

AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM FILTRO LENTO COM RETROLAVAGEM AUTOMÁTICA PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO EM PEQUENAS COMUNIDADES

Aloísio Josué Stüpp

Orientador: Fernando Hymnô de Souza

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

AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM FILTRO LENTO
COM RETROLAVAGEM AUTOMÁTICA PARA O TRATAMENTO
DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO EM PEQUENAS
COMUNIDADES

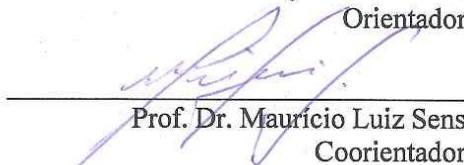
ALOÍSIO JOSUÉ STÜPP

Trabalho submetido à banca examinadora como parte dos requisitos para
conclusão do curso de graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental

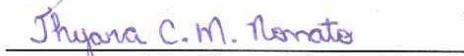
BANCA EXAMINADORA:



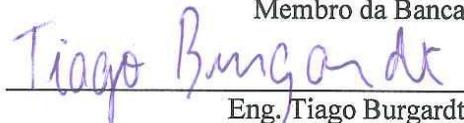
M.e Fernando Hymnô de Souza
Orientador



Prof. Dr. Mauricio Luiz Sens
Coorientador



M.e Thyara Martins Nonato
Membro da Banca



Eng. Tiago Burgardt
Membro da Banca

FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2016

Agradecimentos

Quero manifestar minha gratidão a Deus em primeiro lugar, que torna todas as coisas possíveis. Aos meus pais que me deram suporte em todos os meus dias, com amor indizível. Que haja honra e mérito dedicados a eles. Aos meus irmãos Ângela, César e Heloísa, que me deram força e me ajudaram sempre. À minha família, incluindo Guilherme e Adam, incentivadores incansáveis. À minha namorada Giovana, a motivação que me fez chegar aqui.

Faço também um agradecimento especial ao amigo e orientador Fernando Hymnô, dono de uma dedicação e paciência ímpares, pela compreensão, ajuda, atenção e preocupação. Sou eternamente grato pela sua grande amizade e pela doação do seu tempo e força.

Ao prof. Dr. Maurício Luiz Sens, apoiador do projeto e coordenador do Laboratório.

Ao Dr. Bruno Segalla Pizzolatti, pela orientação e pelo grande aprendizado que me proporcionou.

Aos membros da banca Tiago Burgard e Thyara Nonato, que prontamente aceitaram o convite e foram grandes parceiros e amigos.

Aos amigos do LAPOÁ, Juliana Schöntag, William, Giselle, Arthur, Jéssica, Emeline e Vitor, pelas ajudas e por colaborarem com o meu aprendizado.

Aos parceiros da MULTIAGUA Engenharia Ambiental, que deram apoio e suporte ao projeto, engenheiros Eduardo, Marcelo e Lírio.

Índice de figuras

Figura 1: Sistema automático para retrolavagem.....	18
Figura 2: Localização da Lagoa do Peri na Ilha de Florianópolis.....	19
Figura 3: Desenho esquemático e foto do filtro lento retrolavável automático (FLRA).....	20
Figura 4: Câmara de nível constante (1), plug roscável com orifício (2)	21
Figura 5: Esquema da composição da camada suporte e meio filtrante.....	22
Figura 6: Representação do sistema automático de acionamento da retrolavagem	25
Figura 7: Etapas da retrolavagem: 1) Término da carreira de filtração; 2) Inversão do fluxo; 3) Término da retrolavagem.	26
Figura 8: Turbidez média das carreiras de filtração.....	28
Figura 9: Média da cor aparente nas carreiras de filtração.....	29
Figura 10: Dados obtidos de oxigênio dissolvido no FLRA	31
Figura 11: Dados de cor verdadeira e média da cor aparente do FLRA	32
Figura 12: Primeira caixa de tombamento, posteriormente substituída	33
Figura 13: Caixa de tombamento reconstruída	33
Figura 14: Primeiro sistema de vedação testado	34
Figura 15: Segundo sistema de vedação testado	35
Figura 16: Terceiro sistema de vedação testado	35
Figura 17: Piezômetro do reservatório de água filtrada	37
Figura 18: Curva da velocidade de aproximação na retrolavagem	38
Figura 19: Relação da velocidade de aproximação e expansão do leito filtrante.....	39
Figura 20: Duração das carreiras de filtração	40
Figura 21: Gráfico da curva granulométrica	41

Figura 22: Curva granulométrica do FLR de Pizzolatti 41

Índice de tabelas

Tabela 1: Remoção de microrganismos em filtros lentos	14
Tabela 2: Análise de oocistos de <i>Cryptosporidium</i> na água antes e depois da filtração lenta por Timms, Slade e Fricker.....	14
Tabela 3: Médias da turbidez e cor aparente no FLRA e nos FLRs de Ishii, Pizzolatti e De Souza.	30
Tabela 4: Resultado do ensaio granulométrico para o FLRA	42

Resumo

Este trabalho tratou de avaliar o funcionamento de um filtro lento com retrolavagem automática (FLRA) sem energia elétrica, por meio do monitoramento da qualidade da água e do funcionamento da retrolavagem automática. O objetivo foi considerar a utilização do filtro para o tratamento de água de abastecimento em escala domiciliar, de forma especial em comunidades rurais. O filtro lento era coberto, de escoamento descendente, carga hidráulica variável, operando a uma taxa de filtração de cerca de 4 m³/m².d. Coletas diárias foram feitas para aferição dos parâmetros turbidez, cor aparente, cor verdadeira e oxigênio dissolvido, e a observação da retrolavagem era realizada no final das carreiras de filtração. O filtro removeu turbidez e cor aparente na faixa de 60% a 65%, e a remoção da cor verdadeira foi nula. O oxigênio dissolvido sofreu uma redução de 50% a 85% na filtração, indicando atividade microbológica no leito filtrante. O sistema de retrolavagem automática funcionou corretamente, promovendo ao final de cada carreira de filtração o seu acionamento, limpando o leito filtrante como esperado. Por este estudo, conclui-se que o sistema automático do filtro é eficiente, porém precisa de ajustes para funcionar de forma mais branda, a fim de que tenha maior durabilidade. A eficiência da filtração foi abaixo da esperada, todavia com o aperfeiçoamento da alimentação do filtro isto pode ser remediado.

Palavras-chave: Filtração lenta, Automação, Qualidade de Água.

Abstract

This research intended to evaluate the functioning of a slow sand filter with automated backwash (FLRA), using no electric power, by monitoring the water quality and automated backwashing system. Its objective was to consider the filter use for the supply water treatment in smaller home scale, especially in rural areas. The filter was covered, had descending flow, variable hydraulic load, operating with a filtration rate of about 4 m³/m².d. Daily sampling were made for measuring turbidity, apparent color, true color, and dissolved oxygen, and the backwashing observation was made at the end of the filtration career. The filter was able to remove turbidity and apparent color in about 60% to 65%, and the true color was not removed. Dissolved oxygen was reduced by 50% to 85%, showing microbiological activity in the filtering media. The automated backwashing system worked correctly, promoting its actuation at the end of each filtration career, cleaning the filtration media as expected. Through this study, it was concluded that the automatic system of the filter is efficient, but it need some upgrades so that it can work smoothly and be more durable. The filtration efficiency was lower than expected; however by fixing the feeding system this can be improved.

Key-words: Slow Sand Filtration, Automation, Water Quality.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. OBJETIVO GERAL.....	10
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1. FILTRAÇÃO LENTA	10
2.2. HISTÓRIA DA FILTRAÇÃO LENTA	11
2.3. CARACTERÍSTICAS DA FILTRAÇÃO LENTA.....	12
2.3.1. Mecanismos biológicos.....	12
2.3.2. Mecanismos físico-químicos	13
2.3.3. Eficiência	14
2.3.4. Aspectos estruturais	15
2.4. LIMPEZA DOS FILTROS.....	16
2.4.1. Raspagem.....	16
2.4.2. Retrolavagem.....	16
2.4.3. Automação da retrolavagem	17
3. METODOLOGIA	18
3.1. LOCALIZAÇÃO.....	18
3.2. SISTEMA ESTUDADO.....	19
3.2.1. Meio filtrante e camada suporte.....	21
3.2.1.1. Ensaio de granulometria.....	22
3.2.2. Fundo do filtro	22
3.2.3. Reservatório	22
3.3. DIMENSIONAMENTO DO FILTRO	23
3.3.1. Área de filtração	23
3.3.2. Volume do reservatório	23
3.4. RETROLAVAGEM.....	24
3.4.1. Velocidade de aproximação.....	26
3.5. MONITORAMENTO.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1. QUALIDADE DA ÁGUA BRUTA E ÁGUA FILTRADA.....	28
4.1.1. Turbidez e cor aparente.....	28
4.1.2. Oxigênio dissolvido	31
4.1.3. Cor verdadeira	31
4.2. RETROLAVAGEM.....	32
4.2.1. Sistema automático	32
4.2.2. Limpeza do leito filtrante.....	36
4.3. CARREIRAS DE FILTRAÇÃO.....	39
4.3.1. Composição granulométrica	40
4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	42

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
------------------------------------	----

1. Introdução

A água adequada para o consumo humano é uma prioridade na agenda do mundo. Embora ainda existam dificuldades na obtenção de água suficiente e de boa qualidade, ou seja, livre de agentes patogênicos e com características estéticas agradáveis para os usuários, existem diversos métodos de potabilização de água, os quais facilitam o acesso a este recurso.

Desde a idealização do primeiro filtro lento no início do século XIX, houve problemas de saúde relacionados à contaminação da água devido ao desconhecimento sobre mecanismos de purificação eficientes, inclusive com grandes proporções, provocando doenças e mortes (LOGSDON; LIPPY, 1982). Cólera, giardíase, febre tifoide e infecção entérica por coliformes fecais são as principais doenças causadas pela ausência de um tratamento de água satisfatório. O crescimento das populações e a sua concentração em grandes centros, tornou maior o desafio de disponibilizar água potável, visto que, com o passar do tempo, os mananciais de água foram sendo poluídos e contaminados, tornando mais difícil o seu tratamento. Novas tecnologias e processos foram sendo desenvolvidos para suprir a necessidade de tratar a água e torná-la potável. Existem outras formas de tratamento, tais como o tratamento convencional e a filtração rápida.

A filtração lenta possui vantagens em relação aos outros tipos de tratamento, uma vez que não carece de produtos químicos para coagulação, nem de sistemas mecânicos complexos, sendo também de fácil operação. O tratamento biológico que ocorre em um filtro lento é eficiente na remoção de microrganismos patogênicos e na adequação de outros parâmetros como turbidez e cor. O que deixa a filtração lenta em desvantagem é a grande área útil de filtração que é necessária, devido à baixa taxa de filtração, e necessidade de que a água a ser tratada tenha uma turbidez relativamente baixa, menor que 10 uT. Desta maneira, especialmente em centros urbanos, onde há densidade demográfica elevada e mananciais poluídos, esse tipo de tratamento pode não ser a primeira opção a se considerar.

O Brasil possui um grande número de municípios (80,8%) com população abaixo de 30.000 habitantes. Estes municípios estão predominantemente em áreas rurais onde a densidade demográfica é baixa. (SILVA; ZANCUL, 2012) (IBGE, 2010). Nestes locais se encontram propriedades residenciais, cooperativas, associações e escolas, e há abundância de fontes de água naturais como nascentes e vertentes. Para estes locais, a filtração lenta em pequena escala é uma solução promissora, segundo estudos feitos no LAPOÁ (Laboratório de

Potabilização de Águas – Universidade Federal de Santa Catarina)

Pesquisas promoveram um avanço na técnica de filtração lenta por meio da implementação da retrolavagem em filtros lentos. A limpeza manual gera desgaste físico do trabalhador, além de ser onerosa e demandar muito tempo. Em síntese, a retrolavagem consiste na aplicação de um fluxo ascendente de água no leito filtrante sujo, suspendendo a sujeira e descartando a água de lavagem. Isto facilita a operação, pois diminui o tempo e o trabalho da limpeza.

A fim de aperfeiçoar ainda mais esta técnica, a automatização da retrolavagem está sendo estudada. Em propriedades rurais, muitas vezes a operação de um filtro seria inconveniente, já que o acesso ao mesmo pode ser difícil.

Sendo assim, foi desenvolvido junto ao LAPOÁ, e com a empresa de engenharia ambiental MULTIÁGUA, de Blumenau, SC, um trabalho de monitoramento e acompanhamento de um filtro lento com retrolavagem automática implantado na Lagoa do Peri.

1.1. Objetivo geral

Avaliar o funcionamento de um filtro lento com retrolavagem automática (FLRA) para o tratamento de água de abastecimento em escala domiciliar.

1.2. Objetivos específicos

- Avaliar a qualidade da água do FLRA, em termos de turbidez, cor e oxigênio dissolvido;
- Verificar o funcionamento mecânico da retrolavagem automática do FLRA.

2. Fundamentação teórica

2.1. Filtração lenta

A filtração lenta é uma técnica de tratamento de água que se utiliza de processos biológicos de purificação, sendo também chamada “filtração biológica” e mais recentemente de “sistema de purificação ecológica” (NAKAMOTO et al., 2015). É uma técnica simples, confiável e de baixo custo, com potencial em países de grande extensão rural, como o Brasil. É um método eficiente para remoção de sólidos suspensos e principalmente de organismos patogênicos. (HUISMAN; WOOD, 1974).

Para pequenas comunidades, a filtração lenta apresenta grandes vantagens, especialmente relacionadas ao custo de implantação e

operação, já que não necessita grandes e complexas instalações. Para grandes volumes, a área demandada para filtração lenta é uma desvantagem, mas em se tratando de volumes menores, como pequenas comunidades e instalações residenciais, o seu emprego se torna uma boa opção. (LOGSDON; FOX, 1982).

A filtração lenta funciona com uma baixa taxa de filtração, em torno de 3 a 12 m³/m².d, proporcionando o desenvolvimento biológico dentro do filtro. Este complexo sistema de microrganismos atua na remoção dos sólidos e principalmente de bactérias, vírus e cistos de *Giardia*, e portanto não há necessidade de se utilizar coagulante (DI BERNARDO et al., 1999).

Há dois tipos de filtração, por pressão e por gravidade, e Huisman divide este último em dois tipos, os rápidos e os lentos. Estes se diferem pela taxa de filtração, que varia de 20 a 50 vezes entre um e outro. Sendo assim, o filtro rápido tem uma área muito menor, cerca de 2-5% da área necessária para um filtro lento. Apesar disso, o filtro rápido requer estágios de pré-tratamento, como coagulação e floculação, e tem uma carreira de filtração muito menor, de 20 a 50 vezes mais frequente (HUISMAN; WOOD, 1974). Considerando que não há necessidade de pré-tratamento e que as carreiras de filtração são maiores, os filtros lentos são mais fáceis de operar, sendo necessário que o operador tenha apenas alguma compreensão do funcionamento dos filtros. (LOGSDON; FOX, 1982). A filtração lenta oferece uma boa qualidade da água filtrada, baixo custo e facilidade de construção e operação, e ausência de remanescentes no lodo (HUISMAN; WOOD, 1974).

2.2. História da filtração lenta

Em 1804 John Gibb projetou, experimentou e comercializou um filtro lento de areia na Escócia, e em 1829 passou a ser utilizado para abastecimento público em Londres. Primeiramente, sabia-se que a filtração removia de forma mecânica os sólidos suspensos. Um cidadão chamado John Snow concluiu que a filtração removia um suposto material que transmitiria infecções na água – *materies morbi*. Em 1858 análises da água de abastecimento em Londres começaram a ser feitas, e nas décadas de 1860 e 1870, análises bacteriológicas tomaram vez, seguindo as descobertas de Louis Pasteur e outros estudiosos (HUISMAN; WOOD, 1974).

Em 1982, a filtração lenta deu as provas mais convincentes da sua eficiência, quando parte da cidade de Hamburgo foi infectada por uma epidemia de cólera. Na cidade vizinha, Altona, onde se utilizava

tratamento de água por filtração lenta, a contaminação foi quase nula. Desta maneira, a filtração lenta já demonstrava seu potencial de remoção de microrganismos patogênicos em casos de contaminação de fontes de água (HUISMAN; WOOD, 1974).

Já em 1899 a América recebia um filtro lento, implantado em Albany, Nova York, que era abastecida pelas águas contaminadas do Rio Hudson. Dez anos depois, a água filtrada passou a ser clorada para desinfecção. Nessas duas etapas, a queda no número de mortes por febre tifoide se tornou evidente (LOGSDON; LIPPY, 1982).

No Oeste dos EUA, filtros lentos foram construídos no final dos anos 1800, e alguns na Nova Inglaterra. Com o tempo, a filtração lenta foi sendo cada vez menos utilizada (LOGSDON; FOX, 1982).

No Brasil a filtração lenta era largamente aplicada até a década de 60. A deterioração dos mananciais e a influência da tecnologia norte-americana fez com que outras formas de tratamento predominassem sobre a filtração lenta a partir dos anos 70. Houve casos em que filtros lentos foram reformados e convertidos em filtros rápidos. Mesmo sendo uma solução apropriada especialmente na zona rural e comunidades de pequeno e médio portes, o emprego da filtração lenta foi reprimido. Assim, seu desenvolvimento e aperfeiçoamento foram também diminuídos (DI BERNARDO et al., 1999).

Pesquisas com filtros lentos têm sido feitas em laboratórios das Universidades Federais de Santa Catarina e Minas Gerais, entre outros, como será abordado neste trabalho.

2.3. Características da filtração lenta

Os diferentes autores estabelecem a taxa de filtração em filtros lentos, sendo de 2 e 14 m³/m².d (VALENCIA, 1981); 2,4 a 9,6 m/d (HUISMAN; WOOD, 1974); inferiores a 6 m/d. (DI BERNARDO et al., 1999), sendo predominantemente entre 2 e 14 m/d. Filtros lentos utilizam areia fina, e operam por semanas ou meses sem necessidade de limpeza (HUISMAN; WOOD, 1974). Não necessitam coagulação (EDZWALD 2011a), e além de mecanismos físico-químicos, há grande atividade biológica devido ao longo tempo que a água permanece em contato com o leito, sendo atribuída grande importância à fina película que se forma sobre o leito filtrante, chamada comumente de “*Schmutzdecke*” (VALENCIA, 1981).

2.3.1. Mecanismos biológicos

Há diversos mecanismos que atuam na filtração lenta. O principal deles se refere à atuação de microrganismos no interior do filtro. Com o

passar do tempo, uma diversificada microbiota se desenvolve no leito filtrante e sobre ele. *Schmutzdecke* – capa de sujeira, em alemão – é uma camada que se forma sobre o leito filtrante, e é composto por algas filamentosas e inúmeras outras formas de vida, as quais consomem e digerem a matéria orgânica que passa por ela. A deposição de microrganismos acontece até 40 cm de profundidade no leito, variando sua qualidade e quantidade de forma decrescente com a profundidade. Abaixo disto, encontram-se sais inorgânicos, tendo sido removidos quaisquer organismos prejudiciais e matéria orgânica que possa induzir o seu crescimento. (HUISMAN; WOOD, 1974)

Do ponto de vista microbiológico, a areia do leito filtrante está inativa quando o filtro entra em operação. A maturação ocorre após algumas semanas, quando o desenvolvimento de microrganismos atinge sua estabilidade e eficiência. Após a limpeza do filtro, o que remove boa parte da camada biológica, observa-se novo amadurecimento do *Schmutzdecke*. Isto pode levar de 6 horas a 2 semanas, embora ocorra predominantemente nos dois primeiros dias (EDZWALD, 2011a). Di Bernardo et al (1999), afirmam que no início, quando a areia ainda está limpa, a eficiência da filtração é baixa, mas aumenta com o passar do tempo e com a maturação do filtro, enquanto se forma o *Schmutzdecke*. O *Schmutzdecke* é também formado por ferro e manganês, quando estes estão precipitados na água

2.3.2. Mecanismos físico-químicos

Outros fenômenos também ocorrem no processo de filtração. Há decantação de partículas maiores, aglomeração de pequenas partículas e adesão nos grãos. Com a proliferação de algas, há consumo de gás carbônico e outros compostos e grande produção de oxigênio. Isto proporciona um ambiente favorável para reações químicas e para os microrganismos se desenvolverem. Alguns sais são formados, e boa parte dos sólidos são removidos mecanicamente (EDZWALD, 2011b).

Huisman & Wood (1974) afirmam que no leito filtrante ocorrem adsorção - resultado de forças elétricas, ligações químicas e atração de massas. O interior do leito é visto como uma grande área, somadas as áreas superficiais dos grãos de areia. A água escoar em fluxo laminar sempre mudando de direção, sendo as partículas depositadas sobre as superfícies. Estas adquirem com o tempo uma fina camada, similar ao *Schmutzdecke*, sustentando, vírus, bactérias, protozoários e outras partículas aderidas por forças de atração química e física.

2.3.3. Eficiência

O desempenho do filtro depende da taxa de filtração, temperatura, espessura do meio filtrante, granulometria da areia, idade do *Schmutzdecke*, e maturidade microbiológica do meio filtrante. Em um leito filtrante com areia nova, a remoção de cistos de *Giardia* e coliformes pode ser de 85% a 98%, comparada a 100% e 99% num leito biologicamente maduro (DI BERNARDO et al., 1999). É eficiente também com vários outros organismos, sendo uma boa opção para tratamento de pequenos volumes (EDZWALD, 2011a). A Tabela 1 mostra a capacidade de filtros lentos na remoção de microrganismos patogênicos.

Tabela 1: Remoção de microrganismos em filtros lentos

Microorganismo	Percentagem de remoção (*)	Autor
Coliformes Totais	>99%	Bellamy et al. (1985a)
Vírus (Poliovirus 1)	98,25 - 99,99	Poynter e Slade (1977)(**)
Cistos de <i>Giardia</i>	> 98%	Bellamy et al. (1985a)
Oocistos de <i>Cryptosporidium</i>	>99,9%	Timms et al. (1995)
Cercárias de <i>Schistosoma</i>	100%	Galvis et al. (1997)

Fonte: DI BERNARDO et al., 1999

Os aspectos físicos da água são claramente alterados na filtração. Os materiais em suspensão e dissolvidos responsáveis pela turbidez e cor da água são retidos principalmente pela atividade microbiológica. A filtração lenta é altamente eficaz também na retenção de oocistos de *Cryptosporidium*. Os oocistos permanecem na camada superior do filtro, evitando que alcancem as porções inferiores do leito filtrante (TIMMS; SLADE; FRICKER, 1995). A Tabela 2 mostra os resultados da pesquisa destes autores, evidenciando a remoção de oocistos de *Cryptosporidium* pela filtração lenta.

Tabela 2: Análise de oocistos de *Cryptosporidium* na água antes e depois da filtração lenta por Timms, Slade e Fricker

Hora	Volume (ml)	No. Oocistos	Volume (ml)	No. oocistos
00:00	25	98	50	0
00:15	25	115	750	0

00:30	25	121	50	0
00:45	25	74	750	0
01:00	25	86	50	0
01:15	25	52	750	0
01:30	25	124	50	0
01:45	25	82	750	0
02:00	25	100	50	0

FONTE: Adaptado de TIMMS; SLADE; FRICKER, 1995.

2.3.4. Aspectos estruturais

Os filtros lentos são compostos pelo leito filtrante, geralmente de areia, camada suporte, e um sistema de controle de vazão por válvulas. É uma caixa com 2,5 a 4 m de profundidade, geralmente retangular, de pedra, brita, ou concreto, com parede normalmente vertical. No fundo se encontra o sistema de drenagem, formado por um fundo-falso ou concreto poroso, que é coberto por pedregulho. O leito filtrante de areia fica acima desta camada, e sua espessura possui de 0,6 a 1,2 m. A água bruta sobrenadante tem geralmente de 1 a 1,5 m. (HUISMAN; WOOD, 1974; VALENCIA, 1981)

A norma brasileira NBR 12216:1992 determina o tamanho efetivo dos grãos de 0,25 a 0,35 mm e um coeficiente de uniformidade menor que 3 (ABNT, 1992). De acordo com Di Bernardo et al (1999), o material mais adequado para a filtração lenta tem as seguintes características: tamanho dos grãos de 0,08 a 1,0 mm, tamanho efetivo de 0,15 a 0,30 mm, e coeficiente de uniformidade de 2 a 5. O coeficiente de uniformidade influencia na profundidade que as impurezas penetram, resultando em uma maior espessura da camada biológica e maiores carreiras de filtração, sem alteração da qualidade final da água.

Algumas dificuldades podem inviabilizar a utilização da filtração lenta. Em se tratando da qualidade da água bruta disponível no local, a turbidez recomendada é de no máximo 10 uT (BASTOS, 2004; DI BERNARDO et al., 1999). A necessidade de grandes áreas para construção, prevenção em locais frios com risco de congelamento, risco de proliferação de algas são algumas dificuldades que a filtração lenta apresenta que devem ser avaliadas. Em locais onde estes problemas não se aplicam, a filtração lenta pode ser um eficiente e adequado método de tratamento.

2.4. Limpeza dos filtros

2.4.1. Raspagem

A limpeza dos filtros é necessária no final da carreira de filtração, que é o momento em que o nível de água sobrenadante atinge o valor máximo. A partir deste valor a coluna d'água pode exceder a pressão limite sobre a camada biológica. Para filtros lentos, a carreira dura de 1 a 6 meses, no entanto um filtro lento pode ter carreiras curtas, dependendo de sua aplicação e suas características.

A raspagem é o método mais usado para limpeza do filtro. Após a drenagem da água sobrenadante, retira-se de 1 a 3 cm de areia para ser lavada. Depois, retira-se a mesma quantidade para ser reservada. Após a lavagem, a areia lavada é repostada, e a areia reservada é depositada sobre aquela (EDZWALD, 2011a). A quantidade de areia retirada pode variar para um melhor desempenho do filtro, segundo a experiência de quem o opera.

A raspagem é feita manualmente ou mecanicamente, cada vez que a perda de carga excede a pressão estática sobre os drenos. Outro método de raspagem é retirar a areia suja até que a espessura da camada filtrante atinge um valor mínimo determinado em projeto, a areia retirada é lavada e repostada no leito filtrante para reiniciar a atividade de filtração (VALENCIA, 1981)

O método de lavagem manual da areia é oneroso. É um processo demorado e exige grande esforço dos operadores. Portanto, é conveniente a introdução de outras alternativas para a limpeza dos filtros lentos.

2.4.2. Retrolavagem

Outra alternativa de limpeza, utilizada tipicamente em filtros rápidos, é a retrolavagem com auxílio de bombas ou de reservatório elevado, por meio de um fluxo ascendente de água aplicado no leito filtrante. Ocorre uma expansão volumétrica no leito de 30 a 50%, suficiente para uma limpeza eficiente (ALLEY, 2007). É um método eficiente, visto que em tempo curto é feita a limpeza do leito filtrante.

Investigações e estudos da retrolavagem para aprimoramento da limpeza de filtros lentos foram realizados por Sens em 1992, seguido por Michielin em 2002, Emmendoerfer em 2006, e Marnoto em 2008. Destes, obtiveram-se características hidráulicas e condições de fluidificação do leito, altura da camada filtrante, duração das carreiras e qualidade da água filtrada, com filtros utilizando limpeza por meio desta técnica. (PIZZOLATTI, 2010)

Pizzolatti (2010) avaliou as diferenças entre dois filtros retrolaváveis e um filtro convencional em aspectos como qualidade da água filtrada e duração das carreiras de filtração. Posteriormente, utilizando os mesmos filtros, estudou a remoção de agrotóxicos e oocistos de *Cryptosporidium*.

Poerch (2012) analisou a eficiência da retrolavagem que cinco filtros em operação poderiam ter lavando um sexto filtro, utilizando para isto somente a água de filtração dos primeiros cinco. Com pequena expansão do leito filtrante, a retrolavagem foi suficiente. De Souza et al (2016) compararam filtros lentos convencionais e retrolaváveis variando a granulometria do leito filtrante. Apesar de a qualidade da água dos filtros convencionais ter sido superior, os retrolaváveis provaram ser satisfatoriamente eficientes no tratamento e de fácil operação.

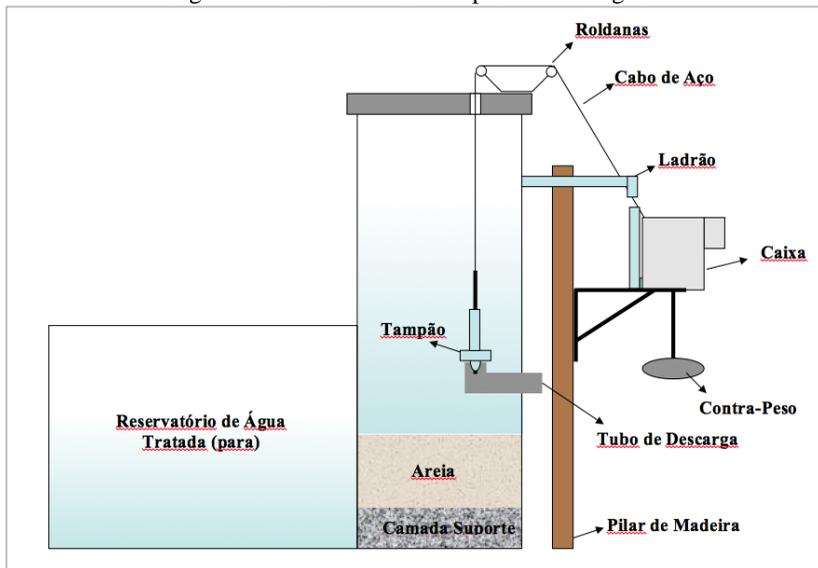
2.4.3. Automação da retrolavagem

A filtração lenta é uma tecnologia que pode ser utilizada em locais onde há demanda de água potável em quantidade relativamente pequena, como em comunidades, propriedades familiares, locais distantes de onde haja circulação de pessoas. Muitas vezes o manancial de água bruta se encontra em local de difícil acesso, ou o filtro precisa ser instalado em um local onde inspeções frequentes e periódicas são impraticáveis. Assim, se o filtro não é assistido com frequência, a carreira de filtração pode chegar ao fim e permanecer dias até que o operador do filtro o perceba e possa proceder a limpeza ou a retrolavagem do mesmo. Visando evitar que o filtro fique ocioso ao fim da carreira de filtração, alguns estudos foram feitos para fazer a automatização da retrolavagem, tornando o filtro independente da operação humana para a sua limpeza.

Um estudo com aplicação da automação da retrolavagem foi feita por Soares, em 2008. Ele analisou um filtro lento retrolavável automático que funcionava sem a utilização de energia elétrica. O equipamento automático por ele idealizado é mostrado na

Figura 1. O sistema é composto de um complexo de roldanas e cabos que ligam uma válvula de abertura da retrolavagem a uma caixa. Este recebe a água que extravasa pelo ladrão do filtro quando é atingida a perda de carga máxima. Ao encher, a caixa tem seu centro de gravidade deslocado, provocando o seu tombamento, acionando os cabos que a si estão ligados. Desta forma os cabos acionados puxam a válvula interna do tampão, promovendo a retrolavagem (SOARES, 2008). O filtro e o sistema são mostrados na Figura 1.

Figura 1: Sistema automático para retrolavagem



FONTE: SOARES, 2008.

Segundo o autor, a automação da retrolavagem foi eficiente, possibilitando a lavagem do leito filtrante sem intervenção humana. O trabalho destaca a necessidade de uma boa escolha no material empregado para que se tenha resistência e durabilidade do sistema automático.

3. Metodologia

3.1. Localização

O filtro deste estudo foi instalado na Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri, a qual pertence à CASAN (Companhia Catarinense de Água e Esgoto). A Lagoa do Peri está localizada na porção Sul da ilha de Florianópolis (Figura 2), sendo um manancial que abastece a demanda de água potável da região Sul e Leste da ilha. Na Estação de Tratamento há um laboratório auxiliar do Laboratório de Potabilização de Águas (LAPOÁ) que é localizado na Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis – SC.

Figura 2: Localização da Lagoa do Peri na Ilha de Florianópolis



3.2. Sistema estudado

A pesquisa feita com o Filtro Lento Retrolavável Automático (FLRA) se baseia em estudos feitos no LAPOÁ em anos anteriores, com o mesmo manancial de água bruta e características construtivas semelhantes. Os aspectos estruturais e características gerais do FLRA foram baseados principalmente no filtro lento retrolavável de Pizzolatti (2010), e o sistema automático foi fundamentado na pesquisa de Soares (2008).

O filtro foi construído pela empresa de engenharia MULTIAGUA, localizada em Blumenau – SC. Foi colocado sobre uma base de concreto, próximo a outros filtros estudados pelo LAPOÁ na Lagoa do Peri. A alimentação de água bruta foi feita por uma bomba de

captação localizada no poço de sucção da Estação de Tratamento da Lagoa do Peri.

O filtro foi feito de polipropileno, coberto, de fluxo descendente, e com carga hidráulica variável. Possui 90 cm de diâmetro e altura de 2,6 m, como pode ser visualizado na

Figura 3. A operação é feita com taxa de filtração constante de $4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ e carga hidráulica variável (limitada a 80 cm). Desta forma, sua produção é de aproximadamente 2500 L de água filtrada por dia. O controle da vazão na entrada dos filtros é realizado por meio de câmara de nível constante com escoamento por orifício, sendo este substituível caso sejam necessárias modificações. A coluna de água na câmara possui 15 cm e o orifício tem cerca de 5 mm, fornecendo vazão para uma taxa de filtração de $4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. A câmara de nível constante está apresentada na Figura 4, que mostra uma foto do interior do filtro.

Figura 3: Desenho esquemático e foto do filtro lento retrolavável automático (FLRA)

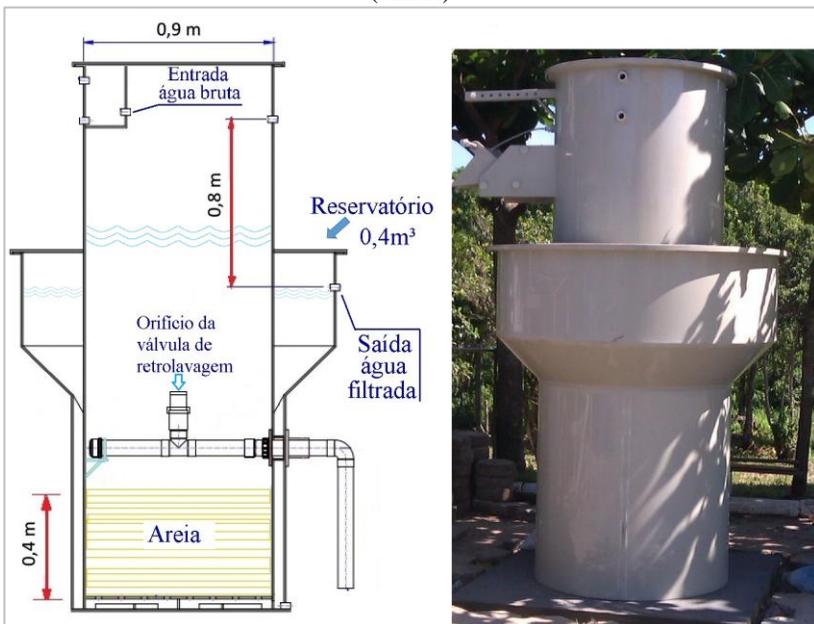


Figura 4: Câmara de nível constante (1), plug roscável com orifício (2)

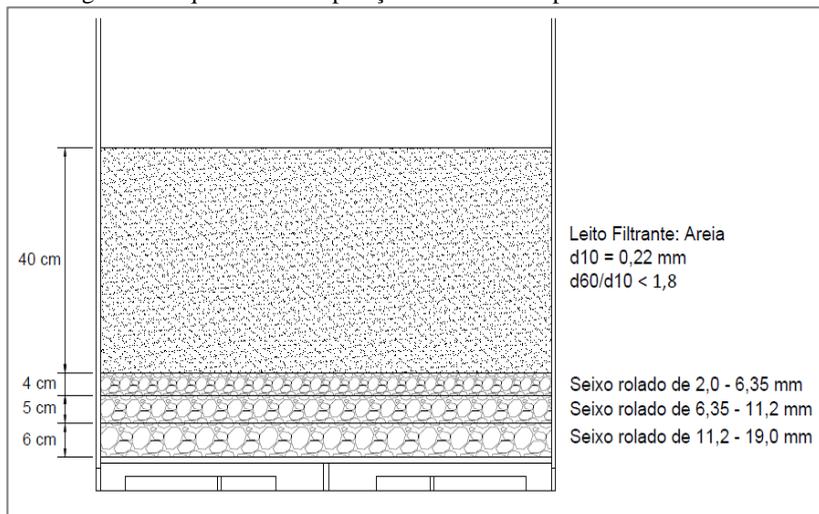


3.2.1. Meio filtrante e camada suporte

A altura da camada filtrante foi reduzida a 40 cm (usualmente se utiliza 0,9 a 1,5 m em filtros lentos convencionais). A remoção de sólidos e bactérias ocorre predominantemente nos primeiros 30 cm de profundidade, além disto, ocorrem apenas variações inexpressivas de coliformes totais, *Escherichia coli*, turbidez e cor aparente (MURTHA; HELLER; LIBÂNIO, 1999). Segundo Emmendoerfer, 40 cm de areia são suficientes para a filtração ser adequada, bem como é ótimo em relação à duração da carreira de filtração. (EMMENDOERFER, 2006)

O meio filtrante proposto no projeto é formado por camada de areia de 40 cm, com diâmetro efetivo de 0,22 mm, coeficiente de uniformidade $< 1,8$ e camada suporte de 15 cm de espessura, com grãos variando de 1,4 a 4,5 mm (Figura 5). A granulometria da areia foi escolhida em função dos estudos de Pizzolatti (2010), feitos no mesmo local e com a mesma água bruta, e com características semelhantes às deste estudo.

Figura 5: Esquema da composição da camada suporte e meio filtrante



3.2.1.1. Ensaio de granulometria

O filtro passou por uma fase de testes com o propósito de reparar os erros e imprevistos, mesmo depois do início da sua operação. Análises adicionais também foram feitas, como a granulometria da areia e velocidade ascensional. O ensaio granulométrico foi realizado nos moldes estabelecidos pela NBR 7217:1987 para determinação da composição granulométrica de agregados, com peneiras e balança disponíveis no LAPOÁ. As areias ensaiadas foram as dos filtros lentos convencional e retrolavável de Pizzolatti, e do filtro deste trabalho.

3.2.2. Fundo do filtro

O fundo do filtro é composto de um fundo falso com 2,5 cm de altura. No fundo falso são dispostas 28 crepinas de 2,0 mm de modo a garantir distribuição homogênea da água durante a operação de retrolavagem. As crepinas são dispostas no fundo falso também com o objetivo de diminuir a possibilidade de obstrução da mesma pelo material da camada suporte.

3.2.3. Reservatório

A concepção do FLRA é baseada em filtros desenvolvidos e estudados por Pizzolatti. A técnica idealizada por ele consiste em armazenar água filtrada ou água bruta em reservatórios elevados. Os filtros foram dimensionados para que a sua própria carga hidráulica

alimente o reservatório elevado. Assim, no final da carreira, permite-se que o filtro ainda se mantenha ativo durante o tempo necessário para encher o reservatório. Feito isso, procede-se a retrolavagem com a água filtrada pelo próprio filtro (PIZZOLATTI, 2010, 2014).

O reservatório de água do FLRA também recebe a sua própria água filtrada, porém isso não acontece no término da carreira de filtração, e sim durante todo o tempo. A água filtrada passa primeiramente por ele, e é coletada ao sair por seu extravasor. O reservatório é integrado no próprio filtro em forma de anel, como pode ser visto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

3.3. Dimensionamento do filtro

3.3.1. Área de filtração

Para determinar a área de filtração foi estipulada uma produção média diária de 2500 litros por filtro, suficiente para abastecer aproximadamente 20 pessoas em uma comunidade isolada (120 L/hab d), conforme CISAM e AMVAP (2006). Operando a uma taxa de filtração de $4 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, e por meio da Equação 1 foi determinada a área superficial de filtração de $0,64 \text{ m}^2$, resultando em um filtro com diâmetro interno de aproximadamente 0,90 m.

Equação 1:

$$T = \frac{Q}{A_f}$$

Onde:

T = taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$);

Q = vazão do filtro (m^3/d);

A_f = área superficial de filtração (m^2).

3.3.2. Volume do reservatório

A retrolavagem foi dimensionada para uma expansão média de 40% a uma velocidade de aproximação de 0,34 m/min. Para determinar o volume de água necessário para a lavagem dos filtros, foi estipulado tempo de lavagem de 2 minutos (MARNOTO et al., 2008). Considerando uma área de filtração de $0,64 \text{ m}^2$ (0,9 m de diâmetro) e velocidade de aproximação de 0,34 m/min ($5,67 \times 10^{-3} \text{ m/s}$), a partir da

Equação 2 se obtém a vazão de lavagem ($0,192 \text{ m}^3/\text{min}$) e, com a Equação 3, o volume ($\sim 400 \text{ L}$) de água necessário para a retrolavagem.

Equação 2:

$$Q_L = V \times A_f$$

Onde:

Q_L = vazão de água de lavagem (m^3/s);

V = velocidade de aproximação (m/s);

A_f = área de filtração (m^2).

Equação 3:

$$V = Q_L \times t$$

Onde:

V = volume do reservatório de lavagem (m^3);

Q_L = vazão de lavagem (m^3/s);

t = tempo de lavagem (s).

3.4. Retrolavagem

A limpeza do filtro é realizada no fim de cada carreira, quando a perda de carga hidráulica (relação da carga hidráulica da água sobrenadante e da carga hidráulica na saída de água filtrada) atinge o valor de 80 cm.

A tecnologia de automação é semelhante à do filtro estudado por Soares (2006). A forma automática ocorre por um sistema de cabos e roldanas que compõe o sistema de abertura da válvula de vedação interna. Para que isso aconteça, ao fim da carreira de filtração a água escoo pelo extravasor, enchendo a caixa de controle da retrolavagem, também chamada caixa de tombamento. Ao encher, a caixa tem seu centro de massa deslocado, girando sobre seu eixo e tombando, puxando assim os cabos que ligam à válvula de vedação. Este sistema está representado na Figura 6.

A vazão de retrolavagem é determinada pela cota do orifício que coleta e drena a água do filtro no momento da retrolavagem. Quando a água é drenada, a cota hidráulica da água interna fica abaixo da cota de água filtrada do reservatório. Assim, o fluxo de água passa a ser do

reservatório para dentro do filtro, com sentido inverso e ascendente, arrastando a sujeira do meio filtrante. A Figura 7 representa os momentos do fim da carreira de filtração, inversão da carga hidráulica e do fluxo de água, e esvaziamento do reservatório e término da retrolavagem, 1,2 e 3, respectivamente.

Figura 6: Representação do sistema automático de acionamento da retrolavagem

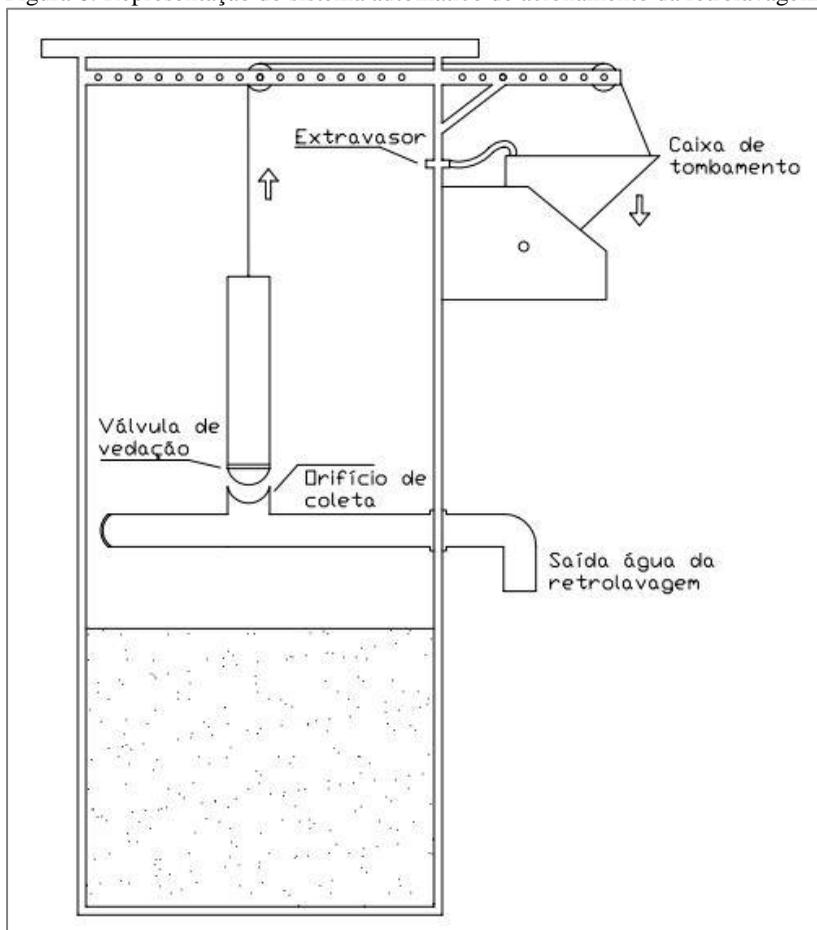
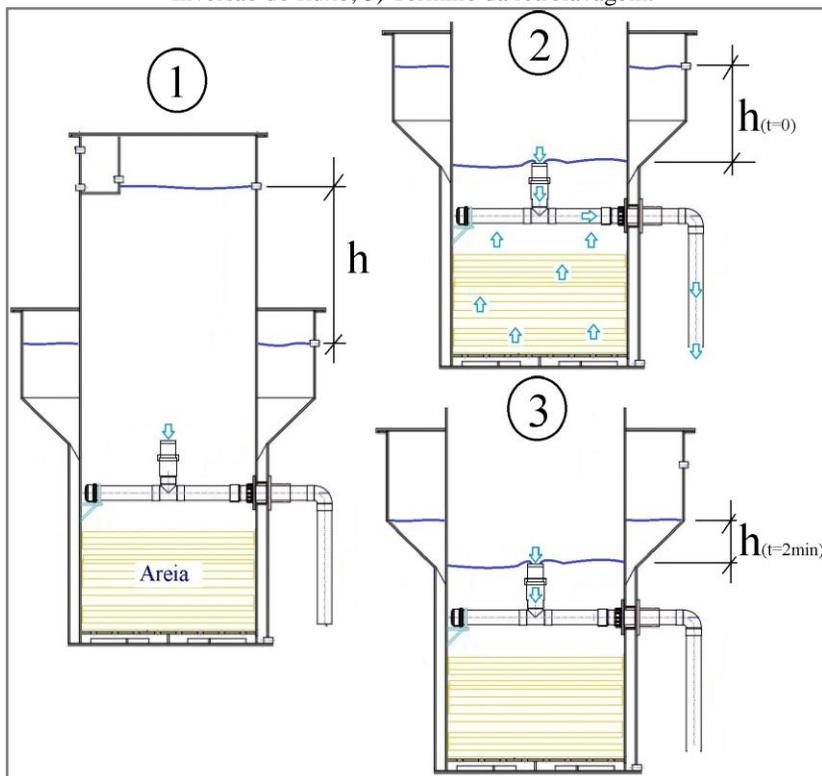


Figura 7: Etapas da retrolavagem: 1) Término da carreira de filtração; 2) Inversão do fluxo; 3) Término da retrolavagem.



3.4.1. Velocidade de aproximação

O tempo e o volume de água utilizado na retrolavagem foram medidos com auxílio de um piezômetro e um cronômetro. A velocidade da queda do nível de água dentro do reservatório foi aferida também por meio do piezômetro.

O gráfico da velocidade de aproximação é elaborado com base na velocidade de queda do volume do reservatório e na área do leito filtrante. Tendo registrado o nível de água dentro do reservatório na retrolavagem para cada intervalo de tempo, e sabendo o volume gasto de água filtrada neste intervalo, tem-se por $Q_L = V_L/t$ (Equação 3), a curva da vazão do início ao fim da retrolavagem. Adicionalmente, por $v = Q_L/A_f$ (Equação 2), pode-se obter a velocidade de ascensão da água no leito

filtrante. Desta maneira, tendo a curva de vazão e a área do leito filtrante, a curva da velocidade de aproximação pode ser esboçada.

3.5. Monitoramento

As coletas eram feitas diariamente, e os parâmetros de controle monitorados foram: turbidez, cor aparente, cor verdadeira, oxigênio dissolvido, e vazões de entrada e saída do filtro. O funcionamento do sistema de lavagem automático e da bomba de alimentação também foi monitorado. Para turbidez, foi utilizado um turbidímetro HACH 2100P, e para cor, o espectrofotômetro HACH DR2800. As vazões foram medidas com proveta e cronômetro, e o oxigênio dissolvido foi aferido com a sonda multiparâmetros HACH HQ40D.

4. Resultados e discussão

Algumas das carreiras de filtração foram prejudicadas, visto que a bomba de alimentação sofreu avarias e necessitou ser desligada e removida para ser restaurada. Houve períodos em que o bombeamento era interrompido todos os dias, mesmo escorvando (movimento feito na tubulação manualmente para recalcar a água) constantemente. Diversas vezes a tubulação da bomba foi substituída, contudo continuou a apresentar os mesmos reveses. Presume-se que, diante de todas as hipóteses, o sistema de abastecimento é malpropício, incluindo a própria bomba de recalque. Por isto, sugere-se a substituição da tubulação e da bomba de alimentação.

Devido a estes obstáculos, algumas carreiras de filtração foram eliminadas, e supõe-se também que são responsáveis pelas carreiras longas. Atribui-se esta conjectura ao fato de que a interrupção da alimentação de água bruta interfere no funcionamento da filtração. A carga hidráulica se iguala à da saída do filtro, havendo uma interrupção do fluxo de água no leito filtrante.

O princípio da filtração lenta é sobretudo a retenção e processamento dos sólidos presentes na água, providenciados pela atividade biológica nas sucessivas camadas do leito filtrante e sobre ele (HUISMAN; WOOD, 1974). Com a ausência do fluxo de água, cessa o fornecimento de oxigênio e nutrientes, e os microrganismos consomem o que já está disponível. Sem o substrato da água, há competição e predação com conseqüente alteração da população do *Schmutzdecke*, além de desenvolver um ambiente anaeróbico, propício para potencializar o crescimento de um complexo biológico adverso, impróprio para a filtração lenta e para a subsistência da biomassa natural do filtro.

4.1. Qualidade da água bruta e água filtrada

4.1.1. Turbidez e cor aparente

A remoção obtida para valores de turbidez e cor aparente tiveram valores de quase 60% para ambos os parâmetros. Apesar disto, o padrão de potabilidade exige que 95% das amostras estejam com o valor da turbidez abaixo de 1 uT, e 100% abaixo de 2 uT. Quanto à cor aparente, 100% das amostras deve estar abaixo de 15 uH após a desinfecção (BRASIL, 2011). Os valores médios da água bruta e da água filtrada em cada carreira de filtração podem ser comparados nas Figura 8 e 9. As médias absolutas destes parâmetros em todas as carreiras consideradas são de 2,37 uT e 37 uH, respectivamente.

Figura 8: Turbidez média das carreiras de filtração

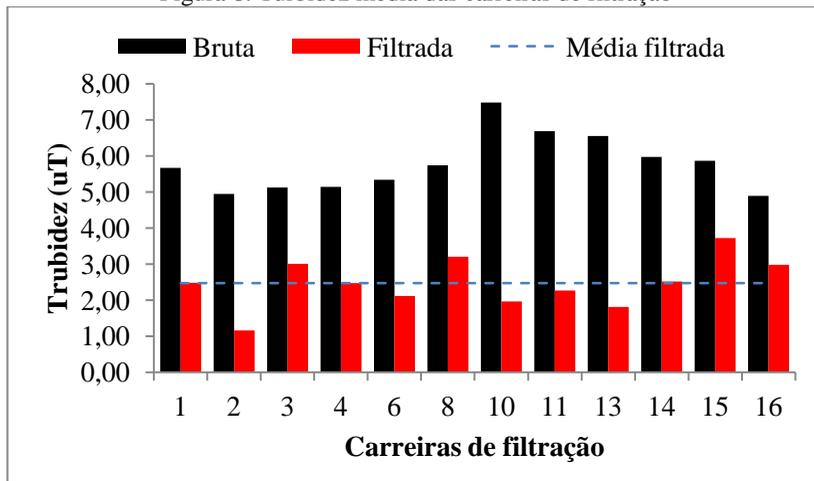
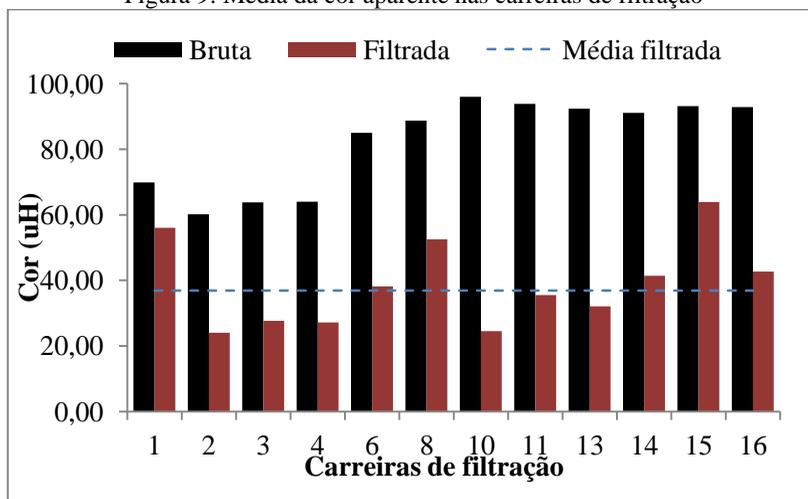


Figura 9: Média da cor aparente nas carreiras de filtração



Pizzolatti (2010) analisou um filtro lento retrolavável (FLR) com água filtrada. O objetivo da pesquisa era fazer uma comparação com um filtro lento convencional e com um filtro lento retrolavável com água bruta. Todos os filtros foram alimentados com a água bruta do mesmo manancial utilizado no presente estudo. O FLR foi operado até 2010 com diâmetro efetivo da areia de 0,55 mm e camada filtrante de 40cm. Posteriormente, o FLR voltou a ser estudado com granulometria da areia de 0,17 mm e 40cm de leito filtrante (PIZZOLATTI, 2014). Ishii (2013) também analisou os mesmos filtros, a fim de observar sua eficiência na remoção de parâmetros de qualidade da água.

De Souza et al (2016) avaliou a influência do diâmetro efetivo nos filtros lentos retrolaváveis, tendo utilizado meios filtrantes com os seguintes valores: FLR1 com 0,17 mm; FLR2 com 0,30 mm; e FLR3 com 0,53 mm. A água bruta utilizada nesses estudos também provinha da Lagoa do Peri, e as características construtivas e de projeto são semelhantes às deste trabalho. O FLR2, que possui 0,30 mm de diâmetro efetivo, é o filtro mais parecido com o FLRA, posto que, por meio de ensaio de granulometria, foi constatado que o diâmetro efetivo do meio filtrante do FLRA é 0,31, o que será explorado mais adiante neste trabalho.

Os valores médios de turbidez e cor aparente obtidos por Ishii (2013), Pizzolatti (2010; 2014), De Souza (2016), e o FLRA do presente estudo, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Médias da turbidez e cor aparente no FLRA e nos FLRs de Ishii, Pizzolatti e De Souza.

Filtro	Turbidez (uT)	Cor (uH)
Ishii	0,80	37
Pizzolatti (2010)	1,07	18
Pizzolatti (2014)	1,17	24
De Souza FLR 1	0,89	25
De Souza FLR 2	0,84	23
De Souza FLR 3	1,29	24
FLRA	2,37	37

FONTES: (DE SOUZA et al., 2016; ISHII, 2013; PIZZOLATTI, 2010, 2014)

Pode-se observar nos gráficos das Figura 8 e Figura 9 que quase a totalidade das médias amostrais se encontra em inconformidade com a exigência legal, tendo havido apenas breves períodos nos quais os resultados foram adequados. Na tabela acima, em comparação aos demais estudos, o FLRA apresentou remoção inexpressiva, uma vez que todos os valores exigidos estão bem próximos das situações avaliadas.

A desinfecção, última etapa do tratamento, pode gerar os chamados Subprodutos da Desinfecção (SPDs), sendo que alguns destes podem ser nocivos à saúde. Os trialometanos são subprodutos da desinfecção ligados a problemas de mutação genética, câncer, entre outros. A Lagoa do Peri possui Potencial de Formação de Trialometanos (PFTAM), devido à presença de material orgânico particulado (CARNEIRO, 2012). A matéria orgânica natural é um dos principais precursores dos subprodutos da desinfecção, e isso inclui a biomassa das algas, que são abundantes na Lagoa do Peri (BECKER, 2010). Assim, é necessário que seja removida nas etapas precedentes à desinfecção.

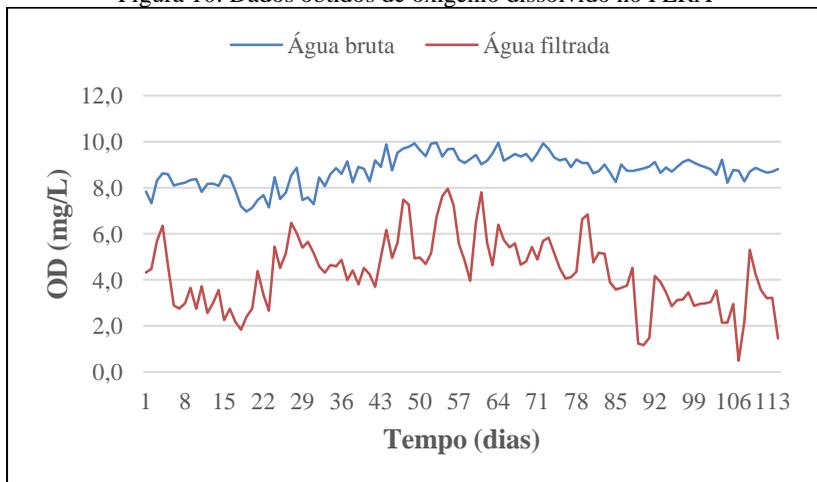
A Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde restringe a 0,1 mg/L o valor máximo de trialometanos total. O estudo de Carneiro (2012) mostra que o potencial de formação de trialometanos variou de 0,3 a 0,6 mg/L do inverno ao verão na Lagoa do Peri, indicando que a não remoção do material suspenso e dissolvido da referida água pode oferecer riscos à população. Nessa conjuntura, os valores alcançados pelo o FLRA de turbidez e cor sugerem que a sua água filtrada pode, também, ter precursores de trialometanos.

As algas, que são uma realidade na Lagoa do Peri, também são potenciais formadores de trialometanos, e algumas espécies de cianofíceas liberam toxinas na água, das quais o efeito vai de desordens gastrointestinais até a morte (DÍ BERNARDO et al., 1999). O aspecto físico, o sabor e o odor podem ser desagradáveis ao consumidor.

4.1.2. Oxigênio dissolvido

O oxigênio dissolvido (OD) é um indicador importante da atividade microbiológica, pois esta demanda consumo de oxigênio. Assim sendo, uma redução na quantidade de OD dá evidências do desenvolvimento e maturação do leito filtrante. Entretanto, não garante a sua qualidade, já que não especifica a qualidade da massa biológica, ou seja, se é propícia para filtração lenta. Os dados obtidos no FLRA de oxigênio dissolvido para água bruta e água filtrada são apresentados na Figura 10.

Figura 10: Dados obtidos de oxigênio dissolvido no FLRA

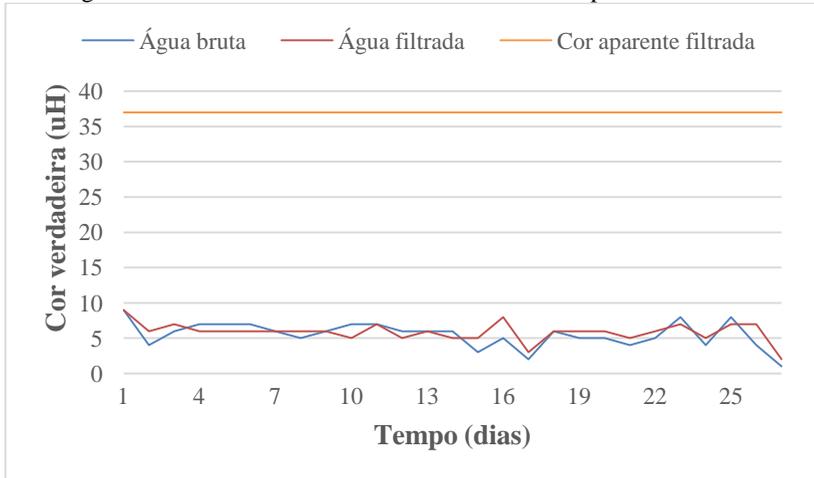


4.1.3. Cor verdadeira

A cor verdadeira indica, por alto, o percentual de sólidos dissolvidos da amostra. A cor aparente se deve, em parte, aos sólidos suspensos, que são representados pela turbidez. Desta maneira, as médias verificadas de 5,52 uH para água bruta e 5,89 uH para água filtrada, não deixam suspeita de que a cor aparente, com média de 37, se deve aos sólidos suspensos, principalmente ao fito plâncton, abundante na água da Lagoa do Peri e a baixa capacidade dos filtros lentos em

remover cor verdadeira. A Figura 11 mostra a comparação da média de cor aparente da água filtrada com a cor verdadeira da água bruta e da água filtrada do FLRA.

Figura 11: Dados de cor verdadeira e média da cor aparente do FLRA



4.2. Retrolavagem

4.2.1. Sistema automático

O sistema de retrolavagem foi testado e aperfeiçoado antes que o filtro entrasse em operação. A caixa de tombamento ofereceu algumas dificuldades relacionadas ao equilíbrio do peso da válvula interna e do peso de tombamento.

Soares (2008) relata que encontrou dificuldades no destombamento da caixa, visto que esta voltava lentamente à sua posição original. Assim, a caixa permanecia cheia com alguma quantidade de água, equilibrando o peso da caixa e impedindo o seu completo destombamento. Na primeira concepção do FLRA, a caixa de tombamento, que é mostrada na Figura 12, apresentou um problema semelhante, resolvido pela reformulação da caixa (Figura 13) e introduzindo um sifão para seu completo esvaziamento (tubo transparente). Ainda houve dificuldade pelo atrito que havia no sistema. Para tal mudou-se o equilíbrio de pesos interno e externo por meio de anilhas de ferro, acopladas ao cilindro interno. Então, por meio de testes, obteve-se o funcionamento adequado do sistema.

Figura 12: Primeira caixa de tombamento, posteriormente substituída



Figura 13: Caixa de tombamento reconstruída



Devido ao volume da segunda caixa, seu peso ficou elevado, mesmo seco. Ao tombar, cheio de água, ficava ainda mais pesado. Há

uma preocupação quanto à resistência desse sistema, pois em virtude de haver repetidas pancadas, ele pode não durar. Poder-se-ia ao invés da troca da caixa, idealizar um sistema interno engenhoso, que não necessite de muita força para ser ativado. Logo, a primeira caixa teria suficiente peso para ativar o sistema de lavagem.

Dentro do filtro, a vedação da saída de água foi feita primeiramente com um sistema de cilindro, mostrado na Figura 14. Neste momento, a primeira caixa de tombamento estava operativa. Vários testes foram realizados, e decidiu-se pela troca da caixa. Uma vez que foi encontrado dificuldade no equilíbrio de pesos da caixa e do cilindro, optou-se por instalar um segundo sistema de vedação, o qual já havia sido concebido. A Figura 15 mostra o segundo sistema fora do filtro, composto por um disco que ao deslizar por uma guia, vedaria o orifício de saída de água ao descer sobre o mesmo.

Ao ser verificado que não havia completa vedação, foi elaborado um terceiro sistema, que consistia em dois cilindros de cerca de 60mm. Um deles tinha o diâmetro ligeiramente maior e servia de guia ao outro, que deslizava livremente dentro do primeiro. O diâmetro da extremidade inferior do cilindro interno foi diminuído a fim de que o cilindro pudesse encaixar no orifício de saída de água. Acontecendo isso, a saída de água seria contida. Este sistema é mostrado na Figura 16.

Figura 14: Primeiro sistema de vedação testado

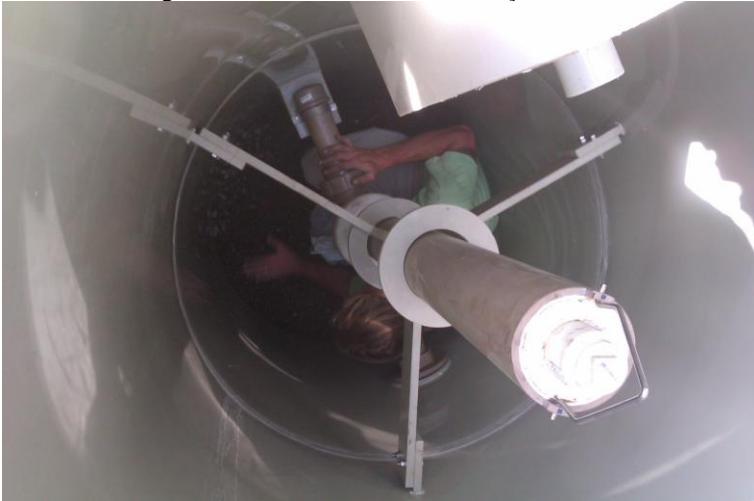


Figura 15: Segundo sistema de vedação testado



Figura 16: Terceiro sistema de vedação testado



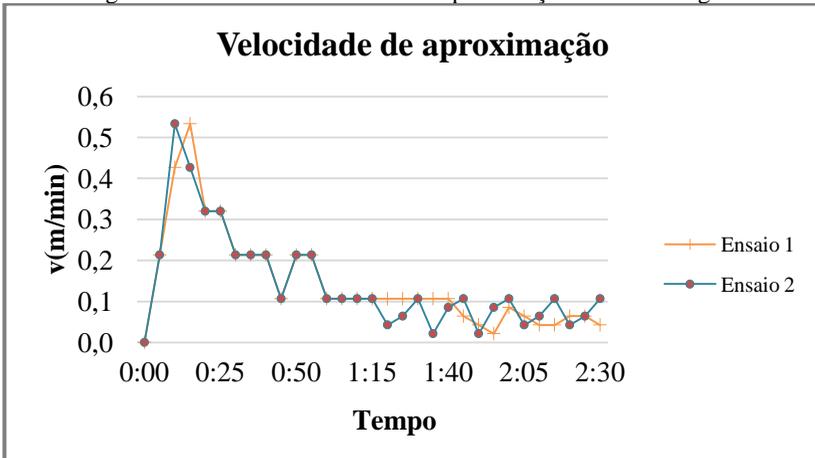
4.2.2. Limpeza do leito filtrante

A limpeza do filtro por retrolavagem acontece pelo fluxo ascendente de água no leito filtrante a uma velocidade suficiente para expandir a areia e fluidizá-la. Por meio de uma análise do volume utilizado no momento da retrolavagem, foi obtida a curva da velocidade de aproximação da água, mostrada na Figura 18. Os dados foram obtidos pela observação de um piezômetro que mede o nível do reservatório de água filtrada. As cotas foram registradas a cada 5 segundos a partir do início da retrolavagem. A Figura 17 mostra o piezômetro do reservatório.

Figura 17: Piezômetro do reservatório de água filtrada



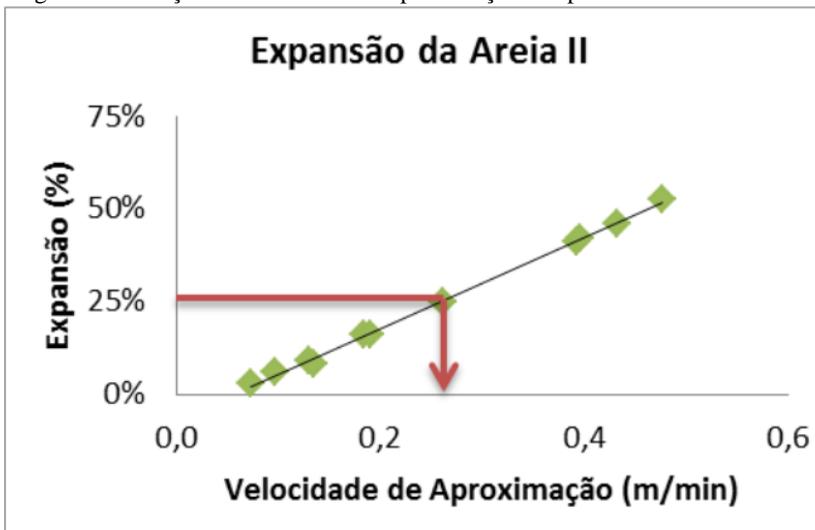
Figura 18: Curva da velocidade de aproximação na retrolavagem



Há um pico de vazão no início da retrolavagem devido à carga hidráulica ser máxima e ir diminuindo com o tempo. Observa-se que aos 2 minutos a velocidade é constante, sendo que a expansão do leito filtrante ocorre antes desse tempo. Desta maneira, conclui-se que a fluidização do leito filtrante e limpeza do mesmo ocorrem nos dois primeiros minutos, tempo necessário para a abertura e fechamento do sistema automático.

De Souza (2013) fez uma relação entre a velocidade de aproximação e a expansão do leito filtrante com areias de 0,17mm (areia 1), 0,30mm (areia 2), e 0,53mm (areia 3). A Figura 19 representa o resultado da areia 2 obtido pelo autor, de diâmetro efetivo de 0,30mm, próximo ao do FLRA. Pode-se verificar que a velocidade de 0,5 m/min, que se dá no pico da retrolavagem do FLRA, é suficiente para expandir a areia em, pelo menos, 50%. Portanto, é esperado que haja expansão e fluidização do leito filtrante do filtro na retrolavagem.

Figura 19: Relação da velocidade de aproximação e expansão do leito filtrante



FONTE: (SOUZA, 2013)

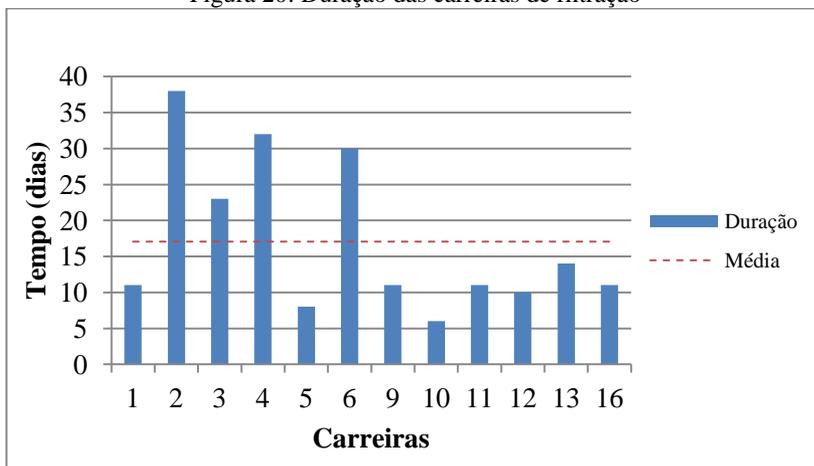
4.3. Carreiras de filtração

As carreiras de filtração são determinadas pelo tempo entre duas limpezas, nesse caso determinado pela perda de carga de 80 cm no meio filtrante, quando é acionado o sistema de lavagem. A duração das carreiras de filtração foi variável (Figura 20), e, embora tenha tido média de 11 dias para carreiras consideradas, houve carreiras com longa duração, de 20 a 31 dias, visto que De Souza et al (2016) obtiveram média de 4 dias e Poerch (2012) de 6 dias. Pizzolatti (2010) verificou valor médio de 13 dias para seu filtro lento retrolavável com dimensões similares às do FLRA, porém, com uma regularidade maior.

As já referidas interrupções na alimentação do filtro são uma especulação, e se de fato ocorriam, pode ter sido a causa da prorrogação de algumas carreiras de filtração. Por isso, reitera-se que haja um aperfeiçoamento do sistema de alimentação.

A existência de caminhos preferenciais no leito filtrante também foi cogitada, embora não tenha sido possível a observação. Outra hipótese é a existência de vazamento interno, porém seria impossível obter evidências concretas. Nestes casos, a alta turbidez da água bruta seria compreensível, pois haveria mistura da água bruta no reservatório de água filtrada.

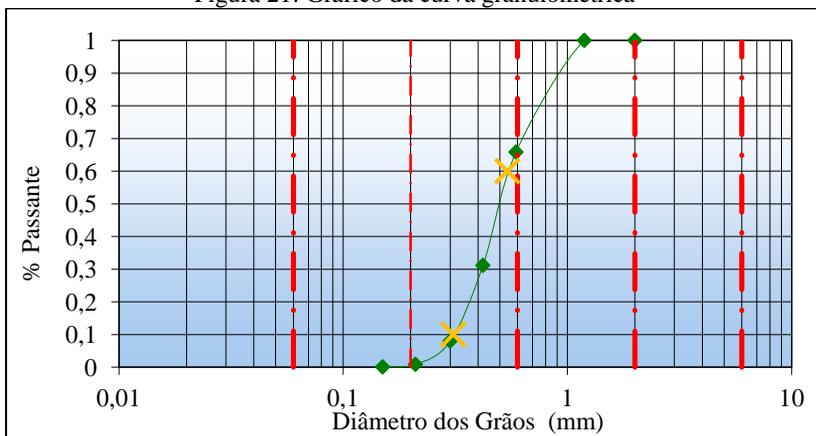
Figura 20: Duração das carreiras de filtração



4.3.1. Composição granulométrica

Em comparação com pesquisas similares, como Pizzolatti (2014, 2010), De Souza (2016), Ishii (2013), as características da areia do filtro foram indicadas como possíveis responsáveis pela diferença no resultado em termos de qualidade da água e duração de carreiras de filtração. Foram então feitos ensaios granulométricos com as areias do FLRA e do FLR de Pizzolatti (2014). O gráfico da Figura 21 apresenta a curva granulométrica da areia do FLRA. Os pontos em “X” projetam o diâmetro de abertura das malhas das peneiras.

Figura 21: Gráfico da curva granulométrica



O diâmetro efetivo (D10) equivale ao diâmetro pelo qual passa apenas 10% da amostra peneirada, e o D60 aponta o diâmetro pelo qual passa 60% da amostra. A uniformidade do tamanho dos grãos é obtida pela fração D_{60}/D_{10} , que equivale à sua amplitude de variação. Filtros lentos têm diâmetro efetivo de 0,25 a 0,35 e coeficiente de uniformidade menor que 3 (ABNT, 1992).

A Figura 22 mostra a curva resultante do ensaio granulométrico do FLR de Pizzolatti, e a Tabela 4 apresenta os valores obtidos das curvas.

Figura 22: Curva granulométrica do FLR de Pizzolatti

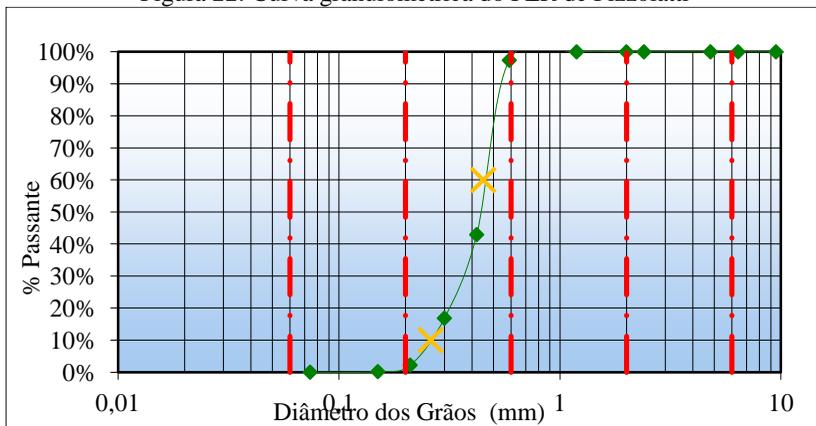


Tabela 4: Resultado do ensaio granulométrico para o FLRA

	FLRA	FLR
Diâmetro efetivo (D10)	0,31 mm	0,26 mm
D60	0,54 mm	0,45 mm
Coefficiente de uniformidade	1,74	1,73

4.4. Considerações finais

O suposto prejuízo na maturidade biológica do leito filtrante causado pelas interrupções da alimentação pode ser o causador dos eventos adversos. A granulometria da areia diferente da proposta em projeto, verificada pelo ensaio granulométrico também foi cogitada como sendo um fator influente nos resultados, mas isso não se evidencia pelos estudos feitos por De Souza (2016) e Pizzolatti (2010; 2014) (item 4.1.1, Tabela 3).

No item 4.2.2 é sugerido que a retrolavagem produziu uma fluidização do leito filtrante, promovendo a limpeza do mesmo. Isso também foi observado na prática pelo aspecto visual do início e do final da água de lavagem.

O sistema automático teve êxito em seu funcionamento no terceiro sistema que foi instalado, conforme item Sistema automático 4.2.1. Porém permaneceu uma desconfiança quanto à conservação da integridade do mesmo, em razão de que a cada retrolavagem a caixa de tombamento é acionada com uma forte pancada.

Outras hipóteses foram discutidas, como a quebra da barreira *Schmutzdecke*, provocada pela liberação de bolhas de oxigênio produzidas pelas algas. Isto não foi observado, além de que proliferação de algas é inviável em um filtro coberto devido à falta de luz. Além disso, a remoção de oxigênio dissolvido, vide item 4.1.2, indica que há predominância de microrganismos consumidores, e não produtores de oxigênio. A existência de caminhos preferenciais no leito filtrante, referida no item 4.3, pode ser o motivo das longas carreiras e da baixa remoção de turbidez e cor, embora não pudesse ser provada.

5. Conclusão e recomendações

Ao final deste trabalho, conclui-se que:

- O FLRA foi capaz de remover os parâmetros turbidez e cor, porém não atende às demandas da norma vigente;
- Houve um amadurecimento do leito filtrante, visto pela redução do oxigênio dissolvido da água;

- As carreiras de filtração foram longas, talvez devido às interrupções frequentes da alimentação do filtro;
- O diâmetro efetivo da areia não está relacionado às longas carreiras de filtração e à ineficiência na remoção de sólidos;
- A retrolavagem proporcionou a limpeza do leito filtrante, promovendo a expansão do mesmo;
- Foi alcançado o funcionamento do sistema automático, embora com ressalvas.

Para próximos estudos, recomenda-se observar criteriosamente o funcionamento da alimentação do filtro, e pesquisar as decorrências da interrupção da mesma. Ainda, idealizar novos sistemas simples e eficientes de automação da retrolavagem.

6. Referências bibliográficas

ABNT. **NBR 7217 Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro - Brasil, 1987.

ABNT. **NBR 12216 - Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro - Brasil, 1992.

ALLEY, E. R. **WATER QUALITY CONTROL HANDBOOK**. 2nd. ed. Alexandria, Virginia: Water Environment Federation, 2007.

BASTOS, S. Técnicas de manejo e Pré-tratamento no Manancial. p. 143–300, 2004.

BECKER, B. R. Proposta de Teste para Verificação da Formação de Trialometanos (TAM) em ETAs. p. 57, 2010.

BRASIL. **Ministério da Saúde - Portaria nº 2914, 12 de dezembro**, 2011.

CARNEIRO, C. G. Estudo do Potencial de Formação de Trialometanos da Lagoa do Peri, Florianópolis - SC. p. 86, 2012.

CISAM; AMVAP. Manual de Saneamento Rural. p. 408, 2006.

DE SOUZA, F. H. et al. Study of slow sand filtration with backwash and the influence of the filter media on the filter recovery and cleaning. **Environmental Technology**, v. 3330, n. February, p. 1–9, 2016.

DI BERNARDO, L. et al. **Tratamento de Águas de Abastecimento por Filtração em Múltiplas Etapas**. Primeira ed. São Paulo, Brasil: [s.n.].

EDZWALD, J. K. Water Quality and Treatment. v. 6, 2011a.

EDZWALD, J. K. Water Quality & Treatment - A Handbook on Drinking Water. 2011b.

EMMENDOERFER, M. L. **Filtração Lenta com Retrolavagem para propriedades rurais de uso familiar**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

HUISMAN, L.; WOOD, W. E. **Slow sand filtration**. Geneva: WHO, 1974.

IBGE. **Mapa da Densidade Demográfica no Brasil - Atlas do Censo Demográfico**, 2010. (Nota técnica).

ISHII, M. M. **Filtração Lenta com Retrolavagem para**

Tratamento de Água de Abastecimento. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Trabalho de Conclusão de Curso, 2013.

LOGSDON, G. S.; FOX, K. Getting your money ' s worth from filtration. n. C, 1982.

LOGSDON, G. S.; LIPPY, E. C. The role of filtration waterborne disease. 1982.

MARNOTO, M. J. et al. A influência da expansão da areia durante a retrolavagem na qualidade de água para abastecimento produzida por filtros lentos. 2008.

MURTHA, N.; HELLER, L.; LIBÂNIO, M. A filtração lenta em areia como alternativa tecnológica para o tratamento de águas de abastecimento no Brasil. **Congresso Brasileiro De ...**, p. 1542–1556, 1999.

NAKAMOTO, N. et al. **Progress in slow sand and alternative Biofiltration Processes.** [s.l.: s.n.].

PIZZOLATTI, B. S. **Estudos de limpeza de filtro lento por raspagem e retrolavagem.** 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).** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

POERSCH, F. C. DE A. **Sistema de Filtros Lentos Descendentes com Retrolavagem sem Reservatório Elevado.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

SILVA, E. R.; ZANCUL, J. DE S. Análise Da Dinâmica Demográfica Rural Brasileira Como Estratégia Na Formulação Da Política Federal De Saneamento Rural. n. Xviii, p. 1–22, 2012.

SOARES, M. B. D. **Desenvolvimento de um Sistema Mecânico Automático de Lavagem de Um Filtro Lento de Água de Abastecimento em Meio Rural.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

SOUZA, F. H. **Influencia do Diametro Efetivo do Meio Filtrante em Filtros Lentos Retrolavaveis.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

TIMMS, S.; SLADE, J. S.; FRICKER, C. R. Removal of

Cryptosporidium by slow sand filtration. **Water Science and Technology**, v. 31, n. 5-6, p. 81–84, 1995.

VALENCIA. **Filtracion Lenta**. [s.l: s.n.].