos descendente e ascendente e Eficiência do FLB – Fase 3.....	68
Figura 13 – Perdas de carga dos fluxos ascendente e descendente do FLB – Fase 1.....	71
Figura 14 – Perdas de carga dos fluxos ascendente e descendente do FLB – Fase 2.....	72
Figura 15 – Perdas de carga dos fluxos ascendente e descendente do FLB – Fase 3.....	73
Figura 16 – Vazões de entrada e saída do Filtro – Fase 1.....	75
Figura 17 – Vazões de entrada e saída do FLB – Fase 2.....	76
Figura 18 – Vazões de entrada e saída do FLB – Fase 3.....	77
Figura 19 – Carga hidráulica do fluxo descendente e Vazão de saída do FLB – Fase 1.....	79
Figura 20 – Carga hidráulica do fluxo descendente e Vazão de saída do FLB – Fase 2.....	80
Figura 21 – Carga hidráulica do fluxo descendente e Vazão de saída do FLB – Fase 3.....	81
Figura 22 – Turbidez da água de saída da limpeza da camada suporte.....	83
Figura 23 – Velocidade de aproximação e expansão do leito filtrante em função da carga hidráulica da câmara de carga.....	85
Figura 24 – Turbidez da água de saída da retrolavagem – Fase 1.....	87
Figura 25 – Turbidez da água de saída da retrolavagem – Fase 2.....	88
Figura 26 – Turbidez da água de saída da retrolavagem – Fase 3.....	89
Figura 27 – Foto do momento de retirada do bocal.....	90

Figura 28 – Monitoramento da cor aparente – Fase 1.....	92
Figura 29 – Monitoramento da cor aparente – Fase 2.....	93
Figura 30 – Monitoramento da cor aparente – Fase 3.....	94
Figura 31 – Monitoramento da Turbidez – Fase 1	97
Figura 32 – Monitoramento da Turbidez – Fase 2.....	98
Figura 33 – Monitoramento da Turbidez – Fase 3.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características usuais do meio filtrante	30
Tabela 2 – Características de filtros lentos convencionais	34
Tabela 3 – Características de filtros lentos ascendentes.....	36
Tabela 4 – Características gerais dos FLB	42
Tabela 5 – Resumo das limpezas utilizadas – Fase 1	63
Tabela 6 – Resumo das limpezas utilizadas – Fase 2	66
Tabela 7 – Resumo das limpezas utilizadas – Fase 3	69
Tabela 8 – Perdas de carga média, mínima e máxima, dos fluxos ascendente e descendente	70
Tabela 9 – Qualidade da água (médias, min e máx.).....	91
Tabela 10 – Qualidade da água Turbidez	96
Tabela 11 – Percentuais em função dos máximos permitidos.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FUNASA – Fundação Nacional de Saúde
LAPOA – Laboratório de Potabilização das Águas
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
FLA – Filtro Lento de Areia
FLB – Filtro Lento de Bifluxo
EUA – Estados Unidos da América
EPA – Agência de Proteção Ambiental
FIME – Filtração em múltiplas etapas
LALP – Laboratório de Água da Lagoa do Peri
DF – Descarga de Fundo
R – Retrolavagem
CASAN – Companhia Catarinense de Águas e Saneamento

LISTA DE SÍMBOLOS

V_a – Velocidade de Aproximação

φ – Diâmetro da tubulação

d – diâmetro

d₁₀ – Diâmetro efetivo

DN – Diâmetro nominal

c_u – Coeficiente de uniformidade

v_{mf} – velocidade mínima de fluidificação

h_f – perda de carga no meio filtrante fluidificado

Δh_{cs} – perda de carga na camada suporte

Δh_{mfa} – perda de carga no meio filtrante do fluxo ascendente

Δh_{mfd} – perda de carga no meio filtrante do fluxo descendente

Δh_t – perda de carga total

mm – milímetros

cm – centímetros

m – metros

T/m³ – Toneladas por metro cúbico

m³/m².d – metro cúbico por metro quadrado por dia

m³ – metro cúbico

m² – metro quadrado

uH – unidade de cor

uT – unidade de turbidez

log – escala logarítmica

NMP/100 mL – Número mais provável por cem mililitros

v_{mf} – velocidade mínima de fluidificação

h_f – perda de carga no meio filtrante fluidificado

A_F – área do filtro

Q_R – vazão necessária para acontecer a retrolavagem

V_R – Volume do reservatório

t – Tempo

mL – mililitros

L – Litros

PVC – Policloreto de vinila

min – Minuto

s – Segundo

FLC – Filtro Lento Convencional com limpeza por raspagem

FLR – Filtro Lento Retrolavável com limpeza por retrolavagem com água filtrada

FLRb – Filtro Lento Retrolavável com limpeza por retrolavagem com água bruta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVOS	24
1.1.1	Objetivo Geral	24
1.1.2	Objetivos Específicos	25
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	27
2.1	FILTROS LENTOS	27
2.1.1	Parâmetros operacionais	29
2.1.2	Parâmetros da qualidade da água.....	31
2.1.3	Filtros Lentos Descendentes	31
2.1.4	Filtros Lentos Ascendentes	34
2.1.5	Filtros Bifluxo.....	36
2.2	RETROLAVAGEM	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	ÁGUA DE ESTUDO	41
3.2	CONCEPÇÃO DO PILOTO DE FILTRAÇÃO LENTA BIFLUXO COM RETROLAVAGEM	42
3.2.1	Caracterização do Meio Filtrante.....	46
3.3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA PILOTO	47
3.3.1	Características da expansão do meio filtrante.....	47
3.3.2	Cálculo do volume da câmara de carga	47
3.3.3	Determinação da cota da câmara de carga.....	49
3.3.4	Controle da vazão de alimentação do sistema piloto	51
3.4	OPERAÇÃO DO FLB	52
3.4.1	Limpeza na camada suporte.....	52
3.4.2	Retrolavagem.....	53
3.4.3	Sistema de Limpeza do bocal de coleta de água filtrada	54
3.5	MONITORAMENTO DO SISTEMA PILOTO	55

3.5.1	Parâmetros operacionais	56
3.5.2	Parâmetros da qualidade da água.....	57
3.5.3	Análise estatística	58
4	RESULTADOS.....	59
4.1	ENSAIOS PARA CONFIRMAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DO MATERIAL FILTRANTE	59
4.1.1	Ensaio de Granulometria do Material Filtrante	59
4.1.2	Ensaio de Expansão e Perda de Carga do Material Filtrante	59
4.2	MONITORAMENTO DO FILTRO LENTO BIFLUXO	62
4.2.1	Parâmetros operacionais	70
4.2.2	Parâmetros de qualidade da água filtrada	91
5	CONCLUSÃO	101
	REFERÊNCIAS.....	103

1 INTRODUÇÃO

O Filtro Lento de Areia (FLA) é uma das formas mais antigas de tratamento de água potável e um importante processo de purificação de água em todo o mundo (CAMPOS et al., 2002). Utilizado no tratamento de água para abastecimento, é efetivo na remoção da turbidez e micro-organismos (patógenos). A sua performance depende dos parâmetros da qualidade da água bruta, temperatura e sazonalidade da água superficial (SCHIJVEN et al., 2013).

Filtros lentos são basicamente compostos por: sistema de drenagem, camada suporte, camada filtrante, tubulação de descarga do sobrenadante, válvulas e acessórios de saída (HUISMAN; WOOD, 1974).

Os FLAs têm recebido inovações tecnológicas nos últimos anos, devido ao aumento do rigor das regulamentações para o fornecimento de águas superficiais para o consumo humano pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) (WEBER-SHIRK; DICK, 1999).

Hoje, no Brasil, a filtração lenta é utilizada principalmente para a potabilização de água onde a instalação e operação de Estações de Tratamento de Água (ETA) convencionais com coagulação, floculação e decantação é algo inviável devido à ausência de mão de obra especializada ou recursos econômicos compatíveis (DE SOUZA, 2015).

Existem filtros lentos tanto de fluxo ascendente quanto descendente. A limpeza desses filtros lentos é realizada por meio de raspagem do meio filtrante. Para isso, é necessário drenar o filtro para que o nível de água fique abaixo da camada filtrante. Com o filtro parcialmente drenado é feita a raspagem dos primeiros centímetros de areia. A areia retirada é lavada e acondicionada para ser recolocada no filtro. No entanto, essa operação é onerosa e pode ocasionar uma manutenção incorreta.

Para pequenas comunidades são necessárias alternativas para facilitar a limpeza da camada filtrante. Por isso, pode ser viável a utilização de sistemas com retrolavagem para executar a limpeza periódica do filtro, sendo desnecessário retirar parte da areia para limpeza. Com isso, a unidade de recuperação de areia é dispensada, o que pode reduzir o tempo em que o sistema iniciará a produzir água de qualidade (PIZZOLATTI, 2014).

Desta forma, os filtros lentos tiveram seu sistema de limpeza aprimorado em estudos do LAPOA, substituindo-se a raspagem pela retrolavagem, comum em filtros rápidos. Filtros lentos têm áreas maiores

em relação aos filtros rápidos, além de meios filtrantes que podem chegar a mais de 1 m de profundidade. Isso tornaria a retrolavagem inviável em termos operacionais e econômicos, além da perturbação da ação biológica na filtração lenta, que também é um fator a ser considerado (DE SOUZA, 2015).

Com a ideia de realizar a filtração ascendente e descendente simultaneamente, surgiu também o filtro rápido bifluxo ou *biflow*. Porém, esses filtros foram abandonados, pois apresentavam problemas nos bocais de coleta de água filtrada. Os grãos de areia se acumulam nas entradas desses bocais, causando entupimento, diminuindo a taxa de filtração. Esses drenos se localizam no interior do filtro e são de difícil acesso, pois estão abaixo da camada de areia. Por isso, para ser feita a limpeza dos bocais colmatados com areia, é necessário a remoção de parte da camada filtrante.

No entanto, uma inovação nos bocais de coleta de água filtrada surgiu no mercado da fabricação de tubulações e fundo de filtro, o que pode tornar possível resgatar a técnica da filtração bifluxo. Esse bocal é composto por anéis que possibilitam sua abertura, podendo proceder sua limpeza com injeção de água. Porém, para realizar esse procedimento é necessário acesso a esses bocais.

Por isso, para facilitar esse procedimento pode-se aplicar a técnica de limpeza por retrolavagem. Para a limpeza do meio filtrante é realizada sua expansão mediante aumento da vazão do fluxo ascendente. Durante essa expansão é possível suspender o bocal e, por meio de sua abertura e injeção de ar ou água, retirar os grãos de areia fixados.

Nessa pesquisa foi estudada uma nova alternativa: o Filtro Lento Bifluxo com retrolavagem (FLB). É um sistema vantajoso, pois a taxa de filtração aplicada dobra, visto que recebe alimentação de água bruta nos dois fluxos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar uma nova tecnologia de filtro lento com escoamento de filtração em duplo sentido (ascendente e descendente) denominada de “Filtro Lento Bifluxo”.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Viabilizar a operação de limpeza dos sistemas de drenagem do filtro com duplo sentido de escoamento, sanando a colmatação gerada pela fina granulometria dos grãos de areia do leito filtrante;
- Avaliar a quantidade e a qualidade de água filtrada produzida no sistema piloto de filtração lenta bifluxo;
- Avaliar o sistema de retrolavagem do Filtro Lento Bifluxo e o processo de descarga de fundo com entrada de água na interface entre o meio filtrante e a camada suporte.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 FILTROS LENTOS

De acordo com Michelin (2010), o emprego dos filtros lentos de areia foi registrado primeiramente em 1804, na cidade de Paisley, na Escócia. Essa tecnologia é utilizada há séculos com resultados satisfatórios de eficiência.

Por ser uma técnica simples e a operação consistir basicamente em controle da vazão e limpeza do meio filtrante, os custos com manutenção e operação são reduzidos. Não há necessidade de equipamentos eletromecânicos para o funcionamento dos filtros e, muitas vezes, dependendo da topografia local, não se utiliza energia elétrica pois a alimentação pode ser realizada por gravidade (PIZZOLATTI, 2014).

A filtração lenta é uma tecnologia de tratamento de água que também pode ser empregada em sistemas descentralizados. Filtros lentos, por utilizarem uma taxa de filtração inferior a filtros rápidos, necessitam de uma área de filtração maior para abastecer o mesmo número de habitantes. No entanto, quando se pensa em comunidades rurais e/ou isoladas, a necessidade de maiores áreas não se torna um fator limitante para o emprego da técnica (PIZZOLATTI, 2014).

Filtros lentos não requerem a adoção de coagulantes, operam com taxas de filtração baixas e utilizam meio filtrante de granulometria fina. O uso de baixas taxas de filtração leva a um maior tempo de detenção da água sobre o meio filtrante e no seu interior, o que favorece uma intensa atividade biológica e garante a produção de água com qualidade apropriada para uma desinfecção efetiva (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999).

Esse processo de filtração é eficiente, simples, natural e não poluente de purificação da água e envolve mecanismos de transporte e aderência, somado à biodegradação que se sucede na camada microbiana formada na superfície do meio filtrante (*schmutzdecke*) e no biofilme. Essa camada compõe-se de matéria orgânica, partículas inertes e diversas espécies de microrganismos (algas, bactérias, protozoários etc.), que, por ações físicas, químicas e principalmente bioquímicas, utilizam a matéria orgânica presente na água bruta como substrato para o seu desenvolvimento, biodegradando assim a matéria orgânica (ROCHA et al., 2000).

A alta eficiência de tratamento de água alcançada ocorre devido, não somente a taxa de aplicação lenta e o tamanho efetivo fino da areia do leito filtrante, mas também ao processo biológico que ocorre na camada superior da cama de areia (CAMPOS et al., 2002).

Filtros lentos de areia são basicamente reservatórios preenchidos com areia de diâmetro efetivo característico (0,15 a 0,30 mm) e altura da camada filtrante variando de 0,50 a 1,50 m (WHO, 2011). No entanto, com o aparecimento dos filtros rápidos, os filtros lentos foram cada vez menos utilizados, principalmente em países das Américas (VALENCIA, 1981).

O surgimento de técnicas de coagulação química no tratamento de água, seguidas pelo desenvolvimento dos filtros rápidos levou ao declínio o uso da filtração lenta em areia. Enquanto a construção de estações, que utilizam a técnica de filtração lenta, foram abandonadas nos Estados Unidos, muitos outros países continuaram a usar e a construir filtros lentos. Apesar do recente avanço tecnológico na área de tratamento de água, a filtração lenta continua sendo estudada e implantada para melhorar a qualidade físico-química e microbiana de água potável (WELTE; MONTIEL, 1996).

No Brasil, diversas estações de tratamento, que até o início da década de setenta empregavam a filtração lenta, converteram as suas instalações à tecnologia convencional, pressionadas pela deterioração dos mananciais e pelo desconhecimento. No entanto, poderiam ser utilizadas como solução, unidades de pré-tratamento antes dos filtros lentos, desde que a água bruta não apresentasse adequadas características para serem tratadas diretamente pelo filtro lento, sem comprometimento das carreiras de filtração (MICHELAN, 2010).

Os FLA podem ter fluxo descendente ou ascendente. No fluxo descendente a camada microbiana se forma com mais facilidade do que no fluxo ascendente. Com relação à limpeza do meio filtrante, o filtro com fluxo ascendente apresenta melhor vantagem, porque a limpeza pode ser realizada por descarga de fundo e as carreiras são mais longas, decorrentes do próprio sentido do fluxo, favorável pela ação da gravidade, o que não acontece na limpeza de filtros com fluxo descendente (MICHELAN, 2010).

A filtração lenta é uma tecnologia de tratamento de água consolidada e pode ser utilizada tanto para tratamento de água em pequenas comunidades como em grandes centros. É o caso da estação de tratamento de água em Londres (PIZZOLATTI, 2014).

2.1.1 Parâmetros operacionais

A espessura mínima permitida para o meio filtrante está relacionada à capacidade da técnica de remover contaminantes, tais como vírus e bactérias. Desta forma, a altura mínima adotada em um filtro lento deve garantir um tratamento da água eficiente (PIZZOLATTI, 2014).

Bellamy, Hendricks e Logsdon (1985) apresentam redução de eficiência (97% para 95%) na remoção de coliformes quando a altura do meio filtrante passa de 0,97 m para 0,48 m. Murtha e Heller (2003) apontam que a redução efetiva de coliformes totais ocorrem nos 30 cm iniciais, após isso pequenas variações foram observadas. Os resultados desses autores levantam a questão de que a camada mínima em um filtro lento pode ser diminuída sem causar prejuízo quanto à remoção dos parâmetros analisados.

O tamanho dos grãos da areia destinado à camada filtrante na filtração lenta varia em torno de 0,15 e 0,30 mm e o coeficiente de uniformidade varia entre 1,5 e 3,0. A profundidade da camada filtrante encontra-se em torno de 1,20 m (CLEASBY, 1990). Di Bernardo e Sabogal Paz (2008), após analisar vários estudos desenvolvidos desde 1829 com a filtração lenta, verificaram que para melhor eficiência, é preciso que o tamanho dos grãos de areia tenham tamanho efetivo entre 0,15 e 0,30 mm, coeficiente de uniformidade compreendido entre 2 e 5, espessura da camada filtrante variando entre 0,6 e 0,9 m e massa específica de 2,6 a 2,7 T/m³.

Emmendoerfer (2006), comparou a espessura da camada de areia (50, 40 e 25 cm) de Filtros Lentos Retrolaváveis (FLR) e obteve boa eficiência no filtro com 40 cm.

Os filtros lentos são adequados para remover sólidos em suspensão contaminantes, como os patógenos. Para melhor eficiência, o filtro lento opera com taxa de filtração em torno de 2 a 6 m³/m².d, caso a água bruta seja filtrada com taxas maiores, a qualidade da água filtrada pode ser comprometida, causando riscos sanitários. Por apresentar taxa de filtração baixa, é necessário que a água bruta tenha boa qualidade, o que limita a cor verdadeira em 5 uH e a turbidez em 5 uT. Quando a água afluyente tem valores entre 5 e 10 uT de turbidez, é recomendado usar taxa de filtração entre 3 e 5 m³/m².d. Turbidez até 25 uT, recomenda-se que a taxa de filtração esteja entre 2 e 3 m³/m².d. Caso estes parâmetros apresentem valores acima do recomendado, sugere-se a implantação de pré-filtros. O filtro lento permite que o método de nível de controle de água dentro do filtro lento seja constante ou variável (DI BERNARDO, 1990; DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008).

Segundo De Souza (2015) nesses sistemas é introduzida água em baixas taxas de filtração, que variam no intervalo de 3 a 12 m³/m².d, o que permite a remoção de patógenos principalmente pela atividade biológica.

Por isso, em filtros lentos deve-se observar a vazão aplicada, para que não haja muita variação de fluxo. A diminuição repentina da taxa de filtração, de acordo com Costa (1980) ocasiona aumento de pressão sobre o meio filtrante, resultando no aparecimento de bolhas de ar que tendem a formar caminhos preferenciais, resultando em um tratamento ineficiente.

O tempo de operação do filtro é um parâmetro importante, porque esse tempo contribui para a formação do filme biológico no meio filtrante. Para a eficiência dos filtros lentos, Pizzolatti (2014) coloca que a frequência e o tempo fora de operação entre as limpezas são fatores que prejudicam ou até eliminam a atividade biológica na camada superficial, que levará certo tempo para se restabelecer e contribuir no tratamento da água.

Hendricks e Bellamy (1991) relatam que filtros maduros biologicamente podem atingir de 2 a 4 log de remoção de micro-organismos, incluindo vírus, bactérias e cistos. Por isso, a raspagem, como alternativa de limpeza do filtro, reduz a sua eficiência devido à retirada da comunidade biológica. As características da camada biológica em um filtro lento dependem do material em suspensão da água bruta (HENDRICKS; BELLAMY, 1991)

Na Tabela 1 Pizzolatti (2014) resume algumas características do meio filtrante segundo alguns autores.

Tabela 1 – Características usuais do meio filtrante

Autor	Diâmetro Efetivo (mm)	Coefficiente de uniformidade	Altura da camada filtrante* (m)
Huisman e Wood (1974)	0,15 a 0,35	< 3	0,6 a 1,2
Di Bernardo e Dantas (2005)	0,15 a 0,30	2 a 4	0,6 a 0,9
Logsdon (2008); Edzwald (2011)	0,15 a 0,30	< 5 preferível < 3	0,5 a 1,2

Fonte: Pizzolatti (2014).

2.1.2 Parâmetros da qualidade da água

Em relação à qualidade da água, no que diz respeito à remoção de turbidez, segundo estudo realizado por Murtha e Heller (2003) ela ocorre predominantemente nos 10 cm iniciais do leito filtrante, onde se concentram os mecanismos de retenção de sólidos em suspensão. Nesse estudo constataram que a turbidez para os filtros descendentes chega a valores inferiores a 0,5 uT nos primeiros 10 cm da superfície, oscilando um pouco até o final do leito.

Nesse mesmo estudo Murtha e Heller (2003) observaram que a variação da cor aparente em relação à profundidade do leito filtrante apresentou comportamento análogo ao verificado para turbidez, tendo sido observado um decaimento rápido de seus valores até os 15 cm iniciais do leito filtrante, a partir de onde apenas pequenas oscilações foram verificadas.

O decaimento da turbidez é nítido ao longo das carreiras, o que pode ser explicado pela formação de uma camada de sólidos com reduzido diâmetro, além de um biofilme na superfície da camada filtrante superior, que por sua vez incrementa a remoção dos sólidos suspensos (MURTHA; HELLER, 2003).

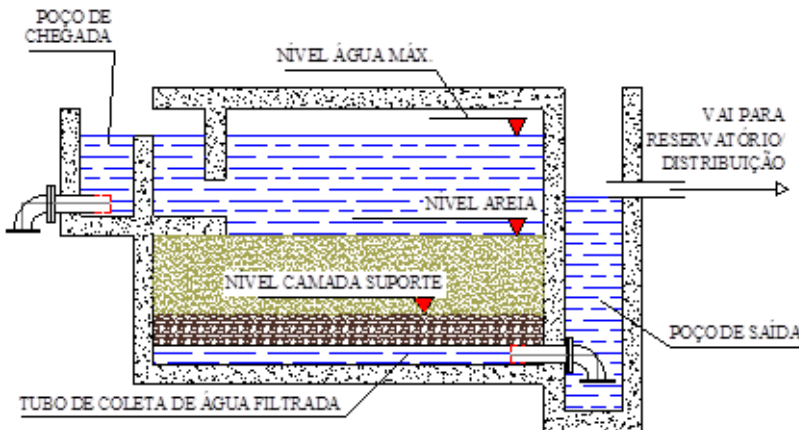
Testes estatísticos de regressão linear múltipla, realizados por Murtha e Heller (2003) em um estudo das características da qualidade da água bruta no comportamento dos FLA, não indicaram significativa correlação entre taxa de filtração e eficiência, sentido de fluxo e eficiência, e cor aparente afluente e efluente.

2.1.3 Filtros Lentos Descendentes

Filtros lentos descendentes são aqueles de leito granular, com escoamento de cima para baixo, com granulometria crescente do meio filtrante no sentido do escoamento (MACINTYRE, 1988), conforme é apresentado na Figura 1.

Um filtro lento de fluxo descendente consiste em uma câmara retangular ou circular na qual se coloca de 0,90 a 1,20 m de areia fina sobre 0,40 a 0,45 m de pedra grossa. Em cima do leito filtrante deixa-se uma camada de água de 1,00 a 1,50 m e debaixo da pedra grossa, coloca-se um sistema de drenos apropriados (VALENCIA, 1981).

Figura 1 – Filtro de fluxo descendente



Fonte: do Autor.

No início da carreira de filtração, o meio filtrante encontra-se limpo e o nível de água no interior do filtro encontra-se acima do vertedor de saída. Com o passar do tempo, há aumento do nível de água no interior do filtro para compensar a perda de carga decorrente da retenção de impurezas. Quando o nível máximo de água é atingido o filtro deve ser retirado de operação para limpeza. Para a perda de carga final são recomendados valores entre 1,0 e 2,0 m para se obter carreiras de filtração de pelo menos 30 dias (MICHELAN, 2010).

Michelan (2010) observou que com o amadurecimento do filtro, a camada de micro-organismos cresce, de forma a dificultar a passagem de água, retendo e degradando as impurezas e fornecendo uma água de qualidade, conforme os padrões de potabilidade. Normalmente, quando o nível de água no interior do filtro lento alcança um valor pré-fixado, admite-se que seja efetuada a limpeza, geralmente realizada por raspagem de parte dessa camada. A raspagem é feita em 1 a 5 cm do topo do meio filtrante. Após a raspagem, é necessário um período de amadurecimento que varia de 6 horas a duas semanas, isso vai depender da qualidade da água afluyente. Nos primeiros dias após a raspagem, a água tratada pode não apresentar boa qualidade devido à insuficiência da camada microbiana.

É importante existir no projeto um sistema de drenagem logo abaixo da camada suporte, com o intuito de drenar toda a água filtrada. Estes drenos podem ser construídos de tubulações (comerciais de PVC)

providas de orifícios, de canais com placas perfuradas ou drenos especiais. Com relação aos métodos de limpeza dos filtros, na literatura consta que o método tradicional consiste na raspagem de 1 a 2 cm de areia, de maneira manual ou mecanicamente. Relata-se também o uso de mantas sintéticas não tecidas. Quando a limpeza é manual, a areia é removida para local específico e lavada com mangueira. Quando é mecanizada, a lavagem é feita por meio de cones especiais. Seca, a areia é armazenada em local adequado. Quando a espessura da areia remanescente alcança 50 cm apenas, a camada de areia deve ser recomposta (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008).

Quando utilizadas baixas taxas de filtração a carreira de filtração é prolongada, permitindo um elevado tempo de detenção hidráulica no filtro, o que favorece intensa atividade biológica na parte superior dos mesmos para fluxo descendente, auxiliando no tratamento da água. Por isso a filtração lenta também é conhecida como filtração biológica (PIZZOLATTI, 2014).

O filtro lento, quando coberto, é considerado um reator totalmente fechado sem a intervenção da luz solar. Com isto, não há formação acelerada e significativa do filme microbiano. As partículas são então retidas na camada de areia e no próprio material aí retido (MICHELAN, 2010).

Pizzolatti (2010), em pesquisa realizada, comparou um filtro lento convencional, um filtro lento retrolavável com água filtrada e um filtro lento retrolavável com água bruta (limpeza do sistema com água bruta). Os três filtros foram construídos em fibra de vidro, possuíam área interna filtrante de $0,64 \text{ m}^2$, taxa constante de $4 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ e produção de aproximadamente 3 m^3 de água filtrada por dia. Os filtros tinham 40 cm de espessura de camada de areia, diâmetro efetivo da areia de 0,55 mm e coeficiente de uniformidade $< 1,4$. Nessa avaliação, o filtro convencional desempenhou melhor a remoção em termos de parâmetros de qualidade de água. Porém, do ponto de vista operacional (limpeza do meio filtrante), o sistema com limpeza retrolavável com água filtrada obteve melhor eficiência de limpeza do meio filtrante.

Na Tabela 2 são resumidas algumas características do filtro lento descendente segundo alguns autores.

Tabela 2 – Características de filtros lentos convencionais

	VALENCIA (1981)	HUISMAN; WOOD (1974)	CRITTENDEN et al. (2012)
Profundidade do Meio Filtrante (m)	0,90 - 1,20	0,7 - 1,4	0,9 - 1,5
Camada Suporte (m)	0,40 - 0,45	0,3	-
Altura da água na superfície (m)	1,0 - 1,5	1,0 - 1,5 (2,0 excepcionalmente)	0,9 - 1,8
Taxa de filtração (m³/m².d)	2 - 14	2,5 - 8,6	1,9 - 6,0
Diâmetro Efetivo - d₁₀ (mm)	0,30 - 0,35	0,15 - 0,35	0,15 - 0,30
Coefficiente de Uniformidade - C_u	1,5 - 3,0	< 3,0 < 2,0 pref. < 1,5 custos mais elevados	< 2,5

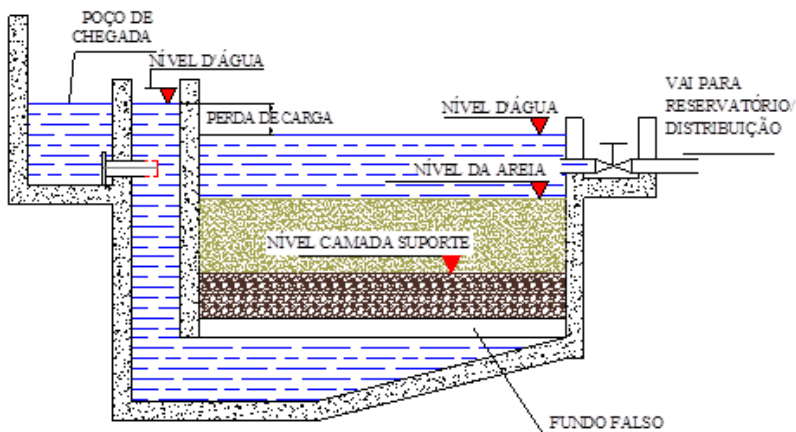
Fonte: De Souza (2015).

2.1.4 Filtros Lentos Ascendentes

A filtração lenta ascendente segue os mesmos princípios da filtração lenta descendente. A água passa pelo meio filtrante em baixa taxa e sai purificada pela ação de mecanismos físicos e biológicos de filtração (DE SOUZA, 2015).

Segundo Valencia (1981), os filtros lentos ascendentes têm sido usados na Escócia desde a última Guerra Mundial. A remoção de bactérias chega a 100% para contaminações de 180 NMP/100mL. a técnica consiste em colocar no fundo da câmara uma camada de pedra e areia fina que atue como filtro lento. Introduce-se água pelos distribuidores para que suba através do leito filtrante e seja coletada na parte superior, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Filtro de fluxo ascendente



Fonte: do Autor.

Nesses sistemas acredita-se que a camada suporte tenha um papel importante na filtração, reduzindo significativamente a turbidez (MURTHA, 1998).

No entanto, pelo sentido do fluxo, não há formação de *schmutzdecke* na superfície do meio filtrante, diminuindo a atividade biológica, sendo os mecanismos de adsorção e transporte os mais influentes (COSTA, 1980).

Murtha e Heller (2003) observaram que a remoção de turbidez no filtro ascendente ocorre nos 15 cm iniciais da camada filtrante, sendo bastante pronunciada a remoção na camada suporte. Esta cumpre uma função similar à de um pré-filtro de fluxo ascendente. Isto confere ao filtro de fluxo ascendente uma ótima capacidade de amortecimento de picos de turbidez, sem perda de carga e deterioração significativa da qualidade do efluente.

No filtro ascendente, Murtha e Heller (2003) notaram que a redução de cor aparente ocorre predominantemente na camada suporte do leito filtrante.

Na Tabela 3, são resumidas algumas características do filtro lento descendente segundo alguns autores.

Tabela 3 – Características de filtros lentos ascendentes

	VALENCIA (1981)	COSTA (1980)	Heller e Brito (2006); Murtha (1998)
Profundidade do Meio Filtrante (m)	0,90 - 1,20	0,80	0,75
Camada Suporte (m)	0,40 - 0,45	0,20 (c/ blocos Leopold)	0,40
Altura da água na superfície (m)	1,0 - 1,5	0,62	1,45
Taxa de filtração (m³/m².d)	2 - 14	4 – 10	3 e 6
Diâmetro Efetivo - d₁₀ (mm)	0,30 - 0,35	0,26	0,25
Coefficiente de Uniformidade - C_u	1,5 - 3,0	2	2,40

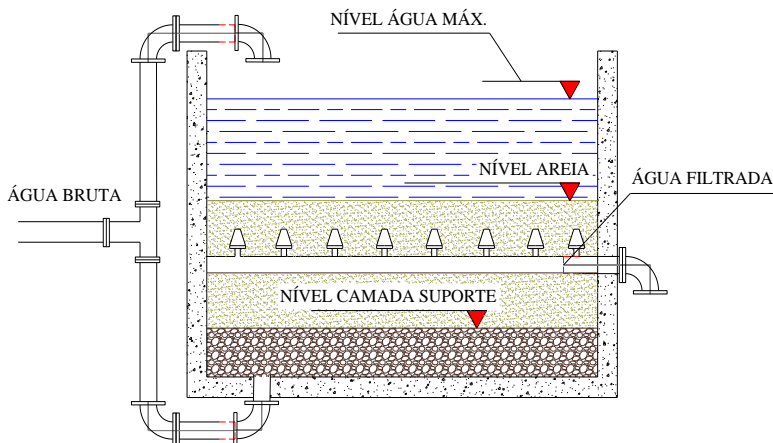
Fonte: De Souza (2015).

2.1.5 Filtros Bifluxo

Em filtros bifluxo (*biflow*), tal como nos filtros rápidos convencionais, a areia é disposta com granulometria maior na parte de baixo. A filtração se realiza tanto no fluxo descendente quanto no ascendente, propiciando uma retenção progressiva das impurezas e um aproveitamento total do leito filtrante (MACINTYRE, 1988).

No processo, a compactação do leito filtrante durante o funcionamento é assegurada pela aplicação de uma parte da vazão no sentido de cima para baixo, como mostra a Figura 3. A coleta da água filtrada realiza-se no interior do leito filtrante através de drenos especialmente projetados para esse fim. A camada de areia acima dos drenos funciona como um filtro descendente convencional (MACINTYRE, 1988).

Figura 3 – Esquema do filtro rápido bifluxo



Fonte: do Autor.

A ideia de se realizar filtração rápida em ambos os sentidos de escoamento, ascendente e descende, surgiu depois de ser constatada a possibilidade de fluidificação do meio filtrante na aplicação do escoamento ascendente (YACTAYO, 2004).

Assim, surgiram os filtros denominados *Biflow*, onde parte da água bruta é introduzida na parte superior, e o restante na parte inferior do filtro. A coleta se faz por meio de tubos e bocais instalados no interior da camada filtrante (YACTAYO, 2004).

No caso de se usar apenas areia como material filtrante, a taxa de filtração descendente no início de uma carreira de filtração bifluxo é relativamente alta. Conforme a carreira progride, no entanto, o fluxo via sentido descendente passa a diminuir à medida que a porção de areia fina torna-se obstruída. Se o fluxo total ocorre a uma taxa constante, a quantidade de água que é filtrada por fluxo ascendente através da porção inferior do filtro aumenta com o tempo. A colmatção não afeta a perda de carga tanto nesta parte do filtro como na parte superior (fluxo descendente). A uma dada perda de carga, uma quantidade maior de água pode ser filtrada através do filtro de fundo (fluxo ascendente). A média de saída do filtrado pela parte superior do filtro é normalmente de 20% a 30% do total (HAMANN; MCKINNEY, 1967).

A técnica do filtro rápido bifluxo foi abandonada devido à colmatção nos drenos de coleta de água filtrada. Apesar de evitar os inconvenientes de possíveis problemas derivados da fluidificação do meio

filtrante, este tipo de instalação apresenta o inconveniente de que a coleta de água se faz no interior do meio filtrante, onde os bocais podem obstruir-se com o tempo, requerendo manutenção rotineira (YACTAYO, 2004).

Com a adoção da retrolavagem, a utilização da filtração lenta como tratamento da água poderia ser reconsiderada devido a facilidade de operação (PIZZOLATTI, 2014). Além disso, devido a novas alternativas de bocais de coleta de água filtrada, técnicas como essa podem ser resgatadas como uma boa solução no tratamento de água em várias situações.

2.2 RETROLAVAGEM

Há mais de dez anos, o Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOÁ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) estuda sistemas descentralizados de tratamento de água. Esses sistemas podem ser de pequeno porte para atendimento de pequenas comunidades ou sistemas familiares, sem ligação a redes de abastecimento (DE SOUZA, 2015).

O sistema de limpeza do filtro por retrolavagem é um sistema simples onde a água filtrada é armazenada em um reservatório e retornar com escoamento ascendente ao filtro, de modo a fluidificar o meio filtrante e, conseqüentemente, remover as impurezas contidas no meio granular (MICHELAN 2010).

De acordo com Pizzolatti (2014), o primeiro piloto de filtração lenta com retrolavagem foi desenvolvido por Michielin (2003). O sistema foi feito em acrílico para que fosse possível estudar as condições hidráulicas de fluidificação do material filtrante, como: velocidade de aproximação; percentagem de expansão e a observação do comportamento do meio filtrante e camada suporte durante a retrolavagem; e as condições hidráulicas para que com a abertura de uma única válvula fosse possível realizar a limpeza do material filtrante. Nesse trabalho não foi avaliada a qualidade de água produzida.

Na concepção clássica dos filtros lentos, a retrolavagem não seria simples de ser aplicada. Por isso, ao longo dos estudos do LAPOÁ, parâmetros de operação e construção foram aperfeiçoados para uma melhor aplicação da retrolavagem em filtros de escala familiar ou comunitária, simplificando a operação (DE SOUZA, 2015).

O sistema de limpeza por retrolavagem vem a ser alternativa de limpeza no filtro lento por dispensar raspagem da areia e sua retirada do

filtro. No método convencional de limpeza a lavagem da areia é feita em tanque em anexo ou local similar, e posteriormente recolocada no filtro. O procedimento de limpeza convencional não é considerado procedimento atrativo para ser desenvolvido em comunidades rurais de base familiar por ser considerado trabalhoso (MICHELAN, 2010).

Contudo, a filtração lenta com retrolavagem, em função do seu *layout*, pode ter o custo de implantação mais elevado devido à necessidade de reservatório de água para retrolavagem, sistema de calhas para coleta da água de retrolavagem, válvulas e demais acessórios necessários para o funcionamento hidráulico da limpeza (PIZZOLATTI, 2014).

De acordo com Pizzolatti (2014), a filtração lenta com retrolavagem apresenta vantagens operacionais (operação de limpeza) em comparação à filtração lenta convencional. Entre elas, destaca:

- Não há necessidade de drenar o filtro para executar a limpeza;
- Tempo reduzido de limpeza e, conseqüentemente, reduzido tempo fora de operação (resultando em maior produção efetiva);
- Não ocorre perda de material filtrante;
- Não há necessidade de espaço para armazenagem e lavagem de areia;
- Menor custo operacional (mão de obra) para o procedimento de limpeza;
- Ausência de ar no meio filtrante durante a limpeza.

Os estudos realizados demonstraram que a retrolavagem é uma tecnologia promissora, sendo eficiente na limpeza dos filtros. Ainda, sem alterar significativamente a qualidade da água, proporcionalmente maiores produções de filtração maiores do que as de filtros convencionais (DE SOUZA, 2015).

No estudo de De Souza (2015), os sistemas de limpeza com retrolavagem em filtros lentos ascendentes nem sempre funcionaram como esperado. A perda de carga oferecida pela camada suporte devido a colmatagem impedia a limpeza do meio filtrante apenas por retrolavagem. Por isso, a descarga de fundo com água na interface foi associada, fazendo a limpeza apenas da camada suporte inicialmente, eliminando assim parte da perda de carga. A partir disso, ficou demonstrada a eficiência na limpeza dos filtros. As descargas de fundo ou a retrolavagem não se mostraram eficientes para a limpeza quando empregadas isoladamente como método de limpeza.

Em filtros lentos retrolaváveis, carreiras de filtração são prolongadas e a limpeza dos filtros é simplificada sem detrimento significativo da qualidade da água quando comparados a filtros convencionais (MARNOTO, 2008; SOARES et al., 2010; MICHELAN, 2010; PIZZOLATTI et al., 2010, 2014, MICHELAN et al., 2011, 2011; POERSCH, 2012; DE SOUZA, 2013; ISHII, 2013; PIZZOLATTI, 2014; DE SOUZA et al., 2016; STÜPP, 2016), podendo até ser melhorados quando o filtro é limpo com água bruta (PIZZOLATTI, 2010, 2014; ISHII, 2013; PIZZOLATTI et al., 2014). Estudos ainda apontam a eficiência desses sistemas na remoção de agrotóxicos e (oo)cistos de protozoários (PIZZOLATTI, 2014), além de cianobactérias (PIZZOLATTI, 2010, 2014; DE SOUZA; MONDARDO; SENS, 2017). Acredita-se que a limpeza efetuada nos filtros não remova totalmente a camada biológica superficial (*schmutzdecke*) (MARNOTO, 2008; MARNOTO et al., 2008; DE SOUZA, 2013; DE SOUZA et al., 2016) ou o biofilme na superfície da areia (CRITTENDEN et al., 2012), importantes para o tratamento biológico (HUISMAN; WOOD, 1974; NAKAMOTO, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para cumprir os objetivos propostos foi dimensionado e construído um sistema piloto de filtro lento com escoamento bifluxo (FLB) com limpeza por descarga de fundo com entrada de água na interface entre areia e camada suporte e retrolavagem. O sistema foi construído e operado nas instalações do Laboratório de Água da Lagoa do Peri (LALP), unidade do LAPOÁ/UFSC, junto à Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). Na avaliação do desempenho do filtro foram monitorados parâmetros operacionais e de qualidade de água.

Foram realizadas, ao todo 34 carreiras de filtração de onde se pôde extrair informações a respeito do funcionamento da tecnologia empregada. O período de monitoramento ficou restrito ao cronograma do estudo e esse durou 195 dias, de acordo com o previsto. Deste modo, puderam ser feitos 34 testes de limpeza.

3.1 ÁGUA DE ESTUDO

A água utilizada nesse estudo foi a da Lagoa do Peri, localizada a sudoeste da ilha de Florianópolis. De acordo com Pizzolatti (2014), essa lagoa tem ligação com o mar pelo canal Sangradouro, com uma diferença de cota de aproximadamente três metros, que faz com que a lagoa não receba água salgada. Cabe ressaltar que se trata de uma água com elevada densidade de cianobactérias, principalmente as filamentosas. Considerando as pesquisas de Pizzolatti (2014) e De Souza (2015), tal característica seria desfavorável à operação do FLB. De acordo com Sá (2006), a presença de cianobactérias reduz a carreira de filtração, o que pode não ser adequado ao uso dessa água na utilização da técnica da filtração lenta com limpeza convencional (raspagem).

A água bruta é coletada do poço de captação da Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri, que alimenta um reservatório instalado em sala anexa ao LALP. Com o auxílio de um conjunto motor-bomba esta era recalçada para um controlador e distribuidor de vazão por câmara de nível constante por orifício, confeccionada em aço inox, e encaminhada ao sistema piloto.

Foi confirmado na pesquisa de Pizzolatti (2014) que para essa água não é recomendável à utilização da filtração lenta, pois é necessária

limpeza do filtro com muita frequência. No entanto, optou-se pelo uso do manancial com o objetivo de acelerar a colmatação da camada filtrante, podendo-se operar mais vezes a retrolavagem.

3.2 CONCEPÇÃO DO PILOTO DE FILTRAÇÃO LENTA BIFLUXO COM RETROLAVAGEM

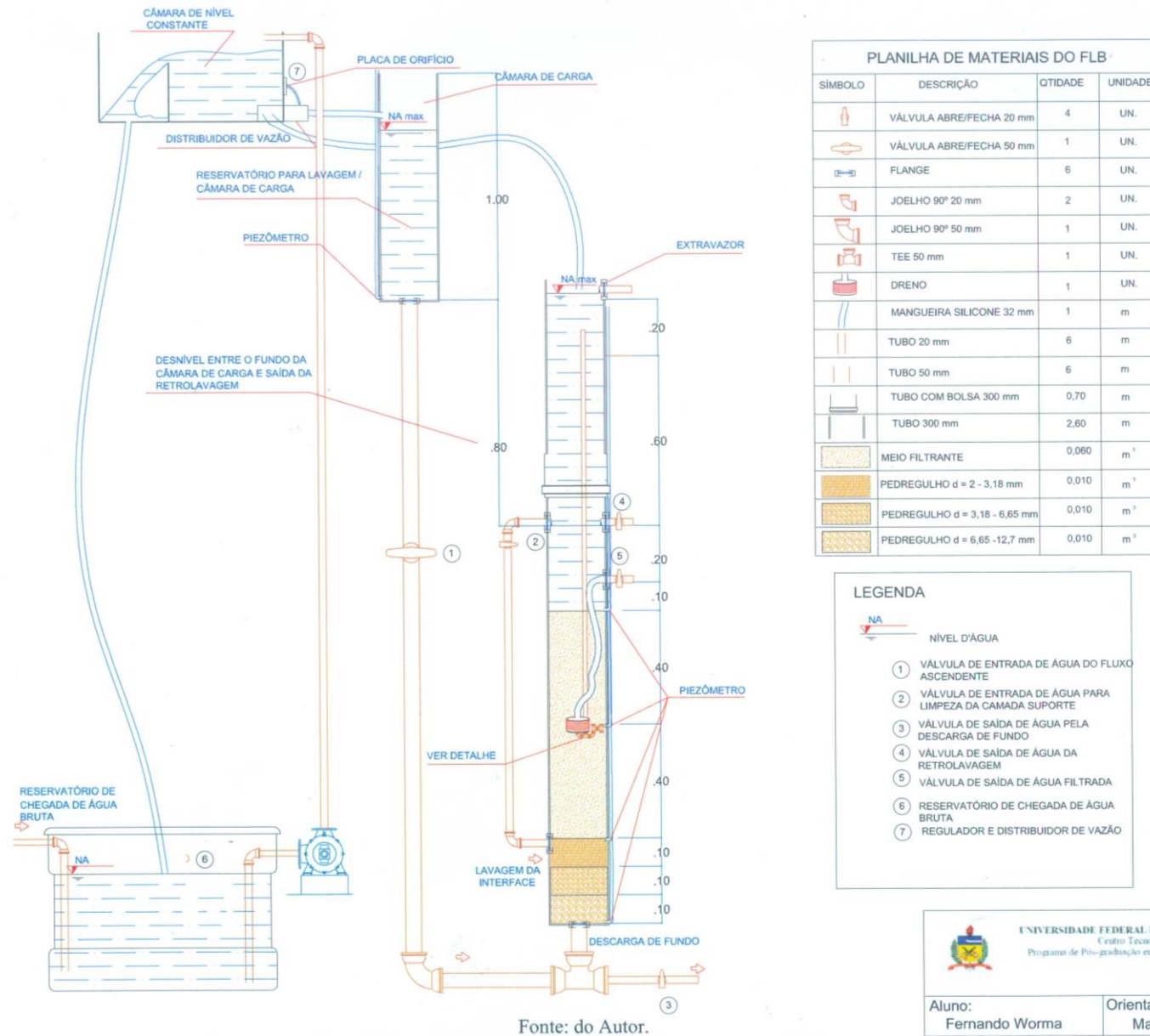
Para o estudo da filtração lenta bifluxo com retrolavagem um sistema piloto foi projetado (Figura 4). O corpo do filtro foi construído com tubos de policloreto de vinila (PVC) com diâmetro de 300 mm. As instalações hidráulicas entre a câmara de carga e o filtro foram feitas de tubos de PVC soldável para água fria de diâmetro 20 e 50 mm. Para suporte, tanto do filtro quanto do reservatório, foram utilizados tijolos de concreto. O material filtrante e camada suporte utilizados têm as características de material utilizado em filtros lentos. Na Tabela 4, são apresentadas as características gerais e especificações dos materiais que foram aplicados na camada suporte e no meio filtrante do FLB.

Tabela 4 – Características gerais dos FLB

Material e características da Camada Suporte	Seixos Rolados:	
	L = 10 cm	d = 6,65 - 12,7 mm
	L = 10 cm	d = 3,18 - 6,65 mm
	L = 10 cm	d = 2 - 3,18 mm
Material e características do Meio Filtrante	Areia:	
	L = 40 cm	
	$d_{10} = 0,28$ mm	
	$C_u = 1,63$	

Fonte: do Autor.

Figura 4 – Filtro Bifluxe com Retrolavagem



No poço de chegada de água bruta da ETA da Lagoa do Peri, existe uma derivação de tubulação que abastece o LALP. A água bruta que chegava no reservatório do LALP era recalçada até uma câmara de carga de nível constante, onde a vazão de referência de 0,4 L/min era controlada por meio de orifício. A partir daí a vazão era dividida, parte dessa (0,2 L/min) era encaminhada por uma tubulação até a câmara de carga do sistema FLB, alimentando o escoamento ascendente. A outra parte (0,2 L/min) alimentava o escoamento descendente, sendo aplicada por uma tubulação diretamente na parte superior do FLB.

A manutenção periódica do filtro (descarga de fundo com entrada de água na interface entre o meio filtrante e a camada suporte e ou retrolavagem) era realizada quando atingia-se a carga hidráulica de 110 cm, o que acontecia primeiramente no fluxo descendente. Esta limpeza era feita por meio de reservatório elevado, assim permitia que a água retornasse ao filtro com velocidade suficiente para que ocorresse a expansão pré-determinada. Nessa concepção, o filtro foi retrolavado com água bruta.

A descarga de fundo com entrada de água na interface entre o meio filtrante e camada suporte foi prevista por recomendação de Souza (2015), que utilizando o mesmo manancial constatou um grande acúmulo de impurezas, resultando em elevada perda de carga na camada suporte e na parte inferior do filtro.

Dessa maneira, durante a descarga de fundo, libera-se pela interface o fluxo de água da parte superior do filtro. Isso propiciava a limpeza da camada suporte. A limpeza do meio suporte é necessária pois a perda de carga é alta, como constatado na pesquisa de De Souza (2015), evitando com que a retrolavagem aconteça de forma satisfatória.

Também foi necessário que a carga hidráulica da câmara de carga vencesse a perda de carga no meio filtrante e efetuasse a retrolavagem sem o auxílio de bombas. Dessa forma, o fundo da câmara de carga foi colocado 80 cm acima da saída de água de retrolavagem (válvula “4”, Figura 4).

Com a abertura da válvula “4”, libera-se o fluxo de água da câmara de carga. Pela diferença de altura, entre o fundo dessa câmara e a saída de água da retrolavagem, acontece o escoamento ascensional e o aumento da velocidade de aproximação (V_a) no fundo do filtro, logo abaixo da camada suporte. O aumento da velocidade no fluxo é o que deve garantir a expansão do meio filtrante e consequentemente a sua limpeza.

Desta forma, a operação do FLB é descrita e discutida separando alguns eventos. Ainda, pela variação na operação no mesmo filtro, as

carreiras foram agrupadas em fases para uma melhor apresentação e compreensão dos resultados.

A Fase 0 foi o período de maturação em que a água filtrada apresentava valores de remoção de turbidez inferiores a 70%. Nota-se também que não houve perda de carga na camada suporte, que aparece a partir da 9ª carreira de maneira cada vez mais representativa.

Nas fases seguintes houve diferenciação na operação do FLB. Na Fase 1 da operação do FLB, a tubulação que interliga a câmara de carga tinha diâmetro de 20 mm. Devido a utilização dessa tubulação as perdas de carga eram maiores, resultando em expansões menos expressivas no momento da retrolavagem.

A Fase 2 da operação do FLB foi caracterizada pela tubulação que interliga a câmara de carga com diâmetro de 50 mm. Devido a utilização dessa tubulação as perdas de carga diminuíram, resultando em expansões de maior grandeza durante a retrolavagem.

Na Fase 3, na câmara de carga, foi feita uma extensão do tubo de 300 mm e a água pôde atingir níveis mais altos. Devido a esse aumento, o volume de água é maior, passando no mesmo tempo em que a fase 2, aumentando conseqüentemente a vazão na retrolavagem.

3.2.1 Caracterização do Meio Filtrante

A espessura das camadas filtrantes, tanto no fluxo descendente, quanto no ascendente foi de 40 cm, que é a mesma utilizada em estudos de filtração lenta com retrolavagem realizados pelo LAPOÁ. Essa espessura está relacionada à capacidade da técnica de remover contaminantes, como vírus e bactérias. Por isso, essa altura mínima adotada deve garantir um tratamento da água eficiente.

As dimensões do material filtrante e da camada suporte utilizados foram determinados por meio de três ensaios granulométricos seguindo a norma NBR 7181:1984 (ABNT, 1984). As dimensões utilizadas podem ser observadas na Tabela 4.

Tais características estão de acordo com o utilizado em filtração lenta em termos de diâmetro efetivo (d_{10}) e coeficiente de uniformidade (C_u).

3.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA PILOTO

3.3.1 Características da expansão do meio filtrante

Para que ocorra a retrolavagem, a água deve percorrer o filtro com uma velocidade mínima, de modo que ocorra a expansão do meio filtrante. A velocidade mínima de fluidificação (v_{mf}) e a perda de carga no meio filtrante fluidificado (h_f) foram determinadas experimentalmente.

Foram realizados testes de expansão em ensaios feitos em um sistema (Figura 5) existente no Laboratório de Apoio da Lagoa do Peri (LALP). O ensaio consiste em alimentar uma câmara de carga do sistema com variações na vazão e monitorar a perda de carga do meio filtrante expandido (meio filtrante limpo). Com a variação da vazão de alimentação ocorre a variação do percentual de expansão da espessura camada filtrante. Desta forma, determina-se a perda de carga correspondente a variação da expansão do meio filtrante. Foram aplicadas seis vazões e os seus valores, com as expansões obtidas foram apresentados na Figura 9.

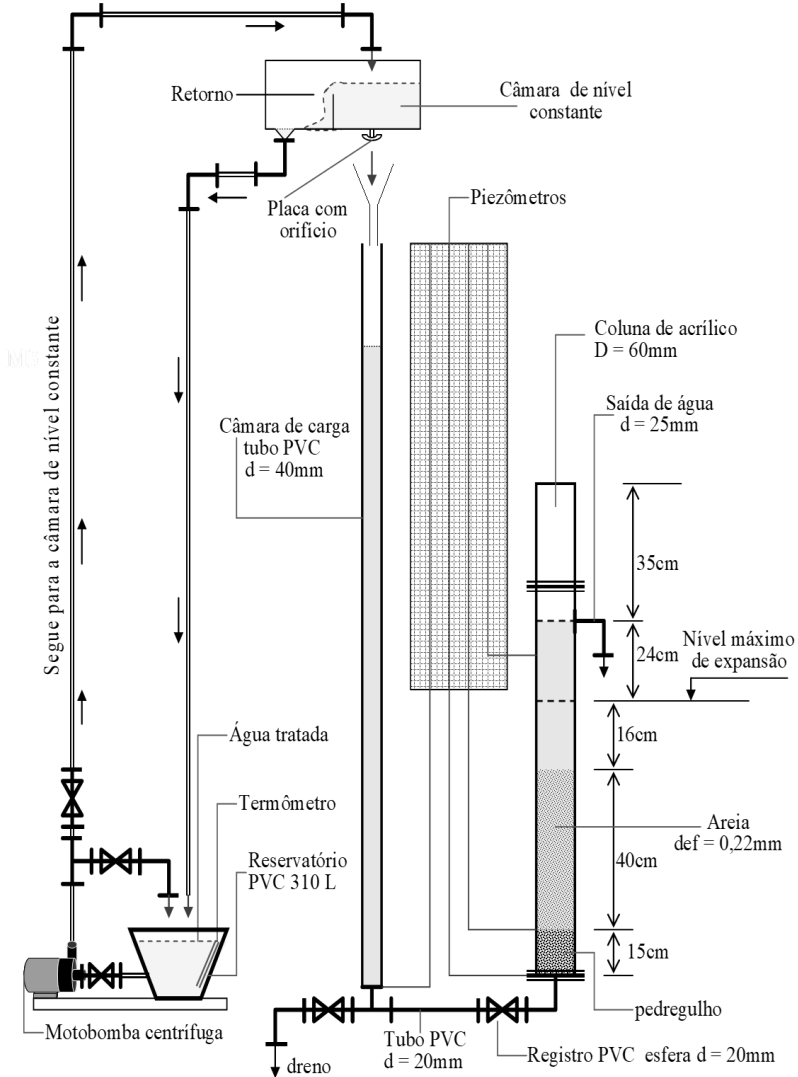
3.3.2 Cálculo do volume da câmara de carga

Para o cálculo do volume da câmara de carga foi considerada a velocidade necessária para a expansão desejada e o tempo de retrolavagem adotado. Dessa maneira, esta foi dimensionada para que, no momento da retrolavagem, tivesse água suficiente para lavar o filtro durante 4 min. Portanto, o volume de água bruta na câmara de carga para realização da retrolavagem deveria ser o necessário para expandir o leito filtrante em 25% da espessura da camada de areia durante o tempo de 4 min.

De acordo com o ensaio de expansão do leito filtrante realizado, com a areia utilizada no piloto de filtração lenta bifluxo ($d_{10}=0,28$ mm e $C_u=1,63$), de espessura de 40 cm de leito filtrante, obtém-se uma velocidade de 0,40 m/min para uma expansão de 25%.

No sistema piloto para realização do ensaio de expansão, o diâmetro do tubo onde a areia foi expandida é de $d = 60$ mm. Então, para essa areia, é necessária uma $V_a = 0,40$ m/min para realizar a expansão desejada, em torno de 25% da espessura da camada filtrante.

Figura 5 – Esquema do sistema utilizado para ensaio de expansão



Fonte: Emmendoerfer (2006)

Sabendo que o diâmetro do filtro piloto bifluxo é de 300 mm, A_F é a área do filtro e Q_R é a vazão necessária para acontecer a retrolavagem, temos que:

Equação (1)

$$Q_R = V_a \times A_F$$

$$Q_R = \frac{0,40 \text{ m}}{\text{min}} \times \left(3,14 \times \frac{(0,30)^2}{4} \right) = 0,02826 \text{ m}^3/\text{min}$$

Sabendo-se que o tempo necessário para uma boa eficiência na retrolavagem para uma expansão de 25% é de $t = 4$ min, tem-se que:

Equação (2)

$$Q_R = V_R/t$$

Onde, V_R = Volume do reservatório de água bruta necessária para 4 min de retrolavagem.

$$V_R = \frac{0,02826 \text{ m}^3}{\text{min}} \times 4 \text{ min} = 113,04 \text{ L}$$

Portanto, são necessários 113 L de água bruta na câmara de carga para que aconteça uma retrolavagem com 25% de expansão do leito filtrante, durante o tempo de 4 min.

No entanto, foi utilizado tubo de PVC 300 mm de 1 m de comprimento. O volume resultante dessa tubulação foi 70 L. Então o experimento prosseguiu com esse volume para a câmara de carga. Diante disso, obtiveram-se expansões menores para a camada filtrante durante a retrolavagem.

3.3.3 Determinação da cota da câmara de carga

Para o cálculo da cota da câmara de carga, foram levadas em consideração características do meio filtrante durante a retrolavagem, sendo essas: o diâmetro efetivo, as perdas de carga no sistema e a velocidade de aproximação da água e respectivas expansões do meio filtrante.

Para obtenção desses parâmetros, foi necessária a realização dos ensaios de expansão e granulométricos.

Para o cálculo do desnível do fundo da câmara de carga em relação a saída de água da retrolavagem, deve ser levado em conta todas as perdas de carga possíveis, que possam oferecer resistência contrária ao vetor da velocidade de aproximação (V_a) necessária para que aconteça a limpeza satisfatoriamente. As perdas são: a perda de carga com a camada filtrante e, também, a perda de carga da tubulação e conexões de interligação entre a câmara de carga e o filtro.

De acordo com o ensaio de expansão do leito filtrante, foi obtido como resultado 29,1 cm de perda de carga para uma camada de 40 cm de leito filtrante, com uma areia de $d_{10}=0,28\text{mm}$ e $C_u=1,62$.

Com isso, a perda de carga para um leito filtrante de 80 cm foi de 58,2 cm.

Comprimento equivalente para as perdas de carga localizadas das conexões:

- Registro de esfera em PVC, $\phi = 20$ mm;
- Joelho de 90° em PVC, $\phi = 20$ mm;
- Tê de saída lateral em PVC, $\phi = 20$ mm;
- Saída de canalização em PVC, $\phi = 20$ mm.

Além das conexões, uma tubulação de 3 m de comprimento leva a água bruta da câmara de carga até a entrada do filtro para a realização da retrolavagem do leito filtrante.

Foi realizado o cálculo da perda de carga unitária para calcular a perda de carga total da tubulação de interligação da câmara de carga ao filtro.

A perda total é referente ao comprimento da tubulação e conexões que liga a câmara de carga ao filtro.

Assim sendo, o desnível em que o fundo da câmara de carga deve estar, em relação à saída da retrolavagem, é a soma das perdas de carga no leito filtrante, somado as perdas de cargas oferecidas pelas tubulações e suas conexões.

Após a realização dos cálculos para a determinação da perda de carga das conexões e tubos que ligavam a câmara de carga e o filtro, verificou-se a inviabilidade de trabalhar com o valor calculado, pois se teria um desnível de quase 5 m entre o fundo da câmara de carga e a saída de água da retrolavagem.

Como o desnível entre a câmara de carga e a saída da retrolavagem tiveram um valor alto nos cálculos, optou-se por fazer a medição da perda de carga da tubulação *in loco* com a instalação de piezômetros.

As tubulações de interligação entre a câmara de carga e o filtro inicialmente foram instaladas com tubo de PVC de diâmetro de 20 mm, caracterizando a Fase 1 da operação. A perda de carga foi aferida instalando-se um piezômetro na entrada do filtro. Desta forma, poderia ser medida a perda de carga da tubulação. Verificou-se que esta perda de carga era bastante inferior a calculada, optando-se por manter os diâmetros das tubulações escolhidos previamente.

Para a verificação da perda de carga foi colocado o fundo da câmara de carga com 0,80 m de desnível em relação à saída da retrolavagem. Os níveis da câmara de carga e da saída da retrolavagem foram colocados nas posições em que ocorreria a retrolavagem e constatou-se uma vazão próxima a desejada de 28 L/min, que resultava numa V_a de 0,40 m/min, necessário para uma expansão de 25% do meio filtrante.

Devido a tubulação apresentar essa perda de carga o tempo de retrolavagem foi de 10 min, resultando numa vazão menor, conseqüentemente numa menor expansão do leito filtrante.

Após aproximadamente 3 meses de operação, a tubulação de 20 mm apresentou muita perda de carga a ponto de necessitar a troca, substituída por uma tubulação de 50 mm de diâmetro, caracterizando a Fase 2 da operação. Por isso, a nova perda de carga é aliviada pela perda de carga unitária que apresenta a tubulação de 50 mm.

A nova perda de carga é composta pelo comprimento equivalente das perdas de carga localizadas das conexões:

- Saída de canalização em PVC, $\phi = 50$ mm.
- Registro de esfera em PVC, $\phi = 50$ mm;
- Joelho de 90° em PVC, $\phi = 50$ mm;
- Tê de saída lateral em PVC, $\phi = 50$ mm;
- Saída de canalização em PVC, $\phi = 20$ mm.

Assim sendo, o desnível em que o fundo da câmara de carga deve estar, em relação a saída da retrolavagem permaneceu em 80 cm.

3.3.4 Controle da vazão de alimentação do sistema piloto

Para o controle da vazão de alimentação do sistema, foi considerada uma taxa de filtração de 4 m³/m².dia em cada sentido de escoamento. O controle da vazão foi realizado por uma câmara de nível constante com escoamento por orifício.

A água bruta que chegava ao reservatório era recalçada para essa câmara de nível. O orifício foi ajustado para ter uma vazão de 0,4 L/min, compatível com a taxa de filtração total do sistema. Após a saída do orifício, a vazão era dividida, 0,2 L/min foi para a alimentação ascendente e 0,2 L/min para o escoamento descendente.

3.4 OPERAÇÃO DO FLB

O filtro lento bifluxo foi operado e abastecido por um sistema de orifício para manter uma taxa de filtração total em torno de $8 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ com água da Lagoa do Peri. Essa taxa de filtração não foi mantida constante, e variou de 2,2 a $18,2 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, obtendo um valor médio de $11 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. A carga hidráulica era variável e o seu nível se elevava em função da colmatação da camada filtrante. Esse nível chegava até 110 cm, onde alcançava o extravasor, que ao atingi-lo era realizado a limpeza da camada suporte e/ou a retrolavagem. Após a limpeza do meio filtrante, o filtro é colocado novamente em operação.

3.4.1 Limpeza na camada suporte

A descarga de fundo com entrada de água na interface entre o meio filtrante e a camada suporte foi realizada pela liberação do fluxo pela parte inferior.

Nesse caso, introduz-se água bruta na interface entre areia e camada suporte. Essa água era proveniente da carga hidráulica do próprio corpo do filtro e tal procedimento tinha como finalidade a limpeza apenas da camada suporte. Dessa forma, era mais eficiente a limpeza dessa camada, pois não havia perda de carga ocasionada pela passagem da água no meio filtrante.

Essa limpeza era realizada pelo fechamento da válvula “1” e abertura das válvulas “2” e “3” (Figura 4). A descarga de água era realizada durante 3 minutos e 30 segundos e, ao final, as válvulas eram recolocadas na posição normal de filtração.

Para limpeza da camada suporte do sistema era realizado o procedimento:

1. Fechar registro de saída da água filtrada;
2. Fechar registro do fluxo ascendente;
3. Abrir registro da limpeza na interface da camada suporte;

4. Abrir registro de descarga de fundo
5. Cronometrar tempo de limpeza da camada suporte/Coletar água da saída da descarga de fundo.

3.4.2 Retrolavagem

A Retrolavagem (R) era realizada pela passagem de água bruta no fluxo ascendente. A água da retrolavagem era armazenada em uma câmara de carga acoplada paralelamente ao filtro.

Foi utilizada velocidade de aproximação suficiente para a fluidificação do meio filtrante e expansão média atingindo percentuais próximos a 25%. Em estudo anterior, realizado por De Souza (2015), foi necessária a realização da limpeza da camada suporte anteriormente a retrolavagem. Isso se deve ao aumento da perda de carga nessa camada ocasionada pela sua colmatção.

Para iniciar o procedimento da retrolavagem era necessário encher a câmara de carga, assim havia volume suficiente de água para a limpeza ser satisfatória. Por isso, fecha-se a válvula “1” (Figura 4) para impedir o escoamento ascendente. Parte da água que é recalçada para a câmara de nível constante é desviada e recalçada para a câmara de carga do FLB.

Uma vantagem da utilização da água bruta é a economia de água filtrada. Outra vantagem é a operação, que se tornou menos complicada em relação a um filtro com reservatório elevado de água filtrada. Isso facilita o controle de abertura e fechamento de válvulas para concepção adotada. Além disso, elimina-se a necessidade de bomba para o recalque da água filtrada para a câmara de carga.

Para iniciar a retrolavagem do sistema, fechava-se a válvula “1” e então a água bruta recalçada era desviada da câmara de nível constante para a câmara de carga. Após, a expansão do leito filtrante se realizava pelo fechamento da válvula “5” e abertura da válvula “1” e “4” (Figura 4). A água do filtro acima da saída da válvula “4” escoava, deixando 1,80 m de carga hidráulica disponível. Essa carga torna possível o aumento do fluxo ascendente, logo, acontece a retrolavagem. Ao final do processo a válvula “4” era fechada e a “5” aberta, retomando a filtração em fluxo declinante até a estabilização da taxa de filtração de operação.

Para realizar a limpeza do meio suporte através da retrolavagem, era realizado o seguinte procedimento:

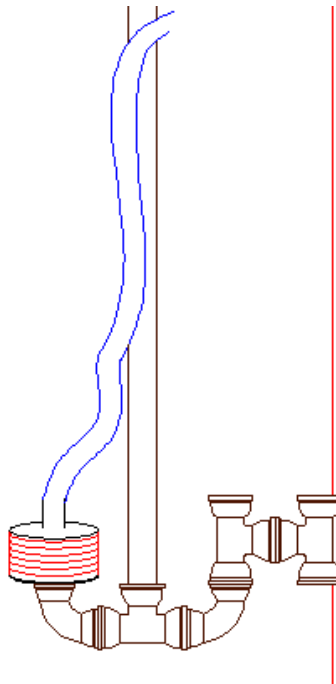
1. Fechar registro de descarga de fundo;
2. Fechar registro da limpeza da interface da camada suporte;

3. Recalcar água bruta para câmara de carga/medir nível;
4. Abrir registro de saída da retrolavagem;
5. Abrir registro do fluxo ascendente/Cronometrar tempo de retrolavagem/Coletar água da saída da retrolavagem de 1 em 1 min durante 10 min na Fase 1 e de 30 em 30 segundos durante 5 min nas Fases 2 e 3.

3.4.3 Sistema de Limpeza do bocal de coleta de água filtrada

Caso haja colmatção do coletor de água filtrada com a fina areia utilizada no sistema, para viabilizar o sistema de limpeza do bocal que coleta a água filtrada, foi elaborada uma engrenagem para suspendê-lo (Figura 6). A colmatção pode obstruir a passagem da água, diminuindo a vazão.

Figura 6 – Detalhe do suporte do bocal



Fonte: do Autor.

Por isso, torna-se necessário encontrar uma alternativa de limpeza do bocal sem que haja remoção da areia para sua retirada. Desta forma, quando a areia se expande no momento da retrolavagem, o bocal pode ser suspenso.

Novos modelos de bocais, conforme observa-se na foto da Figura 7, possibilitam a abertura dos anéis que a compõem, viabilizando a limpeza com injeção de ar ou água.

Figura 7 – Foto do bocal utilizado



Fonte: do Autor.

3.5 MONITORAMENTO DO SISTEMA PILOTO

Para se alcançar os objetivos pretendidos, o FLB foi monitorado quatro vezes por semana e foram avaliados parâmetros de qualidade de água e parâmetros operacionais do filtro.

Inicialmente, os parâmetros de qualidade de água foram medidos em termos de cor aparente e turbidez, após um tempo de operação mediu-se também cor verdadeira.

Dentre os parâmetros operacionais do FLB foram monitoradas as perdas de cargas no meio filtrante durante toda a carreira de filtração e, igualmente, na camada suporte. Além disso, foram monitoradas as vazões de entrada e saída do sistema, expansão do meio filtrante e desempenho da retrolavagem.

Para monitoramento do sistema era realizado medições segundo o procedimento:

1. Aferir vazão do orifício (Vazão de referência = 66 mL/10s);
2. Aferir vazões da entrada de água ascendente e descendente (Vazão de referência = 33 mL/10s em cada fluxo);
3. Aferir vazão de saída de água filtrada (\leq Vazão do orifício);
4. Coletar amostra de água bruta para medir Cor aparente e Turbidez;
5. Coletar amostra de água filtrada para medir Cor aparente e Turbidez;
6. Medir perdas de carga.

3.5.1 Parâmetros operacionais

3.5.1.1 *Perdas de carga*

A carga hidráulica foi monitorada por meio de piezômetros instalados ao lado do filtro. As perdas de carga foram calculadas pela diferença da carga hidráulica em piezômetros instalados no filtro antes da entrada (acima do distribuidor de vazão), entre a camada suporte e o meio filtrante, no meio da camada filtrante, posição onde está instalado o bocal de coleta da água filtrada e, por fim, acima do meio filtrante. Assim pode-se medir pela diferença de carga hidráulica entre eles a perda de carga na camada suporte (Δh_{cs}), no meio filtrante do fluxo ascendente (Δh_{mfa}), no meio filtrante referente ao fluxo descendente (Δh_{mfd}) e perda de carga total (Δh_t).

3.5.1.2 *Vazão de entrada e saída do sistema*

A vazão foi aferida volumetricamente, com o auxílio de cronometro e proveta graduada. Isso é necessário para que a taxa de filtração permaneça naquela preestabelecida.

3.5.1.3 *Desempenho da limpeza da camada suporte*

Foi avaliado o desempenho da limpeza da camada suporte do filtro. A água foi avaliada em termos de turbidez com o objetivo de acompanhar a limpeza dessa camada.

3.5.1.4 *Desempenho da Retrolavagem*

Para executar a retrolavagem de uma carreira, o filtro foi alimentado até que atingisse a carga hidráulica de 110 cm, o que acontecia primeiramente no fluxo descendente.

Com a expansão do leito filtrante, a areia é totalmente fluidificada, causando atrito intenso entre os grãos, o que causa um maior desprendimento do filme biológico aderido à superfície desses, consequentemente uma maior magnitude de turbidez durante a lavagem.

Foi dada atenção aos momentos antes e depois das lavagens, assim foi feita uma avaliação da eficiência da limpeza dos filtros.

Durante a retrolavagem do filtro, a água foi avaliada em termos de turbidez, com o objetivo de acompanhar a limpeza do material filtrante. O FLB foi monitorado a cada 1 min na Fase 1 e a cada 30 s na Fase 2 em termos de turbidez.

Foram avaliados o desempenho da retrolavagem, o tempo de recuperação da qualidade após a limpeza e, por fim, a qualidade da água filtrada. A perda de carga inicial, que é um indicativo da eficiência da operação de limpeza, foi monitorada a cada 1 hora.

A expansão do meio filtrante é estimada comparando os parâmetros avaliados com a curva de expansão do meio filtrante.

Foram coletados os valores da turbidez durante a retrolavagem para construção de tabelas e gráficos. As operações de limpeza foram contabilizadas.

3.5.2 Parâmetros da qualidade da água

Foi abordada a qualidade da água filtrada, sendo comparada com os parâmetros da Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017) que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão.

3.5.2.1 *Cor*

A cor aparente é um parâmetro regulado pela Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 e é limitado em 15 uH para a água, após ter sido tratada (BRASIL, 2017). Foi avaliada a água bruta e filtrada no FLB para saber a sua eficiência de remoção.

3.5.2.2 *Turbidez*

O valor para se atender a Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde quando utilizada a filtração lenta é dado quando, após a filtração os filtros produzam água em 95 % das amostras com turbidez de menor ou igual a uma unidade (1,0 uT) (BRASIL, 2017).

3.5.2.3 *Recuperação da Qualidade de Água após Limpeza do Material Filtrante*

O filtro foi lavado ao atingir a carga hidráulica máxima definida previamente (110 cm no fluxo descendente). Logo após a limpeza, o filtro era novamente colocado em operação. O filtro foi avaliado em termos de remoção de cor e turbidez.

O monitoramento foi realizado para determinar quando o filtro começa a produzir água com qualidade compatível ao consumo, em função dos parâmetros analisados. Ressalta-se que para o consumo humano a água ainda deve ser desinfetada conforme a Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017).

3.5.3 **Análise estatística**

Os dados foram avaliados por métodos estatísticos com o uso do *software* Microsoft® Excel®. Foram analisados os dados coletados para retirada de dados medidos de forma errônea, identificada devido à discrepância em relação à média do banco de dados.

Os dados foram reportados em tabelas, onde foram apresentadas as médias, mínimos e máximos. Foram confeccionados gráficos dos dados coletados da melhor forma que puderam ser representados.

4 RESULTADOS

4.1 ENSAIOS PARA CONFIRMAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DO MATERIAL FILTRANTE

4.1.1 Ensaio de Granulometria do Material Filtrante

Para confirmação do diâmetro efetivo (d_{10}) e coeficiente de uniformidade (c_u) dos grãos do material filtrante foram realizados ensaios de granulometria de acordo com a norma técnica NBR 7181: 1984 (ABNT, 1984).

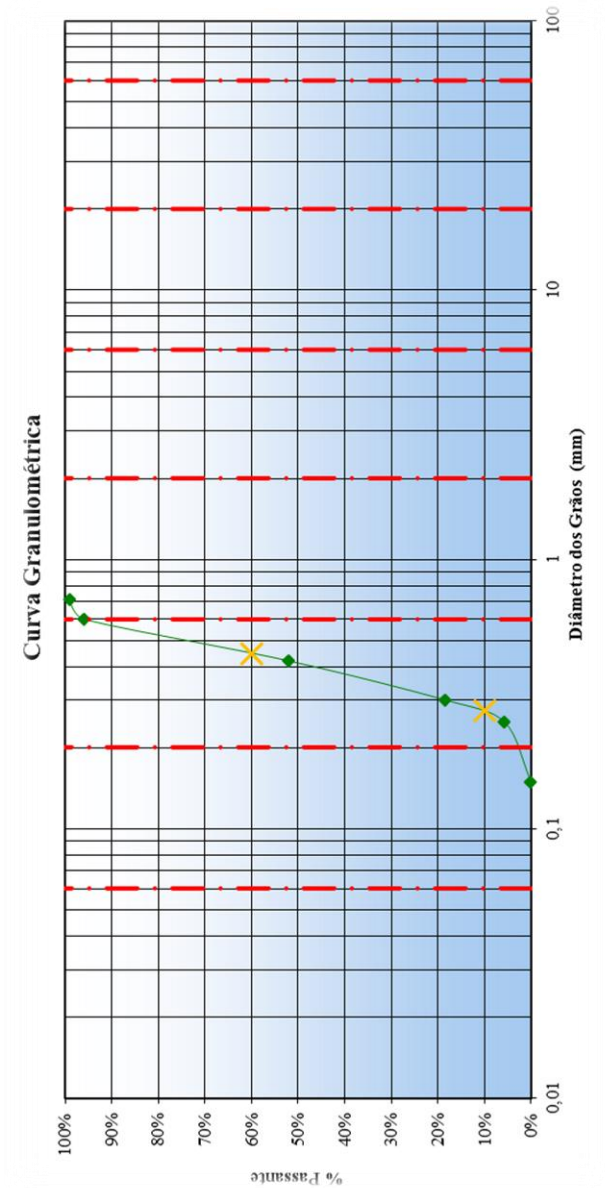
No gráfico apresentado (Figura 8) são apresentados resultados médios obtidos por três ensaios granulométricos realizados. Como observado, a distribuição granulométrica do meio filtrante é uniforme, dentro do previsto pelo projeto.

4.1.2 Ensaio de Expansão e Perda de Carga do Material Filtrante

Os ensaios de expansão foram realizados em um sistema no Laboratório de Águas da Lagoa do Peri (LALP). O sistema conta com uma câmara de carga que alimenta uma tubulação de acrílico onde se pode monitorar a expansão do material filtrante.

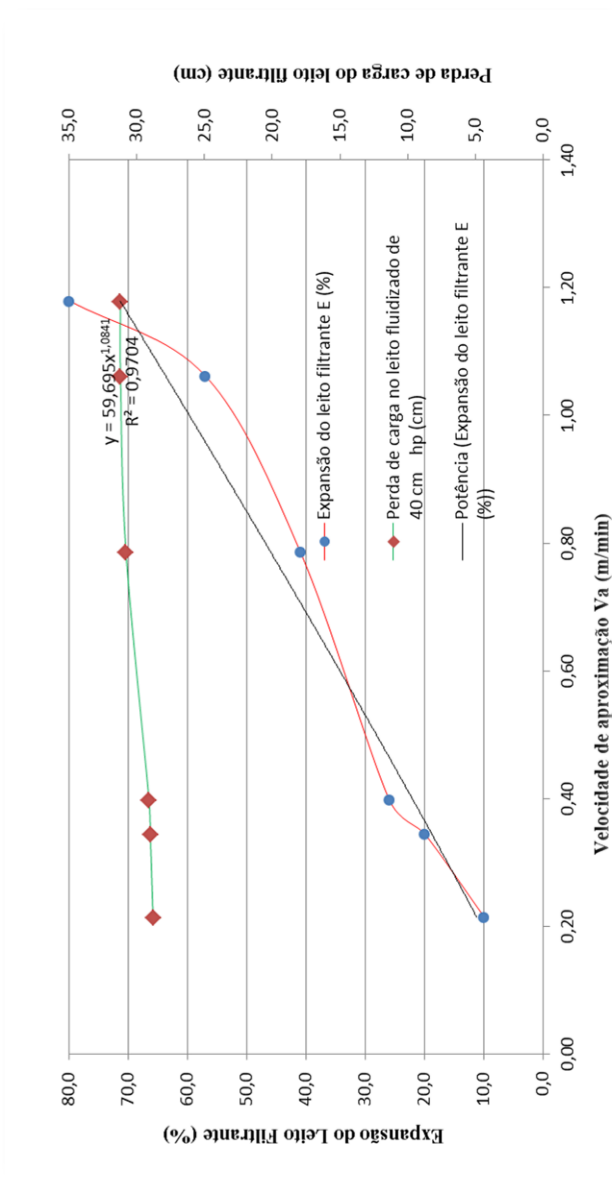
A partir das informações do ensaio (Figura 9), pôde-se verificar que a expansão do meio filtrante é proporcional à velocidade de aproximação aplicada, como esperado, e que a perda de carga praticamente não se altera nas velocidades ensaiadas, característica do meio filtrante completamente fluidificado (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Acredita-se que a variação na perda de carga seja devido às perdas nas paredes da coluna onde foram realizados os ensaios.

Figura 8 – Gráfico do resultado obtido pelo ensaio granulométrico



Fonte: do Autor.

Figura 9 – Gráfico do resultado obtido pelo ensaio expansão do material filtrante



Fonte: do Autor.

4.2 MONITORAMENTO DO FILTRO LENTO BIFLUXO

O filtro lento bifluxo foi operado e limpo de maneira variada. Na fase 1, nas carreiras 1, 3, 6, 7, 8 e 9, foram adotadas limpezas de retrolavagem associada à descarga de fundo com entrada de água na interface entre a camada suporte e meio filtrante, devido à perda de carga que a camada suporte também apresentava, conforme apresentado na Tabela 5.

O que determinou o momento da limpeza foi a definição do nível hidráulico máximo na camada filtrante do fluxo descendente fixado em 110 cm. Porém, até a carreira 7 e na 9, devido a alguns problemas na operação, como entupimento no orifício de alimentação do sistema, optou-se por realizar as limpezas antes da carga hidráulica atingir esse nível. O nível da carga hidráulica para a retrolavagem ainda não estava bem definido até a 7ª carreira, por isso houve uma variação nesses níveis no início da operação (Figura 10).

Com o passar do tempo ocorreu uma colmatação cada vez maior do meio filtrante e da camada suporte, dificultando a limpeza, havendo a necessidade de maior carga hidráulica na câmara de carga para uma limpeza eficiente.

Nas Figuras 10, 11 e 12 podem ser observadas as variações da carga hidráulica no filtro. Após iniciado o processo de filtração, a carga hidráulica no sistema aumenta e as carreiras passam a ocorrer em menos tempo. Após a 9ª retrolavagem, na carreira nº 9, o processo de limpeza do meio filtrante não se apresentava mais eficiente.

Por isso foi feito um ajuste no sistema de filtração, substituindo-se a tubulação que interliga a câmara de carga no filtro para diminuir as perdas de carga e a retrolavagem voltar a ser eficiente.

Nessa fase observam-se remoções significativas de turbidez, com valores acima de 80%, o que para a água de estudo representavam valores abaixo de 1,0 uT. Portanto, dentro do exigido pela Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017).

Pode-se verificar também (Figuras 10, 11 e 12) uma tendência de decaimento da eficiência das remoções de turbidez e cor logo após a realização das limpezas. Porém essa eficiência é retomada em poucas horas. Em torno de 7 horas para os parâmetros de turbidez e cor obterem valores próximos a 1,0 uT e 15 uH, respectivamente. O tempo médio das carreiras de filtração nessa fase foi de 10 dias.

Tabela 5 – Resumo das limpezas utilizadas – Fase 1

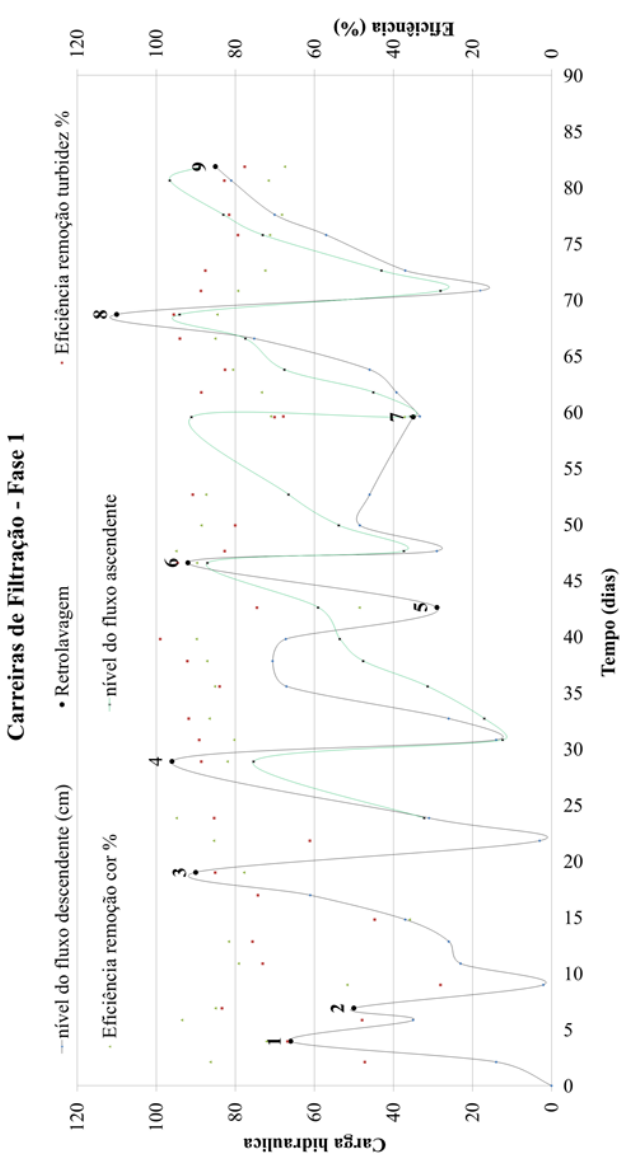
Tempo decorrido (dias)	Turbidez água bruta (uT)	Turbidez água filtrada (uT)	Eficiência remoção turbidez %	Cor água bruta		Cor água filtrada	Eficiência remoção cor %	nível do fluxo descendente (cm)	nível do fluxo ascendente	Tipo de Limpeza	n.º carreira	duração da carreira (dias)	Fase
				in medido	in medido								
0,00	7,76	12,00						0,00					FASE 0
2,10	7,12	3,76	47,19	87,00	12,00	86,21	72,03	14,00		R	1	3,95	
3,95	7,93	2,64	66,71	118,00	33,00	72,03	66,00	66,00					R
5,83	3,55	1,85	47,89	76,00	5,00	93,42	35,00	35,00			2	2,95	
6,90	7,07	1,18	83,31	93,00	14,00	84,95	50,00	2,00					LI + R
8,99	6,64	4,78	28,01	93,00	48,00	51,61	23,00	23,00			3	12,10	
10,88	7,20	1,94	73,06	91,00	19,00	79,12	26,00	26,00					R
12,85	7,05	1,72	75,60	87,00	16,00	81,61	37,00	37,00					
14,79	3,09	1,71	44,66	92,00	59,00	35,87	61,00	61,00					FASE 1
16,96	6,12	1,58	74,18	63,00	in medido	77,78	90,00	90,00					
19,00	7,55	1,13	85,03	99,00	22,00	85,37	3,00	3,00		R	4	9,89	
23,83	3,39	1,32	61,06	82,00	12,00	94,81	31,00	32,20					R
28,89	9,31	1,07	88,51	111,00	20,00	81,98	96,00	75,30					
30,80	7,21	0,79	89,04	86,00	17,00	80,23	14,00	12,30					R
32,69	8,74	0,72	91,76	111,00	15,00	86,49	26,00	17,00					
35,56	6,35	1,02	83,94	94,00	14,00	85,11	67,00	31,30			5	13,72	R
37,83	15,80	1,25	92,09	139,00	18,00	87,05	70,50	47,60					
39,78	5,77	0,06	98,96	78,00	8,00	89,74	67,20	53,50					LI + R
42,60	8,63	2,20	74,51	101,00	52,00	48,51	29,00	29,00			6	3,97	
46,57	14,80	0,80	94,59	116,00	12,00	89,66	92,00	87,00					LI + R
47,63	7,84	1,36	82,65	78,00	4,00	94,87	29,00	37,30					
49,92	5,95	1,19	80,00	96,00	11,00	88,54	48,50	53,80					LI + R
52,65	5,14	0,48	90,66	87,00	11,00	87,36	46,00	66,50					
59,55	6,33	1,90	69,98	86,00	54,00	37,21	35,00	91,00					LI + R
59,61	6,33	2,04	67,77	86,00	25,00	70,93	33,30	35,60					
61,76	8,36	0,96	88,52	86,00	23,00	73,26	39,20	45,00					LI + R
63,78	5,78	1,01	82,53	103,00	20,00	80,58	46,00	67,50			8	9,15	
66,55	8,39	0,51	93,92	87,00	13,00	85,06	75,20	77,40					LI + R
68,69	6,17	0,28	95,46	84,00	13,00	84,52	110,00	94,00					
70,82	7,02	0,80	88,60	87,00	18,00	79,31	18,00	28,00					LI + R
72,61	6,73	0,84	87,50	87,00	24,00	72,41	37,00	43,00					
75,78	6,17	1,28	79,25	80,00	23,00	71,25	57,00	73,00					LI + R
77,59	5,02	0,93	81,47	88,00	28,00	68,18	70,00	83,00					
80,63	6,19	1,07	82,71	88,00	25,00	71,59	81,00	96,50					LI + R
81,86	4,55	1,02	77,58	86,00	28,00	67,44	85,00	89,00					

R – Apenas Retrolavagem.

LI + R – Limpeza da camada suporte com descarga de fundo e entrada de água pela interface entre o meio filtrante e camada suporte seguido de retrolavagem.

Fonte: do Autor.

Figura 10 – Níveis de cargas hidráulicas dos fluxos descendente e ascendente e Eficiência do FLB – Fase 1



Fonte: do Autor.

Após a troca da tubulação de interligação entre a câmara de carga e o filtro, a retrolavagem apresentou-se mais eficiente.

Na fase 2 (Tabela 6), aumentou-se a taxa de filtração, obtendo-se um volume de água tratada ainda maior, com a mesma eficiência da 1ª fase. No entanto, o período de realização das limpezas diminuiu, ou seja, o tempo das carreiras de filtração tornou-se de menor duração, com tempo médio de três dias. Também foram obtidos bons resultados na remoção de turbidez e cor, com valores próximos a 80%.

Em alguns momentos o nível de carga hidráulica estava em 110 cm e não se realizou a limpeza, devido a algumas falhas na operação, conforme Figuras 11 e 12. O tempo da carreira de filtração foi admitido quando foi aferido que este nível estava em 110 cm. Porém, não houve redução na eficiência do sistema para os parâmetros de cor aparente e turbidez, mesmo operando alguns dias com essa carga hidráulica no fluxo descendente. O tempo médio das carreiras de filtração na fase 3 foi de 4 dias (Tabela 7).

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam resumos das limpezas utilizadas, a duração das carreiras de filtração, os níveis das cargas hidráulicas dos fluxos ascendente e descendente e a eficiência na operação do filtro em termos de turbidez e cor. Nas Figuras 10, 11 e 12 pode-se observar o comportamento das cargas hidráulicas dos fluxos ascendente e descendente. Também pôde-se verificar se houve perda na eficiência do filtro nos momentos em que as cargas estavam em nível alto e após as retrolavagens. Os momentos onde se encerram as carreiras de filtração, ou seja, onde as limpezas foram iniciadas, estão representadas nas figuras por círculos pretos e logo acima destes, o número de cada uma dessas limpezas.

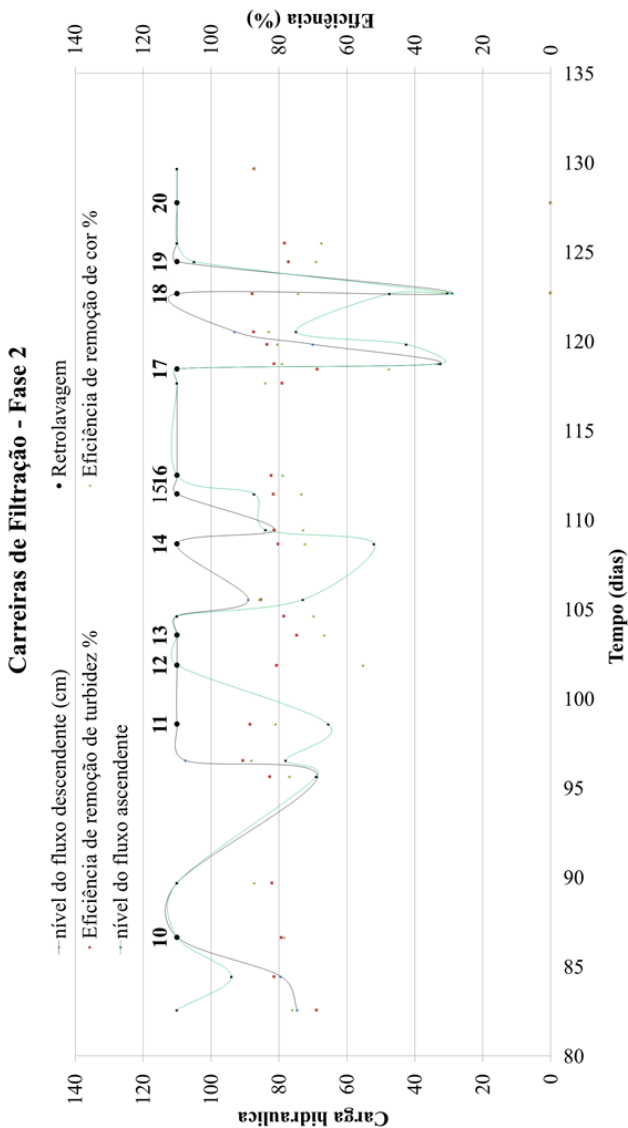
Tabela 6 – Resumo das limpezas utilizadas – Fase 2

Tempo decorrido (dias)	Turbidez água bruta (uT)	Turbidez água filtrada (uT)	Eficiência de remoção de turbidez %	Cor água bruta	Cor água filtrada	Eficiência de remoção de cor %	nível do fluxo descendente (cm)	nível do fluxo ascendente	Tipo de Limpeza	n.º carreira	duração da carreira (dias)
82,57	5,02	1,56	68,92	88,00	21,00	76,14	74,60	110,00			
84,44	4,68	0,87	81,41	in medido			79,50	94,00	R	10	4,77
86,63	4,16	0,86	79,33	42,00	9,00	78,57	110,00	110,00			
89,67	5,33	0,96	81,99	63,00	8,00	87,30	110,00	110,00			
95,63	4,44	0,77	82,66	65,00	15,00	76,92	68,70	69,00			
96,53	5,94	0,56	90,57	76,00	9,00	88,16	107,50	78,00	R	11	8,90
98,57	5,02	0,58	88,45	74,00	14,00	81,08	110,00	65,50			
101,86	6,19	1,20	80,61	76,00	34,00	55,26	110,00	110,00	R	12	3,29
103,55	3,92	0,99	74,74	63,00	21,00	66,67	110,00	110,00			
104,61	4,99	1,07	78,56	63,00	19,00	69,84	110,00	110,00	R	13	1,69
108,53	5,16	0,76	85,27	85,00	12,00	85,88	89,00	73,00			
108,65	4,10	0,81	80,24	69,00	19,00	72,46	110,00	52,00	R	14	4,04
109,44	5,42	1,01	81,37	74,00	20,00	72,97	81,20	83,90			
111,44	4,56	0,84	81,58	68,00	18,00	73,53	110,00	87,30	R	15	2,79
112,49	4,97	0,88	82,29	76,00	16,00	78,95	110,00	110,00			
117,65	5,02	1,05	79,08	50,00	8,00	84,00	110,00	110,00	R	16	1,04
118,44	4,15	1,30	68,67	65,00	34,00	47,69	110,00	110,00			
118,74	5,37	1,00	81,38	77,00	16,00	79,22	33,20	32,50	R	17	0,79
119,82	4,93	0,81	83,57	67,00	13,00	80,60	70,00	42,50			
120,53	5,41	0,68	87,43	83,00	14,00	83,13	93,00	75,00	R	18	4,21
122,65	10,30	1,25	87,86	129,00	33,00	74,42	110,00	47,50			
122,69	-	-	-	-	-	-	29,00	30,50			
124,44	4,07	0,93	77,15	68,00	21,00	69,12	110,00	105,00	R	19	1,79
125,49	4,43	0,96	78,33	74,00	24,00	67,57	110,00	110,00			
127,74	9,87	-	-	69,00	-	-	110,00	110,00	R	20	2,25
129,65	5,11	0,65	87,28	94,00	12,00	87,23	110,00	110,00			

R – Apenas Retrolavagem.

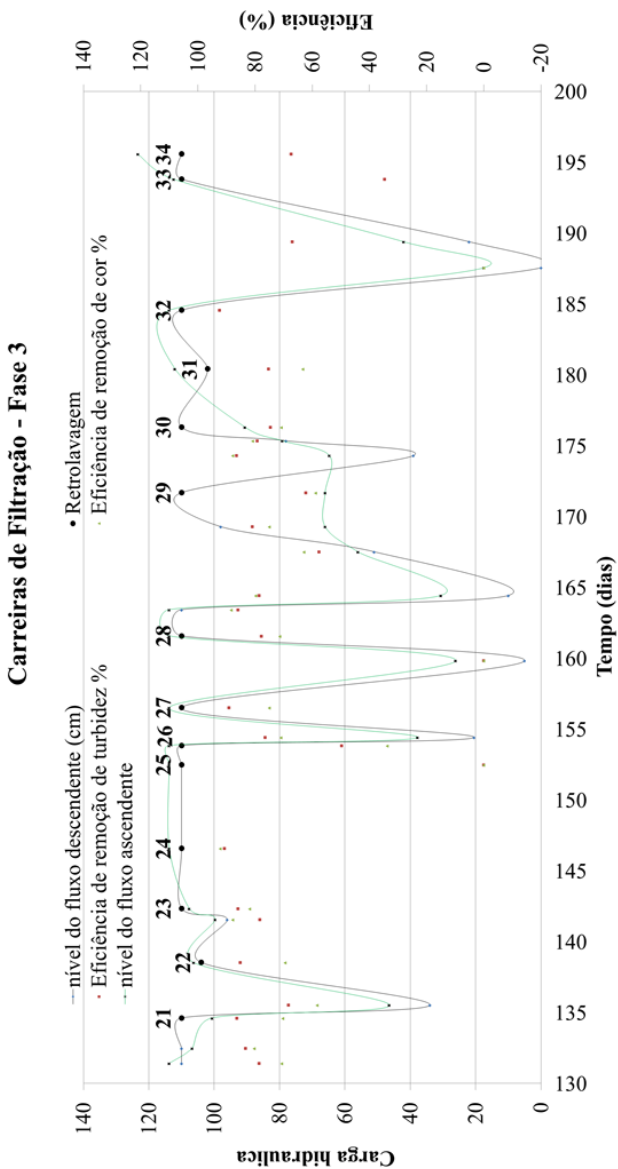
Fonte: do Autor.

Figura 11 – Níveis de cargas hidráulicas dos fluxos descendente e ascendente e Eficiência do FLB – Fase 2



Fonte: do Autor.

Figura 12 – Níveis de cargas hidráulicas dos fluxos descendente e ascendente e Eficiência do FLB – Fase 3



Fonte: do Autor.

Tabela 7 – Resumo das limpezas utilizadas – Fase 3

Tempo de corrido (dias)	Turbidez água bruta (uT)	Turbidez água filtrada (uT)	Eficiência de remoção de turbidez %	Cor água bruta	Cor água filtrada	Eficiência de remoção de cor %	nível do fluxo descendente (cm)	nível do fluxo ascendente	Tipo de Limpeza	n.º carreira	duração da carreira (dias)
131,40	8,02	1,72	78,55	109,00	32,00	70,64	110,00	110,00	R	21	1,75
132,49	4,92	0,82	83,33	71,00	14,00	80,28	110,00	102,00			
134,61	6,95	0,95	86,33	104,00	31,00	70,19	110,00	95,00			
135,53	4,73	1,50	68,29	79,00	33,00	58,23	34,00	33,00	R	22	3,29
138,53	11,90	1,77	85,13	131,00	40,00	69,47	104,00	101,50			
141,57	4,23	0,92	78,25	57,00	7,00	87,72	96,00	94,00	R	23	3,81
142,34	5,48	0,77	85,95	77,00	14,00	81,82	110,00	103,00			
146,57	11	1,03	90,64	101	8	92,08	110,00	110,00	R	24	4,23
152,47	6,2	-	-	77	-	-	110,00	110,00	R	25	5,90
153,84	6,02	3,03	49,67	77	51	33,77	110,00	110,00	R	26	1,38
154,42	4,53	1,07	76,38	72	21	70,83	20,50	23,20			
156,51	9,28	1,02	89,01	108	27	75,00	110,00	110,00	R	27	2,67
159,84	4,98	-	-	86	-	-	5,00	9,80			
161,57	4,59	1,02	77,78	66	19	71,21	110,00	110,00	R	28	5,06
163,42	5,34	0,75	85,96	68	8	88,24	110,00	110,00			
164,42	4,84	1,04	78,51	74	15	79,73	10,00	15,00			
167,51	4,19	1,78	57,52	78	29	62,82	51,00	44,00			
169,28	4,66	0,89	80,90	76	19	75,00	98,00	55,50	R	29	8,25
171,67	4,86	1,84	62,14	92	38	58,70	110,00	55,50			
174,30	4,85	0,66	86,39	90	11	87,78	39,00	54,00			
175,34	4,65	0,97	79,14	78	15	80,77	78,00	70,50	R	30	4,63
176,30	4,57	1,16	74,62	65	19	70,77	110,00	83,50			
180,42	4,61	1,14	75,27	68	25	63,24	102,00	108,00	R	31	4,13
184,55	16,2	1,23	92,41	-	-	-	110,00	110,00	R	32	4,13
187,55	-	-	-	-	-	-	-	-			
189,38	8,25	2,73	66,91	-	-	-	22,00	28,00	R	33	6,25
193,80	6,17	4,03	34,68	-	-	-	110,00	108,50			
195,57	4,49	1,47	67,26	-	-	-	110,00	121,00	R	34	1,77

R – Apenas Retrolavagem.

Fonte: do Autor.

4.2.1 Parâmetros operacionais

4.2.1.1 Perda de carga dos fluxos ascendente e descendente

Os níveis do fluxo descendente e, conseqüentemente, as perdas de carga desse, sempre estiveram acima dos níveis do fluxo ascendente, conforme Tabela 8 e Figuras 13, 14 e 15. O nível do fluxo descendente era o que determinava o momento da limpeza, ou seja, a retrolavagem.

Tabela 8 – Perdas de carga média, mínima e máxima, dos fluxos ascendente e descendente

	hp fluxo descendente	hp camada filtrante fluxo ascendente	hp camada Suporte fluxo ascendente	hp fluxo ascendente
Valores médios (cm) (min-máx.)	19 ((-7) - 97)	9 ((-28) - 46)	7 (0 - 47)	16 (0 - 68)

Fonte: do Autor.

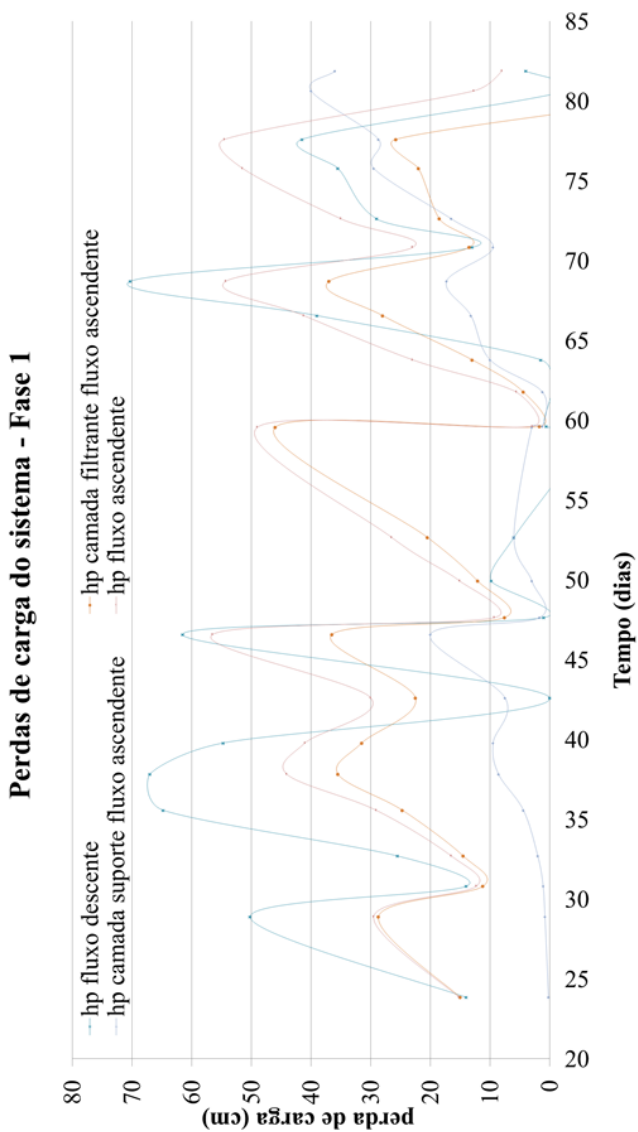
A perda de carga do meio filtrante do fluxo descendente é a subtração do nível de carga hidráulica acima da camada filtrante do fluxo descendente e o nível de carga hidráulica acima do bocal de coleta de água filtrada, medidos a partir de piezômetros. O valor médio da perda de carga da camada filtrante do fluxo descendente foi de 19 cm.

As perdas de carga só puderam ser obtidas após alguns dias de operação, pois os piezômetros do fluxo ascendente foram instalados depois do vigésimo primeiro dia de operação.

A perda de carga da camada filtrante do fluxo ascendente é a diferença entre o nível de carga hidráulica acima da parte superior da camada suporte, abaixo da camada filtrante do fluxo ascendente, e o nível de carga hidráulica acima do bocal de coleta de água filtrada. O valor médio foi de 9 cm de perda de carga.

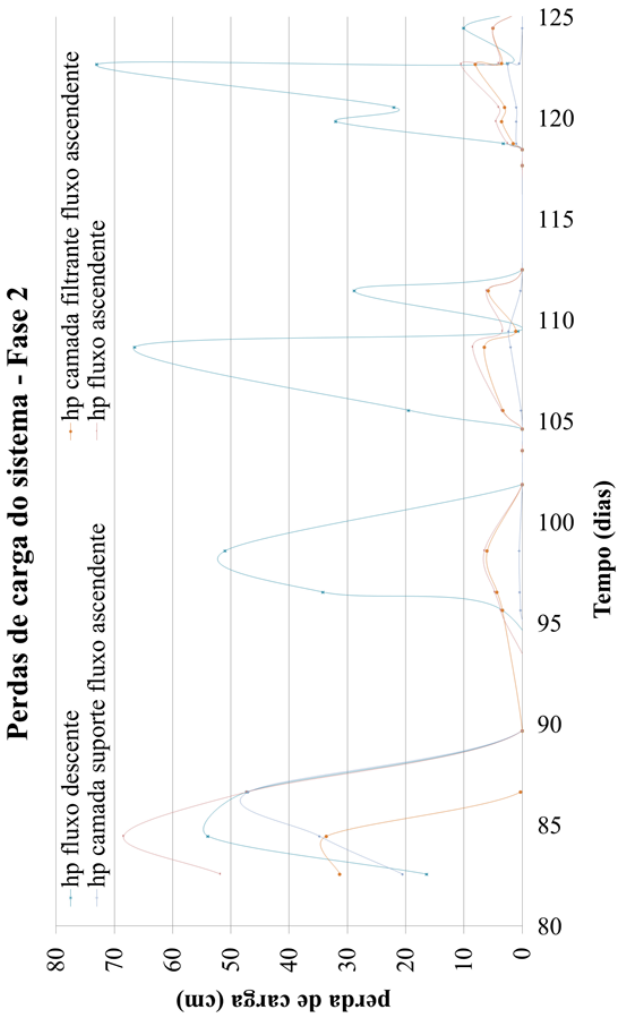
A perda de carga da camada suporte é a diferença entre o nível de carga hidráulica acima da camada suporte e nível de carga hidráulica abaixo dessa camada. A média da perda de carga da camada suporte foi de 7 cm.

Figura 13 – Perdas de carga dos fluxos ascendente e descendente do FLB – Fase 1



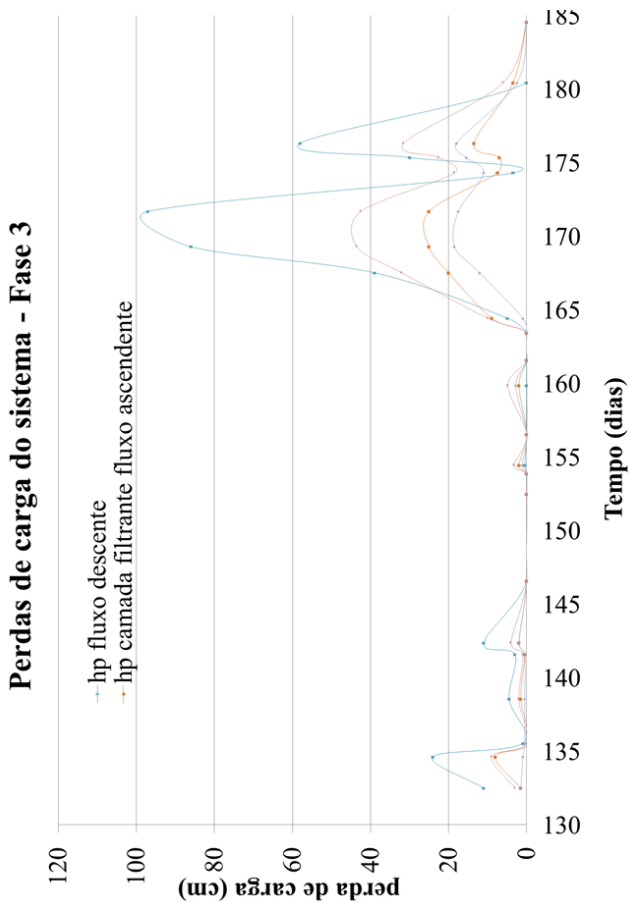
Fonte: do Autor.

Figura 14 – Perdas de carga dos fluxos ascendente e descendente do FLB – Fase 2.



Fonte: do Autor.

Figura 15 – Perdas de carga dos fluxos ascendente e descendente do FLB – Fase 3



Fonte: do Autor.

A perda de carga do fluxo ascendente, por sua vez, é a soma entre a perda de carga da camada filtrante do fluxo ascendente e a perda de carga da camada suporte. A média da perda de carga do fluxo ascendente era 16 cm, pouco abaixo ao valor da perda de carga do fluxo descendente.

Observa-se nas Figuras 13, 14 e 15 que, com o passar do tempo, as perdas de carga em relação ao bocal de saída de água filtrada diminuem com o amadurecimento do FLB.

As carreiras de filtração poderiam ser estendidas se fosse possível equilibrar os níveis do fluxo ascendente com o descendente. Estendendo as carreiras de filtração, diminui-se as operações com retrolavagem. Diminuindo as operações com retrolavagem, diminui-se o uso de água, uma economia quando é utilizada água filtrada para esse fim. Além disso, diminui-se a descarga de água com alto grau de matéria orgânica proveniente das limpezas do filtro quando utilizada a retrolavagem.

4.2.1.2 *Vazões e taxas de filtração no FLB*

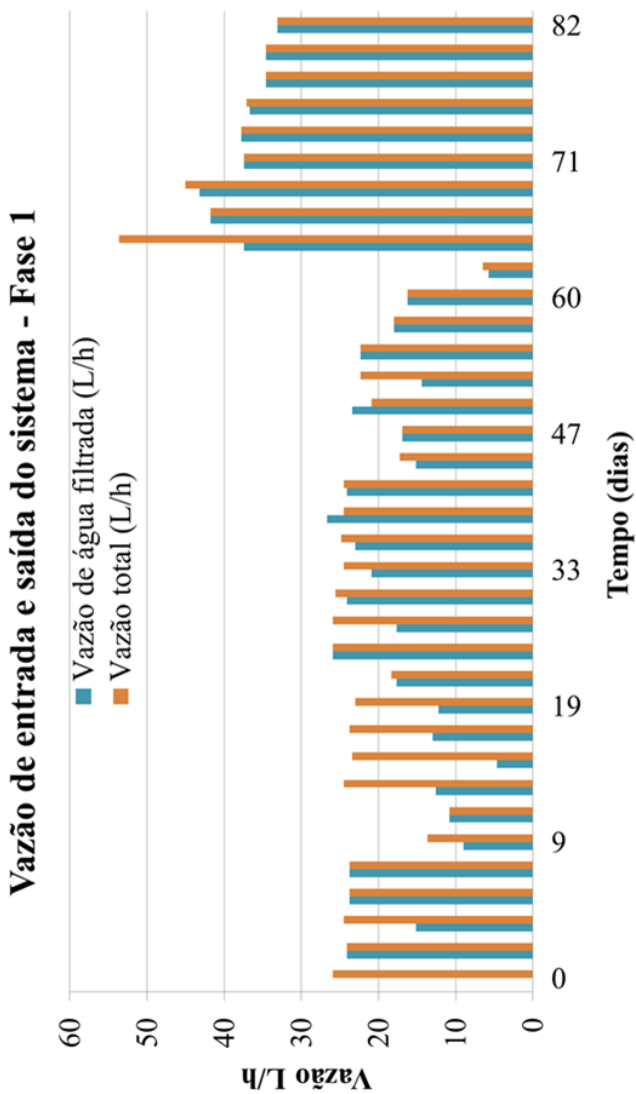
Pode-se observar nos gráficos das Figuras 16, 17 e 18, que as vazões de entrada e saída do sistema nem sempre permaneceram com os valores próximos.

Isso pode ter relação com a carga hidráulica do fluxo descendente que, a partir da evolução do seu nível, atingindo o extravasor, tem a vazão de saída da água filtrada diminuída.

No quarto dia de operação do filtro, pôde-se verificar uma queda na vazão de água filtrada, que fica em torno de 60% da vazão total de água bruta.

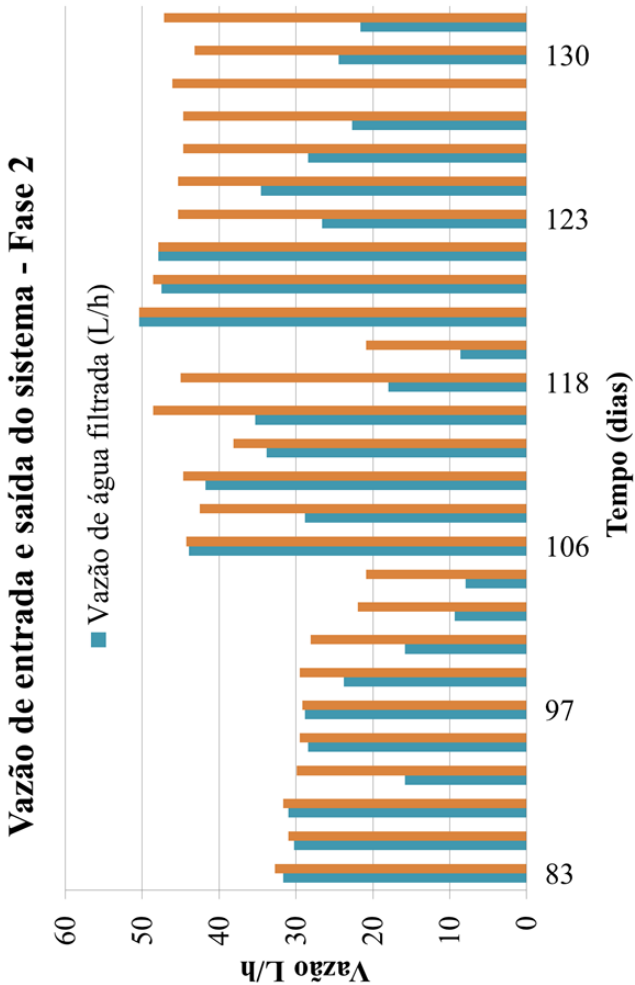
Do décimo terceiro ao décimo nono dia de operação houve queda na vazão novamente. Nesse período, o sistema ainda estava passando por ajustes. Aconteciam quedas de vazão no poço de chegada de água bruta da ETA da Lagoa do Peri, de onde era coletada água para abastecimento do sistema piloto. Mesmo o sistema piloto possuindo uma capacidade de reservação de água bruta, devido ao tempo de queda dessa vazão na ETA, o volume de água reservada não era suficiente. Nessa data acontece a terceira retrolavagem.

Figura 16 – Vazões de entrada e saída do Filtro – Fase 1



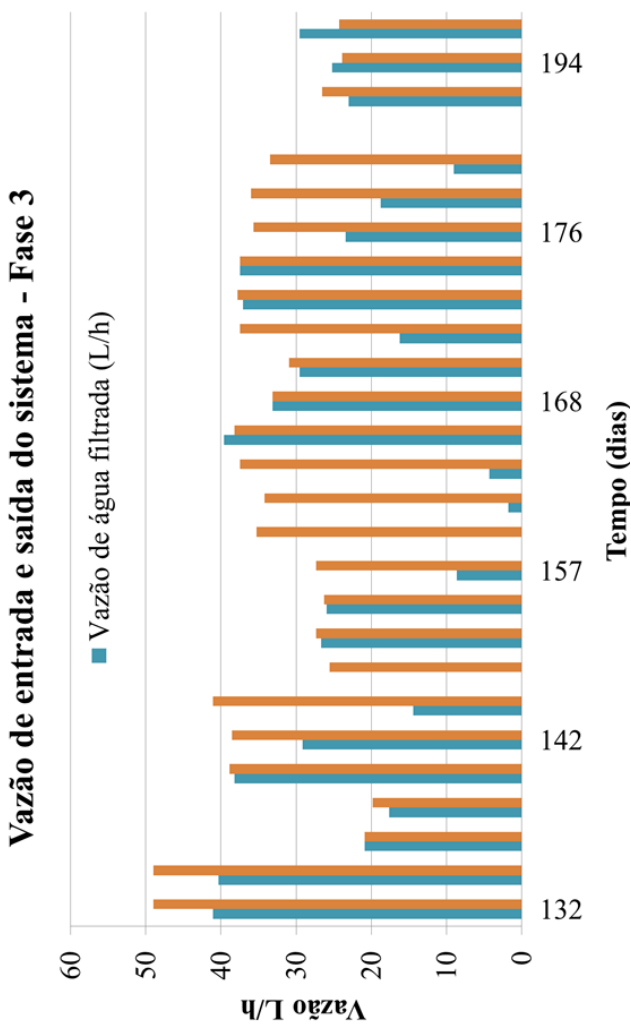
Fonte: do Autor.

Figura 17 – Vazões de entrada e saída do FLB – Fase 2



Fonte: do Autor.

Figura 18 – Vazões de entrada e saída do FLB – Fase 3



Fonte: do Autor.

Do vigésimo primeiro ao octogésimo sexto dia, as vazões de saída mantiveram-se, quase sempre, próximas da mesma de entrada do sistema. Com exceção do sexagésimo terceiro dia, na Figura 16 observa-se que a vazão de água filtrada se apresentava com 70% da vazão de entrada no sistema. O sistema estava se reestabelecendo nesse momento da operação, podendo ser observado pela retomada do crescimento da carga hidráulica (Figura 19).

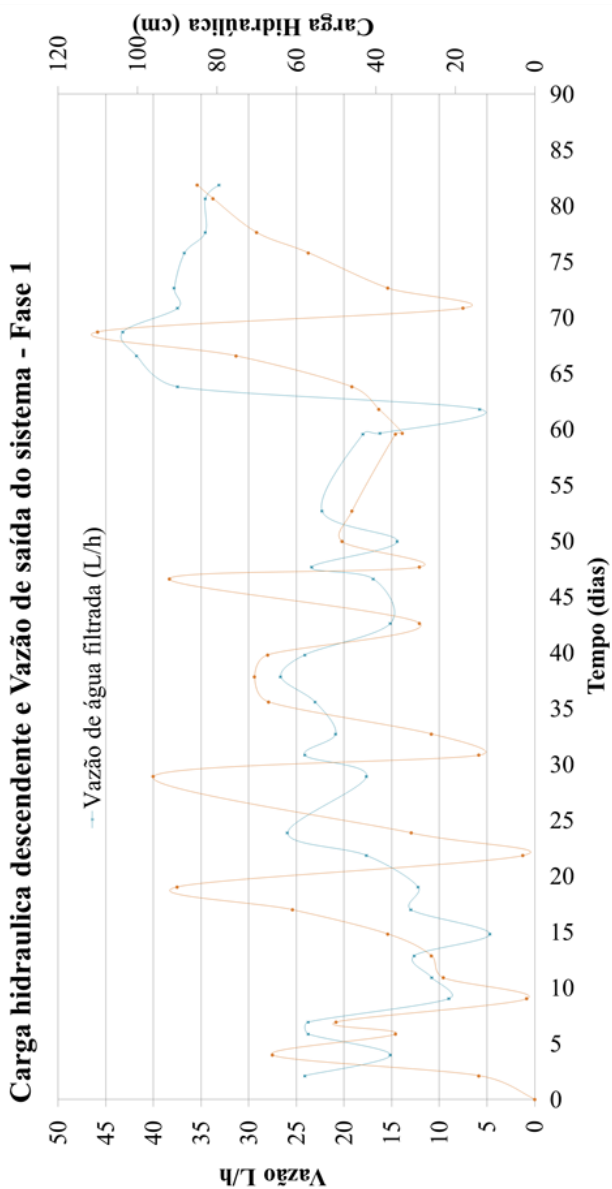
No octogésimo nono dia, baixou para 53% o percentual de vazão da água filtrada em relação a vazão de entrada do sistema.

No centésimo primeiro dia, segunda fase de operação do filtro, foi realizada a retrolavagem com a nova tubulação de ligação entre a câmara de carga e o filtro. As taxas de filtração estavam dentro do intervalo pré-definido, com variações de 3,30 a 4,16 m³/m²d no fluxo descendente e 3,79 a 5,38 m³/m²d no fluxo ascendente. Mesmo assim, houve baixa no percentual de vazão da água filtrada para 56%, declinando até 37% até o centésimo quarto dia, conforme Figura 17. Acredita-se que, devido ao acúmulo de material retido na camada filtrante na fase 1 da operação, as limpezas já não estavam sendo eficientes. Nessa data, foram realizadas três retrolavagens consecutivas com a intenção de desobstruir mais o meio filtrante. A carga hidráulica medida no centésimo quinto dia do nível do fluxo descendente era de 89 cm e a vazão de saída era 99% da vazão de entrada, o que indica que surtiu efeito as três limpezas realizadas (Figura 20). No entanto, o nível de carga hidráulica do nível descendente evoluía muito rápido e as carreiras permaneciam curtas.

Do centésimo oitavo ao último dia de medição as cargas hidráulicas se mantiveram no topo na maioria das vezes. Quando estas estão com 110 cm, no nível do extravasor, a parcela de água filtrada diminui o seu percentual. A parcela do volume de água que se refere a taxa de filtração descendente era perdida pelo extravasor. Consequentemente, a parcela que estava sendo filtrada em sua maioria era devido a taxa de filtração ascendente. Observa-se nas Figuras 19, 20 e 21 que, quando a carga hidráulica do fluxo descendente se encontrava abaixo de 110 cm, a vazão, e consequente a taxa de filtração da água filtrada, está quase sempre na sua totalidade. Ou seja, a soma das taxas ascendente e descendente e, quando não é 100%, encontra-se sempre muito próxima da taxa total de entrada.

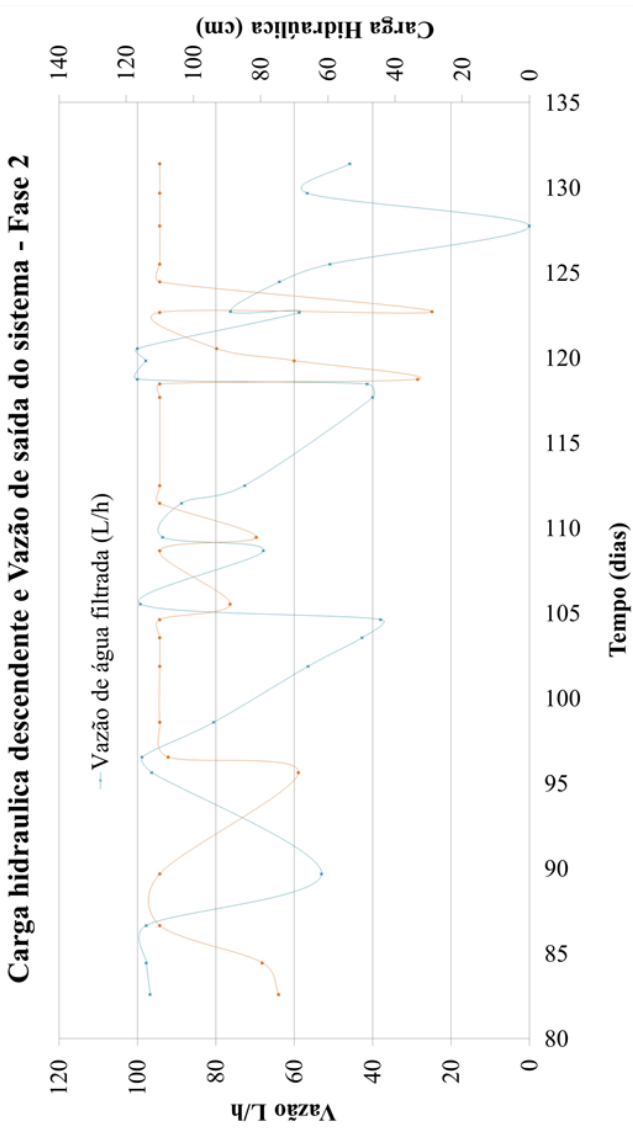
A média da vazão de entrada do sistema foi de 31,77 L/h e a de saída foi de 24,16 L/h. O percentual de vazão de saída do sistema em relação a de entrada é de 75%. Isso significa que, 75% do volume de entrada de água do sistema foi filtrada. A parte perdida foi nos momentos em que o filtro encontrava-se extravasando.

Figura 19 – Carga hidráulica do fluxo descendente e Vazão de saída do FLB – Fase 1.



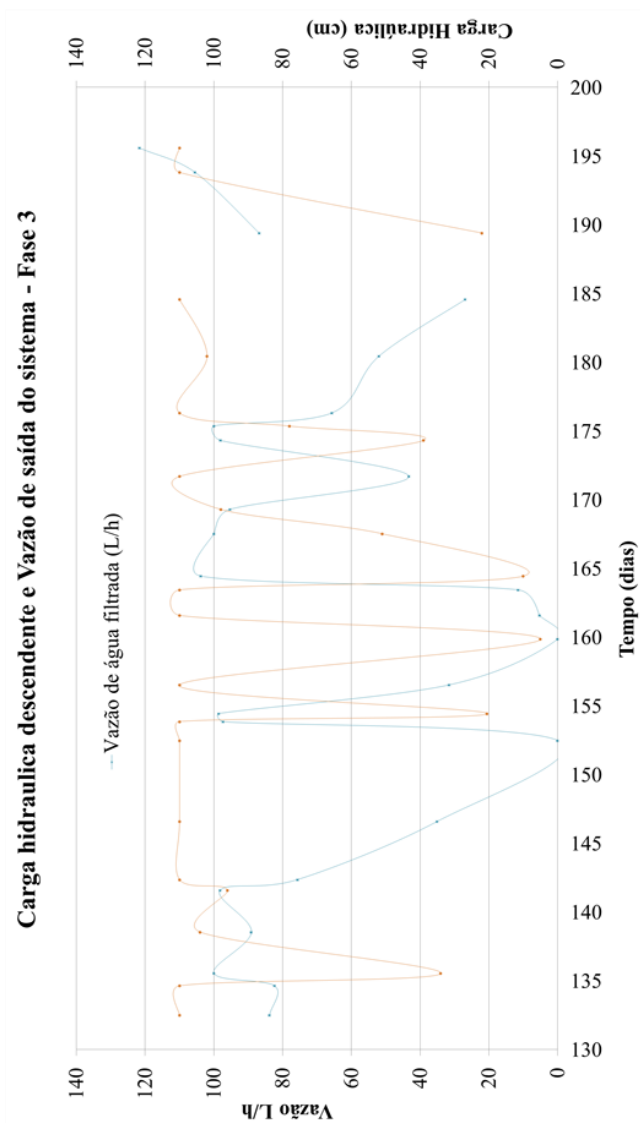
Fonte: do Autor.

Figura 20 – Carga hidráulica do fluxo descendente e Vazão de saída do FLB – Fase 2



Fonte: do Autor.

Figura 21 – Carga hidráulica do fluxo descendente e Vazão de saída do FLB – Fase 3



Fonte: do Autor.

Os gráficos das Figuras 19, 20 e 21 confirmam que a vazão de água filtrada apresenta relação inversamente proporcional ao crescimento da carga hidráulica do fluxo descendente.

4.2.1.3 *Eficiência da Limpeza da Camada Suporte*

Conforme apresentado na metodologia, a descarga de fundo com entrada de água na interface entre o meio filtrante e camada suporte foi prevista, pois propicia a limpeza da camada suporte. A limpeza do meio suporte foi sugerida na pesquisa de De Souza (2015), garantindo que a retrolavagem acontecesse de forma satisfatória. Essas descargas aconteceram apenas na Fase 1. Na Fase 2 foi eliminada, pois a retrolavagem promovia a limpeza da camada suporte juntamente com a do meio filtrante.

Foram realizadas apenas 5 limpezas da camada suporte com descarga de fundo pela entrada de água na interface entre o meio filtrante e essa camada, todas seguidas de retrolavagem. Foram realizadas nas limpezas 3, 6, 7, 8, 9, conforme apresentado na Tabela 5.

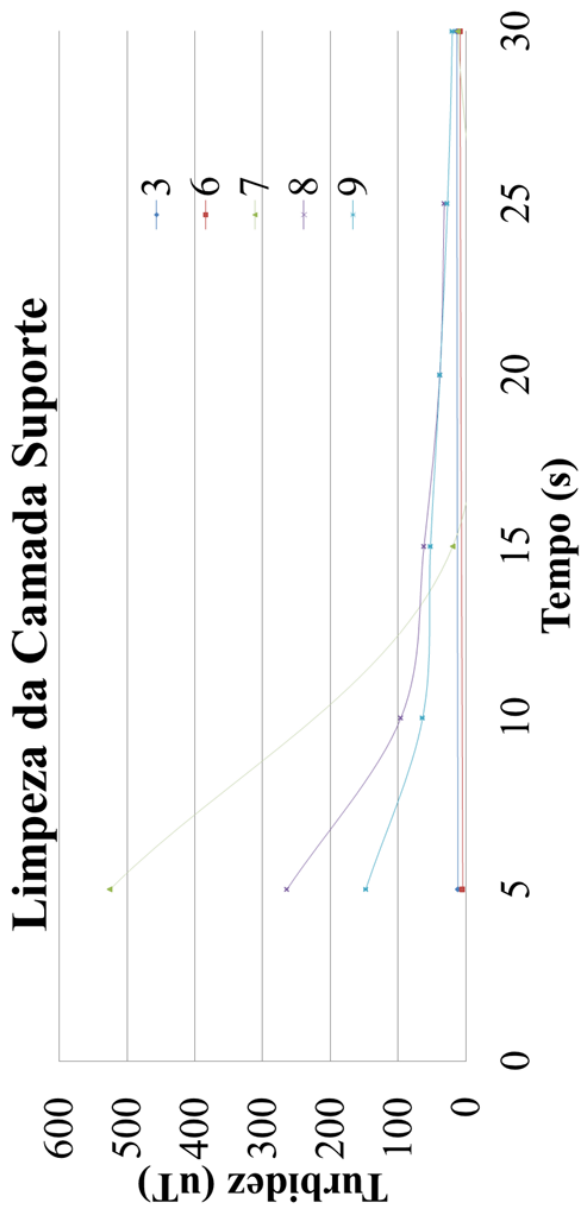
Na Figura 22 estão representados os dados dos monitoramentos da turbidez da água de saída pela descarga de fundo. Pode ser observado que a turbidez estabiliza já aos primeiros 30 s. Nas limpezas 3 e 6, esse procedimento não apresentou resultados satisfatórios. Por sua vez, as limpezas 7, 8 e 9 resultaram em altos valores de turbidez nessa operação.

4.2.1.4 *Eficiência da Retrolavagem*

Nas limpezas, foram utilizadas retrolavagem associada com descarga de fundo com entrada de água na interface entre a camada suporte e o meio filtrante ou apenas a retrolavagem.

Os procedimentos de limpeza na Fase 1, promoveram a remoção do material retido no FLB, como esperado, porém, com menor intensidade. A tubulação de interligação entre a câmara de carga e o filtro inicialmente era de 20mm, apresentando muita perda de carga. Por isso, no início da operação, na maioria das carreiras, a limpeza foi associada para resultar numa eficiência maior.

Figura 22 – Turbidez da água de saída da limpeza da camada suporte



Fonte: do Autor.

Nesses procedimentos podemos observar a diferença entre as fases. Nas limpezas da Fase 1 o processo demonstrou-se muito demorado comparado ao que era previsto inicialmente (4 min). Devido à perda de carga da tubulação, houve necessidade de 10 min para o escoamento de toda a água acima da câmara de carga,. A cada limpeza, menos água passava pelo meio filtrante devido a colmatação cada vez maior do FLB.

Nas Fases 2 e 3 o tempo passa a ser menos da metade, 4,5 min. Isso, resulta em maior vazão, conseqüentemente, maior velocidade de aproximação. Por isso, observa-se distinção entre as velocidades de aproximação das Fases 1, 2 e 3 na operação do sistema (Figura 23).

Previamente o FLB fora dimensionado para expandir 25% da espessura da camada filtrante. No entanto, foi lavado com menores velocidades de aproximação devido às perdas de carga da tubulação de interligação entre a câmara de carga e o filtro. Outra contribuição para a diminuição da velocidade de aproximação é o menor volume da câmara de carga. Desta forma, as expansões médias foram de 4,5% na fase 1, 10% na fase 2 e 13% na Fase 3. Foram aplicadas as velocidades de aproximação de 0,09, 0,20 e 0,28 m/min, para as Fases 1, 2 e 3 respectivamente.

A fórmula da curva da expansão do meio filtrante, em percentual da espessura do meio filtrante, em função da velocidade de aproximação é descrita pela equação 3:

Equação (3)

$$E=59,695 \times V_a^{1,0841}, \text{ onde}$$

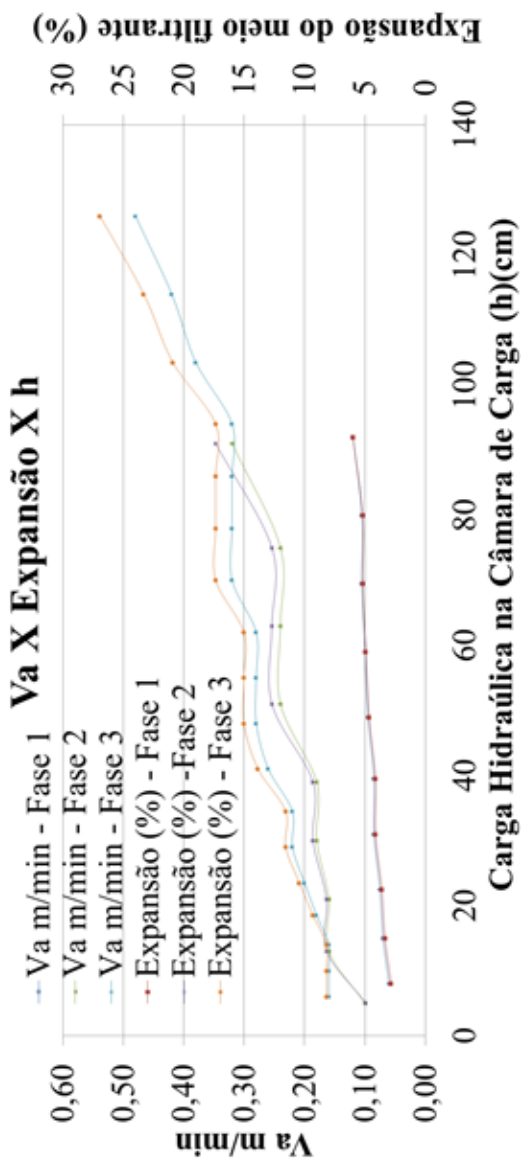
E – Percentual de expansão em relação a espessura da camada filtrante, medido em por cento (%);

V_a – Velocidade de aproximação da água proveniente da câmara de carga.

No entanto, no início da retrolavagem a câmara de carga está com nível máximo, resultando nas velocidades de aproximação e expansões máximas. Na Fase 1, a velocidade de aproximação máxima chega a 0,13 m/min, resultando em expansões na ordem de 6%, onde as cargas hidráulicas da câmara de carga estão próximas a 90 cm, conforme Figura 23.

Já na Fase 2, a Figura 23 mostra que a velocidade de aproximação máxima foi de 0,32 m/min, chegando a expansões do meio filtrante na grandeza de 15%.

Figura 23 – Velocidade de aproximação e expansão do leito filtrante em função da carga hidráulica da câmara de carga



Fonte: do Autor.

Na Fase 3, a velocidade de aproximação máxima foi de 0,48 m/min, resultando numa expansão do meio filtrante de 23% (Figura 23).

Durante a operação do sistema, o FLB foi avaliado em função da eficiência da retrolavagem. As Figuras 24, 25 e 26 apresentam os dados da evolução da turbidez durante a retrolavagem nas três fases analisadas.

Quanto maior é a velocidade de aproximação empregada, mais rápido ocorre o pico de turbidez. Quando esse parâmetro se torna constante é o momento em que limpeza poderia ser finalizada. No entanto, conforme observado nas Figuras 24, 25 e 26 a turbidez encontrava-se alta ainda no final da limpeza. Isso ocorre porque o volume da câmara de carga é insuficiente. A limpeza poderia ser melhorada aumentando-se o volume ou o nível da câmara de carga, reproduzindo expansões de 25% em média.

O método de limpeza, para a granulometria da areia analisada, produziu água com turbidez próxima de 2 uT antes de 8 horas de filtração. Esse comportamento é bem aproximado ao observado nos filtros lentos de Pizzolatti (2014).

Na primeira retrolavagem da Fase 2, observam-se valores bastante altos de turbidez, ultrapassando 500 uT. Devido a falta de eficiência na retrolavagem na fase anterior houve muito acúmulo de material retido. Nas retrolavagens seguintes os valores se mantiveram altos, mas diminuem com o passar do tempo, limpando novamente o meio filtrante.

Em duas limpezas, foram realizadas 3 retrolavagens na tentativa de aumentar o tempo da carreira de filtração, pois a turbidez permanecia alta, mesmo realizando as limpezas. Porém, isso não surtiu efeito e as carreiras permaneceram curtas.

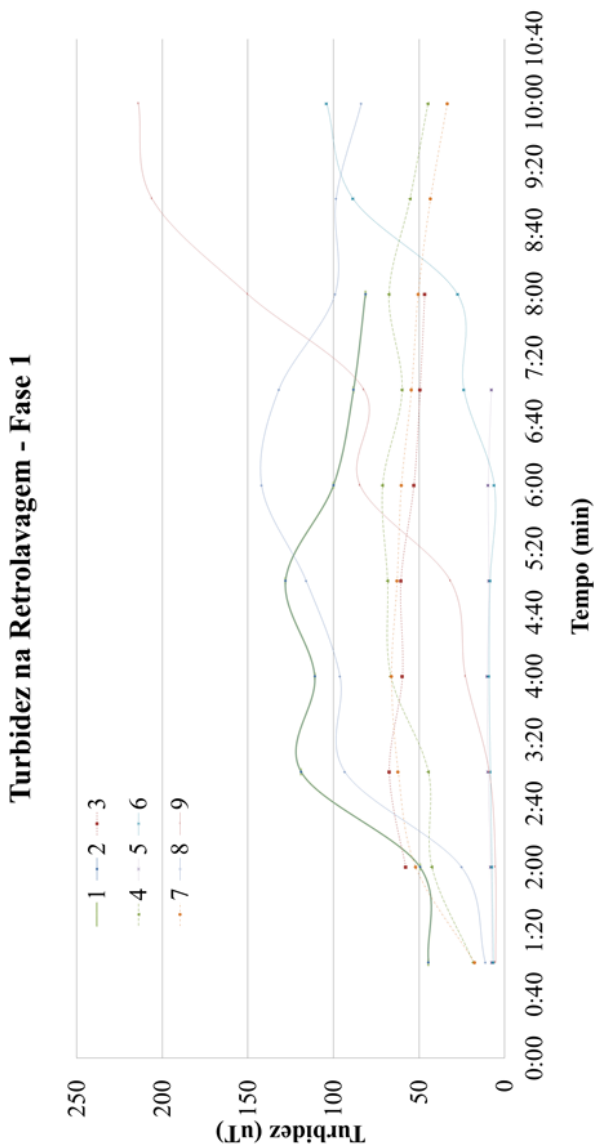
Na Fase 3, na câmara de carga, a água atingiu níveis maiores, com a extensão do tubo de 300 mm que a compõe. Isso propiciou mais volume de água passando no mesmo tempo, para expansão do meio filtrante, melhorando ainda mais a eficiência na retrolavagem.

4.2.1.5 *Viabilização da retirada do bocal para limpeza*

Foi elaborado um sistema que viabilizasse a retirada do bocal para a limpeza dos grãos de granulometria fina da camada filtrante que pudesse impedir a passagem de água, fazendo com que o filtro perdesse eficiência na capacidade volumétrica de tratamento de água.

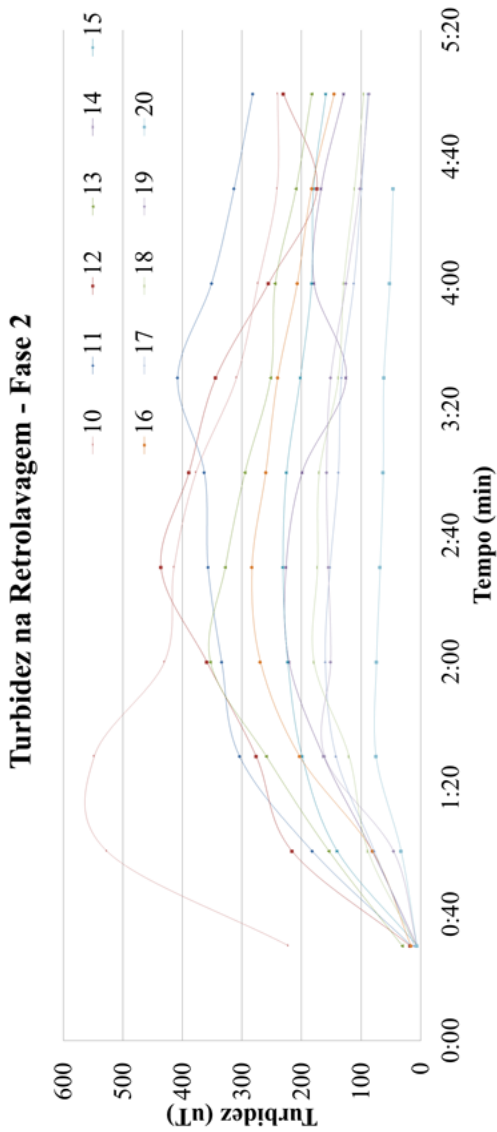
Em alguns momentos o filtro perde vazão na saída de água tratada, porém não pode-se afirmar que foi devido à colmatação do dreno promovida pelos grãos da camada filtrante.

Figura 24 – Turbidez da água de saída da retrolavagem – Fase 1.



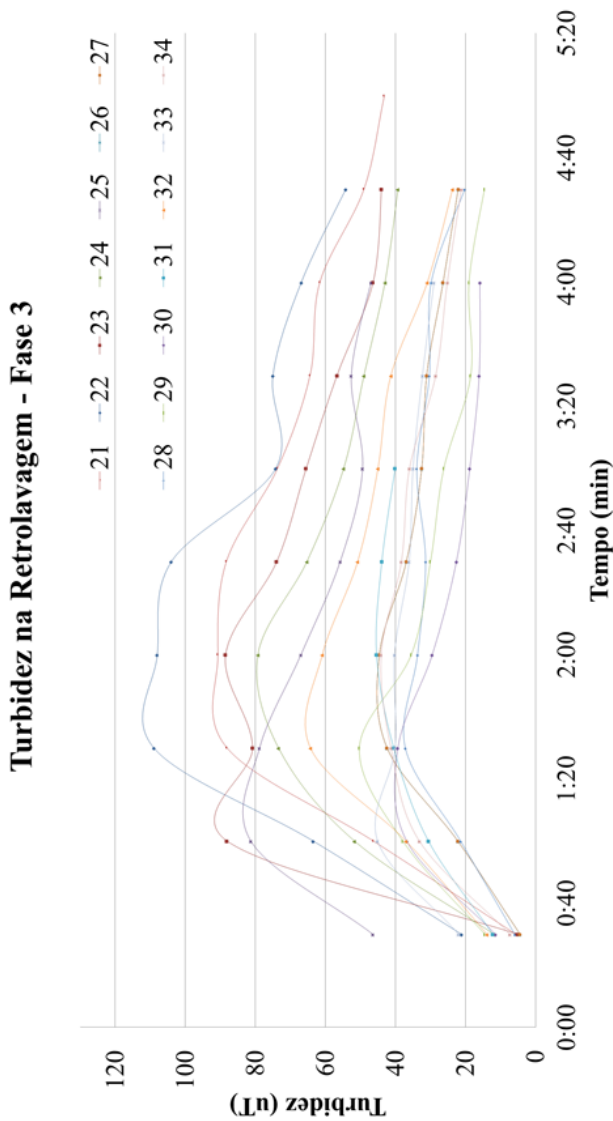
Fonte: do Autor.

Figura 25 – Turbidez da água de saída da retrolavagem – Fase 2.



Fonte: do Autor.

Figura 26 – Turbidez da água de saída da retrolavagem – Fase 3.



Fonte: do Autor.

Na Figura 27, a foto apresenta o momento de retirada do bocal no momento em que se realizava um procedimento de retrolavagem. Com a camada filtrante expandida era possível suspender o bocal, girar o eixo dos anéis que a compõem e proceder a limpeza destes pela injeção de água utilizando mangueira.

Figura 27 – Foto do momento de retirada do bocal



Fonte: do Autor.

4.2.2 Parâmetros de qualidade da água filtrada

A água filtrada foi comparada com os parâmetros de cor e turbidez da Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde. Essa portaria dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos válidos durante a filtração.

Tabela 9 – Qualidade da água (médias, min e máx.)

Parâmetro	Água Bruta	Água filtrada FLB	Eficiência (%)	Padrão de Potabilidade
Cor aparente (uH)	84 (42-139)	21 (4-59)	76 (34-95)	15
Cor verdadeira (uH)	12 (3-32)	11 (0-21)	24 (0-100)	-
Turbidez (uT)	6,34 (3,1-16,2)	1,39 (0,1-12)	79 (28-99)	1

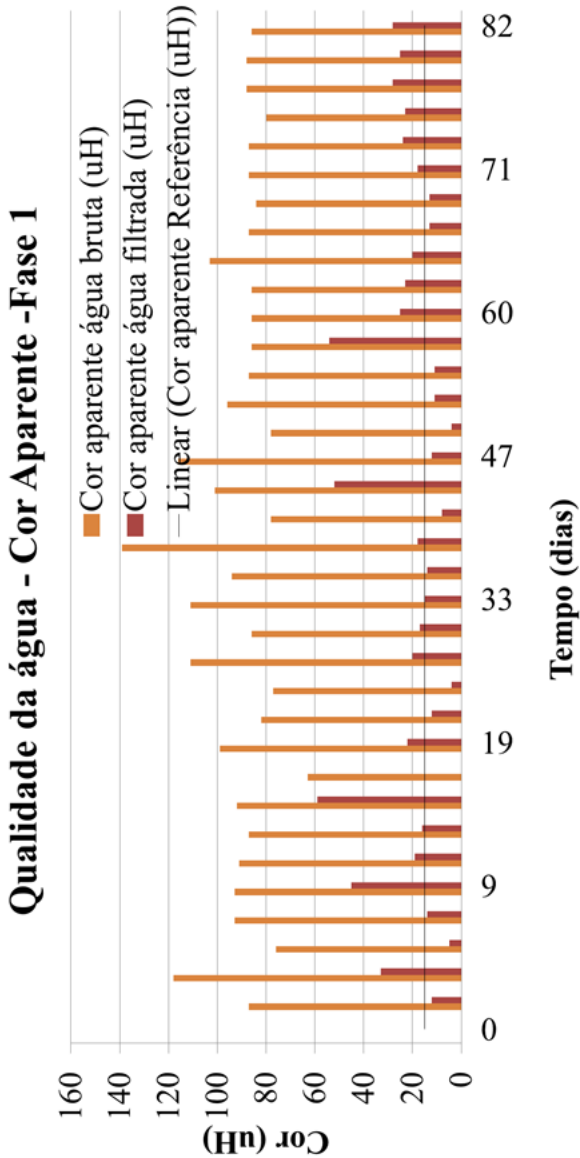
Fonte: do Autor.

4.2.2.1 Remoção de Cor

A cor aparente é um parâmetro limitado pela Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde em 15 uH (BRASIL, 2017). Durante o tempo de monitoramento, a cor aparente da água bruta variou de 42 a 139 uH, conforme Figuras 28, 29 e 30. O FLB, após a filtração, produziu água com valores abaixo do valor máximo permitido na legislação em 41% das amostras coletadas.

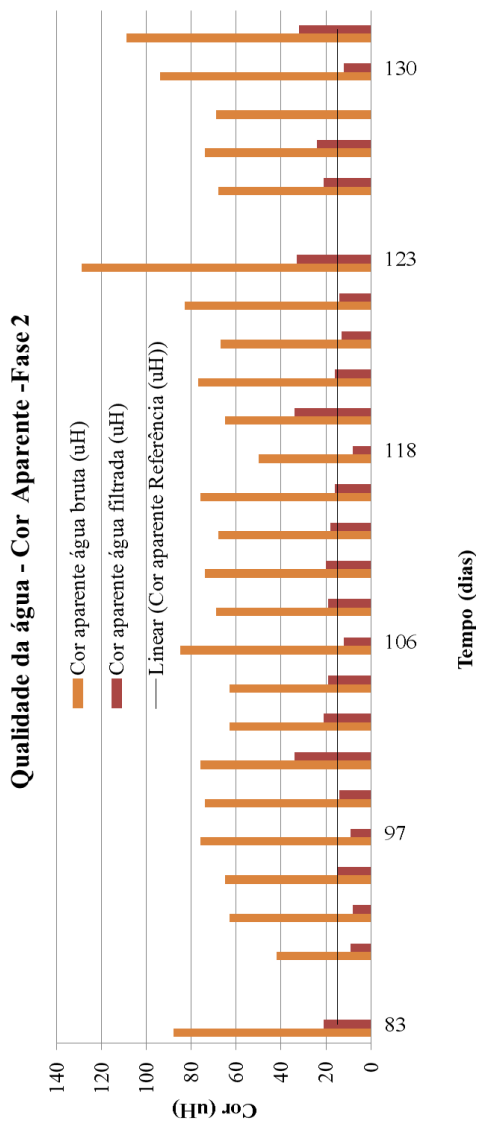
Pizzolatti (2014) realizou um experimento com Filtro Lento Convencional (FLC), com limpeza por raspagem, Filtro Lento Retrolavável (FLR), com limpeza por retrolavagem com água filtrada e Filtro Lento Retrolavável (FLRb), com limpeza por retrolavagem com água bruta. A cor aparente da água bruta variou de 54 a 135 uH, e, após a filtração, o FLC produziu água com valores abaixo do valor máximo permitido na legislação em 48% das amostras coletadas. O FLR apresentou o pior desempenho com relação a esse parâmetro, alcançando o valor preconizado em 8% das amostras de água filtrada, seguido do filtro FLRb que produziu água de acordo com a legislação em 22% das amostras.

Figura 28 – Monitoramento da cor aparente – Fase 1.



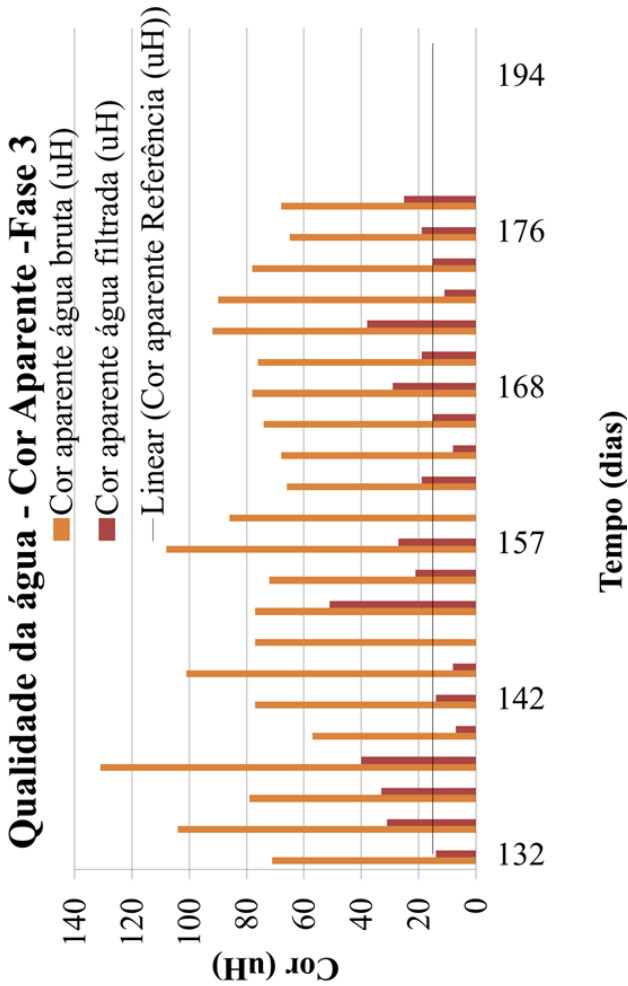
Fonte: do Autor.

Figura 29 – Monitoramento da cor aparente – Fase 2



Fonte: do Autor.

Figura 30 – Monitoramento da cor aparente – Fase 3



Fonte: do Autor.

Os filtros lentos do experimento de Pizzolatti (2014), apresentaram eficiência alta com relação a cor aparente, alcançando valores de 76, 68 e 70% de remoção nos filtros FLC, FLR e FLRb respectivamente. Murtha e Heller (2003) observaram eficiência de remoção de cor aparente variando de 28 a 41%, todos em filtros lentos convencionais, portanto, bem inferiores aos da pesquisa de Pizzolatti (2014) e aos obtidos na pesquisa com FLB.

Pizzolatti (2014) já havia sugerido que a elevada eficiência alcançada é devido a cor do manancial, que em grande parte é proveniente de material suspenso, mensurado através da turbidez. A filtração lenta tem alta capacidade de retenção de partículas. A Figura 18 apresenta o desempenho do filtro.

A cor verdadeira da água filtrada do FLB ficou em 70% das amostras, inferior a 14 uH. De acordo com Pizzolatti (2014) a importância desse parâmetro está associada à presença de ácidos húmicos e fúlvicos (fração hidrofóbica). Isso pode ser um problema em potencial na etapa de cloração, pois podem gerar subprodutos, como os trihalometanos, que são compostos potencialmente cancerígenos. Já a parte hidrofílica tem maior relação a produção de ácidos haloacéticos após a cloração (KIM; YU, 2005).

A cor verdadeira no experimento de Pizzolatti (2014) apresentou remoção entre 97% (FLRb) e 100% (FLC e FLR) das amostras, inferior a 14 uH. Nesse parâmetro o FLB apresentou percentuais inferiores aos filtros de Pizzolatti (2014), não apresentando boa remoção para a remoção de cor verdadeira.

Cleasby (1991) explica que devido a filtração lenta não ser o tratamento ideal para a cor verdadeira, o limite no manancial deve ser em torno de 5 a 10 uH. No manancial de estudo desta pesquisa, a cor verdadeira atingiu valor máximo de 21 uH e em 46% das amostras o valor ficou igual ou abaixo de 10 uH, portanto em desacordo com a recomendação apresentada por Cleasby (1991).

Huisman (2004) coloca que a eficiência de remoção de cor verdadeira com a utilização da filtração lenta, quando relacionada a ácidos húmicos, é baixa. Cleasby (1991) afirma que a eficiência pode ser de até 25%. No filtro estudado, a remoção média de cor verdadeira ficou em média 24% para o FLB, confirmando a informação de Cleasby (1991). Para a remoção efetiva deste parâmetro seria necessária, por exemplo, a coagulação química (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999).

Houve pouca diferença entre a cor verdadeira da água bruta e da água filtrada no FLB, sendo assim, constata-se que houve baixa remoção de cor verdadeira nesse estudo, diferentemente da cor aparente em que se

apresentou boa remoção. Os valores de cor verdadeira e aparente da água filtrada são bem próximos, demonstrando que a maior parte a cor removida está relacionada à turbidez da água.

4.2.2.2 Remoção de Turbidez

A qualidade da água bruta durante o monitoramento apresentou média de 6,34 uT para valores de turbidez. A variação de turbidez dessa foi de 3,09 a 16,20 uT, sendo observado 98% das amostras com turbidez menor que 15 uT e 93% menor que 10 uT, valores não aceitáveis para a utilização da filtração lenta, conforme Di Bernardo e Dantas (2005) e Cleasby (1991).

No estudo de Pizzolatti a variação de turbidez da água bruta durante o monitoramento foi de 3,55 a 13,50 uT, sendo observado 100% das amostras com turbidez menor que 15 uT e 95% menor que 10 uT.

A variação de turbidez da água bruta na pesquisa do FLB teve um intervalo bem próximo ao do estudo realizado por Pizzolatti (2014).

Apenas 35% das amostras apresentaram valor abaixo de 5 uT (Tabela 10), quando segundo Cleasby (1991), o recomendável seria esse valor em 90% das amostras. No experimento de Pizzolatti (2014), apenas 31% das amostras apresentaram valor abaixo de 5 uT.

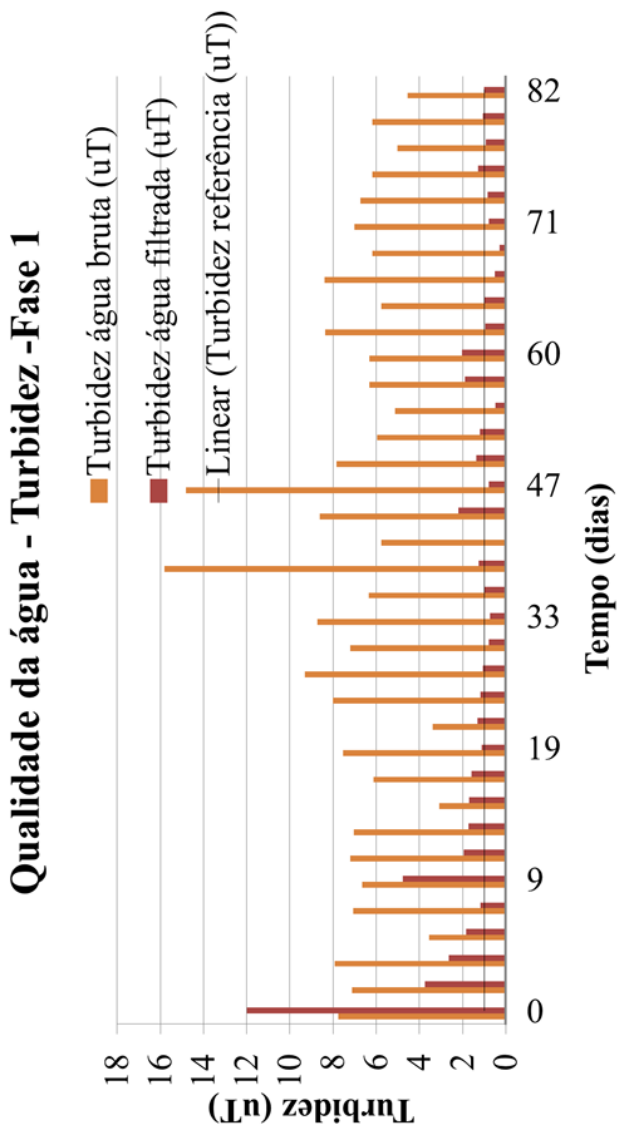
Tabela 10 – Qualidade da água Turbidez

Turbidez de água bruta recomendada por Di Bernardo Dantas (2005) e Cleasby (1991)	Percentual das amostras Turbidez da água bruta (%) utilizada nesta pesquisa
<15 (100%)	98
<10 (95%)	93
<5 (90%)	35

Fonte: do Autor.

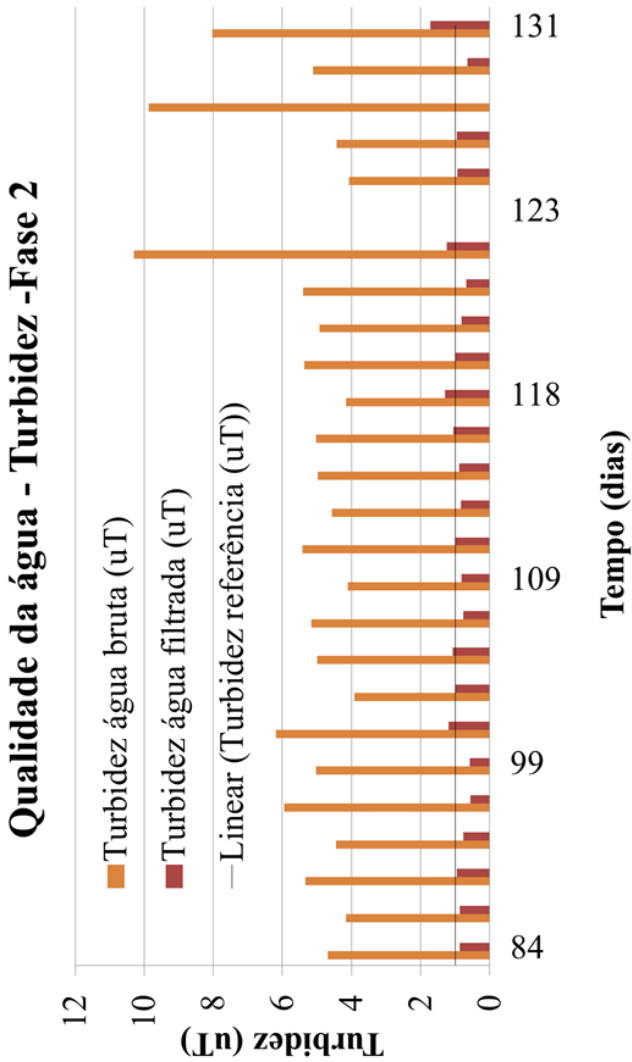
O FLB apresentou valores satisfatórios em termos de remoção de Turbidez (Figuras 31, 32 e 33). A remoção foi em média 78%. A média do valor de turbidez foi pouco acima do valor máximo permitido pela legislação brasileira, que é de 1 uT, apresentando média de 1,39 uT. Considerando a qualidade da água em estudo, o FLB apresentou turbidez média próxima a 1 uT durante o tempo de monitoramento, demonstrando boa capacidade de remoção de turbidez, mesmo em desacordo com a legislação,.

Figura 31 – Monitoramento da Turbidez – Fase 1



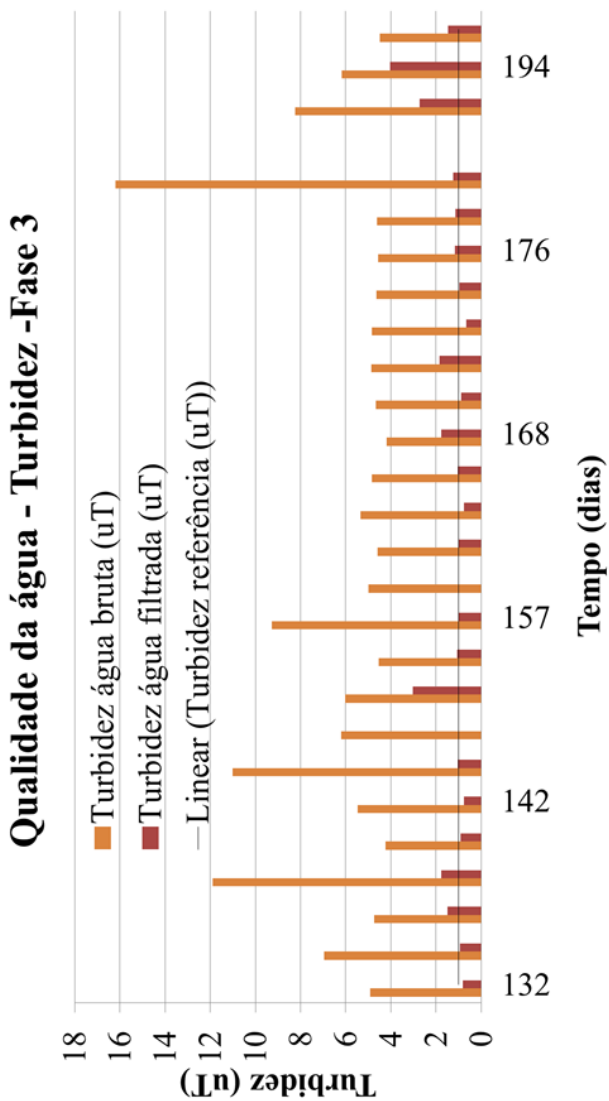
Fonte: do Autor.

Figura 32 – Monitoramento da Turbidez – Fase 2



Fonte: do Autor.

Figura 33 – Monitoramento da Turbidez – Fase 3



Fonte: do Autor.

Foi observado que com 7 horas de filtração o filtro produzia água com turbidez menor que 2 uT. A Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde determina que, após a filtração lenta, os filtros produzam água em 95% das amostras com turbidez de menor ou igual a 1 uT. O filtro avaliado ficou com 41% das amostras abaixo desse valor.

Pizzolatti (2014) observou em seu experimento, que com 3,5 horas de filtração todos os filtros produziam água com turbidez menor que 2 uT. Os filtros avaliados ficaram com 70, 38 e 55% das amostras acima de 1,0 uT de turbidez, para os filtros FLC, FLR e FLRb respectivamente.

O percentual das amostras abaixo de 1,0 uT para valores de turbidez da água filtrada do FLB foi inferior ao percentual do FLC e FLRb, e foi aproximado ao FLR de Pizzolatti (2014).

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam o desempenho do filtro em relação à remoção de turbidez durante as carreiras de filtração. Na Tabela 11, são apresentados os percentuais das determinações de turbidez em função do valor máximo permitido na Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017).

Tabela 11 – Percentuais em função dos máximos permitidos

Valores Máximos permitidos (uT)	FLB
Turbidez < 1,0	41%
Turbidez < 2,0	89%
Turbidez < 5,0	99%

Fonte: do Autor.

5 CONCLUSÃO

Com esse trabalho puderam-se avaliar parâmetros operacionais e de qualidade de água para a aplicação da técnica de filtração lenta bifluxo. Foi possível concluir-se que o Filtro Lento Bifluxo é adequado para o tratamento de água, sendo eficiente na remoção em termos dos parâmetros de cor aparente e turbidez para a qualidade de água avaliada. Ainda, apresentou resultados compatíveis quando comparado a outros filtros em condições parecidas às que o FLB foi submetido.

O sistema de limpeza empregado no início da operação não funcionou como esperado. A descarga de fundo com injeção de água na interface entre o meio filtrante e a camada suporte e a retrolavagem associadas foram perdendo eficiência na limpeza do filtro, porém com expansões menores que o esperado. Portanto, a limpeza da camada suporte, se demonstrou sem necessidade. Primeiramente, exerceu sua função, no entanto, após a troca de tubulação de interligação entre a câmara de carga e o FLB, as expansões foram maiores resultando em uma limpeza eficiente. Com isso, pode-se verificar que somente a retrolavagem já promovia a limpeza da camada suporte, juntamente com a camada filtrante.

Com relação à viabilização da retirada do bocal de coleta de água filtrada, pode-se concluir que, caso haja a sua obstrução é possível realizar a suspensão na parte superior de filtro a fim de se operar a sua abertura e proceder a limpeza dos anéis que a compõe com injeção de água.

Com esse estudo também foi possível concluir que a quantidade de água filtrada pode ser mesmo o dobro do volume numa mesma área de um filtro lento ascendente ou descendente. Isso foi verificado em função das vazões de entrada e saída do sistema de filtração. Os resultados sobre esta técnica foram satisfatórios e obteve-se um maior rendimento por área. Com isso, é possível atender uma população maior e ser mais competitivo com outras técnicas de tratamento de água.

Sugere-se para pesquisas futuras sobre filtração lenta bifluxo, para aumentar o tempo das carreiras de filtração, inserir na parte superior do FLB mais uma camada filtrante, como o antracito. Desta forma, poderia haver equilíbrio entre os dois fluxos para que o momento de lavagem do sistema ocorresse próximo para as duas partes do filtro, estendendo assim as carreiras de filtração.

REFERÊNCIAS

BELLAMY, W. D.; HENDRICKS, D. W.; LOGSDON, G. S. Slow sand filtration: influences of selected process variables. **Journal - American Water Works Association**, v. 77, n. 12, p. 62–66, 1985.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Portaria de consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017.** Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html>.

CAMPOS, L. C.; SU, M. F. J.; GRAHAM, N. J. D.; SMITH, S. R. Biomass development in slow sand filters. **Water research**, v. 36, n. 18, p. 4543–51, nov. 2002.

CLEASBY, J. L. Filtration. In: PONTIUS, F. W. (Ed.). **WATER QUALITY & TREATMENT - A Handbook on Drinking Water**. New York: McGraw Hill, 1990.

CLEASBY, J. L. Source water quality and pretreatment options for slow sand filters. In: LOGSDON, G. S. (Ed.). **Slow sand filtration**. Nova York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 69–100.

COSTA, R. H. R. da. **Estudos comparativos da eficiencia de filtros lentos de areia convencionais e de fluxo ascendente**. 1980. 256 f.. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1980.

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLOUS, G. **Mwh's water treatment: principles and design**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2012.

DE SOUZA, F. H. **Influência do diametro efetivo do meio filtrante em filtros lentos retrolaváveis**. 2013. 54 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

DE SOUZA, F. H. **Tratamento de água para abastecimento por meio de filtros lentos de fluxo ascendente com limpeza por retrolavagem e descarga de fundo**. 2015. 113 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental,

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

DE SOUZA, F. H.; MONDARDO, R. I.; SENS, M. L. Drinking water treatment using upflow slow sand filtration systems in high density *Cylindrospermopsis raciborskii* cyanobacteria water. **DESALINATION AND WATER TREATMENT**, v. 79, p. 1–8, 2017.

DE SOUZA, F. H.; PIZZOLATTI, B. S.; SCHÖNTAG, J. M.; SENS, M. L. Study of slow sand filtration with backwash and the influence of the filter media on the filter recovery and cleaning. **Environmental Technology**, v. 37, n. 14, p. 1802–1810, 17 jul. 2016.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água - volume 2**. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1990.

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

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água - volume 1**. 2nd. ed. São Carlos: RiMa, 2005.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. vol 1 ed. São Carlos: LBiBe, 2008.

EMMENDOERFER, M. L. **Filtração lenta com retrolavagem para propriedades rurais de uso familiar**. 2006. 56 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

HAMANN, C. L.; MCKINNEY, R. E. Upflow Filtration Process. **Journal AWWA**, p. 1023–1039, 1967.

HENDRICKS, D. W.; BELLAMY, W. D. Microorganism removals by slow sand filtration. In: LOGSDON, G. S. (Ed.). **Slow sand filtration**. 1. ed. Nova York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 101–121.

HUISMAN, L. **Slow sand filtration**. 2. ed. Delft: Delft University of technology, 2004.

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

ISHII, M. M. **Filtração lenta com retrolavagem para tratamento de água de abastecimento**. 2013. 56 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

KIM, H.-C.; YU, M.-J. Characterization of natural organic matter in conventional water treatment processes for selection of treatment processes focused on DBPs control. **Water Research**, v. 39, n. 19, p. 4779–4789, 1 nov. 2005.

MACINTYRE, A. J. **Instalações hidráulicas prediais e industriais**. 3ª Edição ed. [s.l.] Livros Técnicos e Científicos Editora, 1988.

MARNOTO, J. M.; DALSASSO, R. L.; DUAERTE, E. A.; SENS, M. L. A influência da expansão da areia durante a retrolavagem na qualidade de água para abastecimento produzida por filtros lentos. (AIDIS, Ed.) In: Anais do XXXI CONGRESSO INTERAMERICANO AIDIS, Santiago. **Anais...** Santiago: AIDIS, 2008.

MARNOTO, M. J. E. **Expansão da areia durante a retrolavagem dos filtros lentos – influência sobre a qualidade da água para abastecimento e a duração das carreiras**. 2008. 79 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MICHELAN, D. C. de G. S.; PIZZOLATTI, B. S.; SOARES, M. B. D.; DALSASSO, R. L.; SENS, M. L. Desempenho do sistema filtração em margem seguida de filtração lenta retrolavável em Ituporanga Santa Catarina. **Revista DAE**, v. 59, n. 187, p. 28–36, 2011.

MICHELAN, D. C. G. dos S. **Filtração em margem de rio precedendo a filtração lenta, para remoção de carbofurano, em tratamento de água para consumo humano**. 2010. 342 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MICHIELIN, A. K. **Filtração lenta com retrolavagem**. 2003. 59 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

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. 227 f.. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.

MURTHA, N. A.; HELLER, L. Avaliação da influência de variáveis hidráulicas, parâmetros de projeto e das características da água bruta na eficiência de filtros lentos de areia. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 8, n. 4, p. 257–267, 2003.

NAKAMOTO, N. Food chain is the key in ecological purification system: new concept and new name of slow sand filter. In: NAKAMOTO, N.; GRAHAM, N. J. D.; COLLINS, M. R.; GIMBEL, R. (Ed.). **Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes: Further Developments and Applications.** 1st. ed. London: IWA Publishing, 2014. p. 540.

PIZZOLATTI, B. S. **Estudos de limpeza de filtro lento por raspagem e retrolavagem.** 2010. 119 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 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. 222 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PIZZOLATTI, B. S.; SOARES, M. B. D.; MICHELAN, D. C. G. S.; ESQUIVEL, L. R.; SENS, M. L. Water treatment for rural areas by slow sand filtration. **21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment**, v. 2010, n. 701, p. 21–24, 2010.

PIZZOLATTI, B. S.; SOARES, M.; ROMERO, L.; LUIZ SENS, M. Comparison of backwashing with conventional cleaning methods in slow sand filters for small-scale communities. **Desalination and Water Treatment**, v. 54, n. January 2014, p. 1–7, 6 jan. 2014.

POERSCH, F. C. D. A. **Sistema de filtros lentos descendentes com retrolavagem sem reservatório elevado.** 2012. 89 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

ROCHA, V. C. T.; HELLER, L.; COSTA, B. M. P.; LIBÂNIO, M. Avaliação Da Influência Do Sentido Do escoamento Na Filtração Lenta Na Remoção De Cor Em Águas De Abastecimento. **IX SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 568–573, 2000.

SÁ, J. C. **Influência das características da camada filtrante e da taxa de filtração na eficiência de remoção de microcystis aeruginosa e microcistina na filtração lenta em areia**. 2006. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, 2006.

SCHIJVEN, J. F.; VAN DEN BERG, H. H. J. L.; COLIN, M.; DULLEMONT, Y.; HIJNEN, W. a. M.; MAGIC-KNEZEV, A.; OORTHUIZEN, W. a.; WUBBELS, G. A mathematical model for removal of human pathogenic viruses and bacteria by slow sand filtration under variable operational conditions. **Water Research**, p. 1–11, fev. 2013.

SOARES, M. B. D.; PIZOLLATTI, B. S.; ESQUIVEL, L. G. R.; CONCEIÇÃO, D. G.; SENS, M. L.; PIZZOLATTI, B. S.; MICHELAN, D. C. G. S.; ROMERO, L. G.; SENS, M. L. Backwashed Slow Sand Filtration for Water Supply during Droughts Periods in Animal Production. **21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment**, v. 2010, n. 701, p. 21–24, 2010.

STÜPP, A. J. **Avaliação do funcionamento de um filtro lento com retrolavagem automática para o tratamento de água de abastecimento em pequenas comunidades**. 2016. 46 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

VALENCIA, J. A. Filtracion Lenta. In: **Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua**. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1981. p. 588.

WEBER-SHIRK, M. L.; DICK, R. I. Bacterivory by a chrysophyte in slow sand filters. **Water Research**, v. 33, n. 3, p. 631–638, 1 fev. 1999.

WELTE, B.; MONTIEL, A. Removal of BDOC by slow sand filtration: comparison with granular activated carbon and effect of temperature. In: GRAHAM, N. J. D.; COLLINS, R. (Ed.). **Advances in Slow Sand and Alternative Biological Filtration**. London: John Wiley & Sons, 1996. p. 95–104.

WHO. **Guidelines for drinking-water quality**. 4th. ed. Geneva:

World Health Organization, 2011.

YACTAYO, V. M. Filtración. In: VARGAS, L. (Ed.). **Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Tomo I.** Lima: OPS/CEPIS, 2004. p. 81–119.