

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

BRUNO SEGALLA PIZZOLATTI

**ESTUDOS DE LIMPEZA DE FILTRO LENTO
POR RASPAGEM E RETROLAVAGEM**

Florianópolis, 2010.

BRUNO SEGALLA PIZZOLATTI

**ESTUDOS DE LIMPEZA DE FILTRO LENTO
POR RASPAGEM E RETROLAVAGEM**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título em Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Luiz Sens

Florianópolis
Março de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA

PIZZOLATTI, Bruno Segalla.

ESTUDOS DE LIMPEZA DE FILTRO LENTO POR RASPAGEM E RETROLAVAGEM. 120p.

Tratamento de água, Filtro lento, Limpeza, Retrolavagem

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PIZZOLATTI, Bruno S. ESTUDOS DE LIMPEZA DE FILTRO LENTO POR RASPAGEM E RETROLAVAGEM. 2010 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

**ESTUDOS DE LIMPEZA DE FILTRO LENTO
POR RASPAGEM E RETROLAVAGEM**

BRUNO SEGALLA PIZZOLATTI

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de:

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na área de Saneamento Ambiental.

Aprovada por:

Prof. Edson Pereira Tangerino, Dr.

Prof. Ramon Lucas Dalsasso, Dr.

Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.
(Coordenador do PPGEA)

Prof. Maurício Luiz Sens, Dr.
(Orientador)

FLORIANÓPOLIS, SC, BRASIL

Março/2010.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à meus pais, Moacir e Thais, que nunca pouparam esforços a fim de me oferecerem as melhores oportunidades de crescimento intelectual e moral. Sou muito grato a vocês por tudo que conquistei até hoje.

Ao meu irmão Marcos, pelo apoio e momentos de companheirismo, desde nossa infância até hoje.

Aos meus avós Orlando (*in memoriam*) e Dulce, Israel e Ilza pelo amor e carinho que sempre demonstraram por mim.

A toda minha família que sempre demonstraram preocupação e carinho.

A minha namorada Juliana, pela companhia, compreensão e amor durante estes nossos seis anos.

Ao amigo Marcus Bruno, parceiro desta pesquisa e com quem espero ter a oportunidade de trabalhar novamente em um futuro breve (*Viel Glück mein Bruder in Deutschland*).

Aos amigos de sempre Tiago, Andi e Gabriel pela amizade que sempre demonstraram.

Ao amigo Charles, pela amizade e companheirismo.

Aos amigos do programa de pós-graduação, em especial Carla, Cira, Cissa, Jacqueline, João Paulo, Lucila, Shuita, pela convivência nestes dois anos e pelos minutos de alegria durante o cafezinho das 16:00.

Aos amigos do LAPOÁ Beatriz, Bianca, Carol, Denise, Estela, Fernanda, Fernando, Luis, Nathalia, Renata e Zacarias.

Ao professor Mauricio Luiz Sens pela orientação e o apoio durante este trabalho.

Ao professor Ramon sempre disposto a discutir sobre os sistemas piloto e elucidar dúvidas.

A professora Roselane na ajuda com a contagem de fitoplâncton.

A CASAN (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento), à ETA da Lagoa do Peri e a todos os seus funcionários o apoio concedido.

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos membros da banca pelas contribuições para a melhoria deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
1. Introdução e Justificativa.....	1
2. Objetivos	5
2.1. Objetivo Geral.....	5
2.2. Objetivos Específicos.....	5
3. Revisão Bibliográfica.....	7
3.1. Histórico da filtração lenta.....	7
3.2. Filtros lentos.....	10
3.3. Princípios da filtração lenta.....	13
3.4. Limitações do filtro lento.....	17
3.5. Fatores que inibem a eficiência da filtração lenta.....	19
3.6. Limpeza de filtro lento.....	20
3.7. Vantagens X limitações	24
4. Metodologia	27
4.1. Considerações gerais.....	27
4.2. Localização do sistema piloto	28
4.3. Água de estudo.....	29
4.4. Dimensionamento dos sistemas piloto	30
4.5. Descrição e funcionamento dos sistemas piloto.....	37
4.5.1. Filtração lenta com limpeza convencional - Sistema 1	40
4.5.2. Filtração lenta retrolavável - Sistema 2.....	41
4.5.3. Filtração lenta retrolavável com água bruta - Sistema 3 ...	43

4.6.	Implantação dos sistemas piloto.....	46
4.7.	Parâmetros monitorados.....	48
4.7.1.	<i>Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos</i>	48
4.7.2.	<i>Parâmetros operacionais</i>	50
4.8.	Análise estatística do sistema.....	53
5.	Resultados e discussões.....	55
5.1.	Caracterização da água bruta	55
5.2.	Ensaio preliminar: aferição da expansão do material filtrante	62
5.3.	Duração das carreiras de filtração e perda de carga	64
5.4.	Avaliação da limpeza dos filtros	69
5.5.	Qualidade da água após limpeza	74
5.6.	Qualidade da água filtrada	76
5.7.	Avaliação estatística do sistema.....	83
6.	Conclusões e recomendações	87
7.	Referências bibliográficas	91
	Apêndices.....	99

RESUMO

Este trabalho pretendeu desenvolver e aprimorar a tecnologia da filtração lenta retrolavável no tratamento de água de lago com vistas a suprir as necessidades de consumo humano. Com a adoção da retrolavagem em filtro lento, pode-se ampliar as opções de sistemas de tratamento que apresentam operação facilitada. O objetivo da pesquisa foi avaliar uma alternativa de fornecimento de água adequada para o consumo humano, especialmente em propriedades isoladas, bem como avaliar a eficiência dos filtros submetidos a retrolavagem. O manancial de estudo está localizado no Sul da Ilha de Santa Catarina. Foram construídos três sistemas pilotos em paralelo, sendo eles; filtro lento com limpeza convencional (sistema 1); filtro lento retrolavável com água filtrada (sistema 2); filtro lento retrolavável com água bruta (sistema 3). Os três filtros são cobertos, de escoamento descendente, operaram com taxa de filtração de $4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ e carga hidráulica variável. A limpeza convencional foi realizada no sistema 1, enquanto que nos sistemas 2 e 3 a limpeza foi realizada através de retrolavagem com expansão média de 10%. Durante o trabalho foi realizado: a caracterização da água bruta, dimensionamento dos sistemas piloto, desenvolvimento de um filtro lento retrolavável com água bruta, e avaliação dos diferentes tipos de limpeza nos filtros estudados. Durante o tempo de monitoramento dos sistemas foram realizadas nove carreiras de filtração válidas, com duração média de 13 dias para os sistemas. Estatisticamente o sistema 1 obteve melhor desempenho em termos de remoção de parâmetros de qualidade, produzindo efluente final com turbidez e cor aparente médias de $0,93 \pm 0,36 \text{ uT}$ e $15 \pm 8 \text{ uH}$, respectivamente, alcançando na remoção destes parâmetros percentagens de $81,67 \pm 2,83$ (turbidez) e $76,56 \pm 4,07$ (cor aparente). Contudo do ponto de vista operacional o sistema 2, com eficiência de remoção (em %) de $79,33 \pm 3,09$ (turbidez) e $73,11 \pm 5,64$ (cor aparente), se demonstrou mais atrativo, tendo em vista a forma de limpeza. A interpretação dos resultados obtidos, em termos de perda de carga no meio filtrante, sugerem mudanças na concepção de desenho dos sistemas 2 e 3. Em função dos resultados obtidos, pode-se considerar que o trabalho contribui para facilitar a operação de filtros lentos o que pode resultar no aumento do uso desta tecnologia principalmente em comunidades isoladas, desprovidas de tratamento e abastecimento público de água.

Palavras-chave: tratamento de água, filtro lento, limpeza, retrolavagem.

ABSTRACT

This study aimed to develop the backwashed slow sand filtration technology in treatment of lake water to solve the needs of human consumption. Using backwash filter, expected to find options for water treatment systems with easy operation. The objective of this research is to seek an alternative supply of potable water for human consumption in isolated areas, evaluating the effectiveness of filters subjected to backwash. The source is located in a lake located in the southern island of Santa Catarina, Brazil. We constructed three pilot systems: slow sand filter system with conventional cleaning (1); backwashed slow sand filter with filtered water system (2); backwashed slow sand filter with raw water system (3), the filters are covered, downflow, operate with filtration rate of $4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ and hydraulic load variable. The conventional filter was cleaning by scraping, and other two systems were cleaned by backwash with average expansion of 10%. During the work was done: the characterization of the raw water, design of pilot system, development of a backwash slow sand filter with raw water, and evaluation of three different types of cleaning. During the monitoring were carried out nine filtration runs with average of 13 days. Statistically, the system 1 was performed better in terms of water quality parameters, producing final effluent with turbidity and apparent color averages of 0.93 ± 0.36 NTU and 15 ± 8 CU, respectively, achieving percentage removal of 81.67 ± 2.83 (turbidity) and 76.56 ± 4.07 (apparent color). However in terms of maintenance the system 2, with percentage removal efficiency of 79.33 ± 3.09 (turbidity) and 73.11 ± 5.64 (apparent color), showed himself more attractive. The interpretation of the results suggests changes in the design of the backwashed filters studied. This work helps to facilitate the operation of slow sand filters, and could result in an increased use of this technology in isolated communities which have no treatment and supply of drinking water.

Keywords: water treatment, slow sand filter, filter cleaning, backwash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arranjo de filtro lento com nível de água constante.....	10
Figura 2 - Arranjo de filtro lento com nível de água variável.....	11
Figura 3 - Adesão e desprendimento de partículas durante a filtração..	14
Figura 4 - Mecanismos de transporte da filtração	15
Figura 5 - Equipamento de limpeza de filtro lento in loco.....	22
Figura 6 - Esquema do tratamento	27
Figura 7 - Localização da Lagoa do Peri.....	28
Figura 8 - Poço de captação e bomba centrífuga.....	29
Figura 9 - Expansão (a) e Perda de Carga (b) x vel. de aproximação da água	31
Figura 10 - Configuração do sistema de retrolavagem com água filtrada	33
Figura 11 - Configuração do sistema de retrolavagem com água bruta	34
Figura 12 - Foto do conjunto dos três sistemas piloto de tratamento por filtração lenta.....	37
Figura 13 - Desenho esquemático de disposição dos filtros, vista em planta.....	38
Figura 14 - Foto da câmara de nível constante.....	39
Figura 15 - Esquema da composição da camada suporte e meio filtrante	39
Figura 16 - Esquema do filtro FLC em operação	40
Figura 17 - Esquema do filtro FLR em operação	41
Figura 18 - Esquema da lavagem do filtro FLR.....	42
Figura 19 - Esquema do filtro FLRb em operação	43
Figura 20 - Esquema da lavagem do filtro FLRb	44
Figura 21 – Foto do tampão do tubo central do FLRb	45

Figura 22 - Foto do tubo igualador de pressão (suspiro).....	45
Figura 23 - Foto do interior do filtro FLC.....	46
Figura 24 - Foto do interior do filtro FLR.....	46
Figura 25 - Foto do interior do filtro FLRb.....	47
Figura 26 - Foto da aferição volumétrica da vazão.....	50
Figura 27 - Esquema da leitura da carga hidráulica e perda de carga no meio filtrante.....	51
Figura 28 - Equipamento para aferir a expansão do meio filtrante.....	52
Figura 29 - Box-Whiskers Coliformes totais.....	57
Figura 30 - Box-Whiskers Cor verdadeira.....	57
Figura 31 - Box-Whiskers Densidade de fitoplâncton.....	58
Figura 32 - Box-Whiskers E. coli.....	58
Figura 33 - Box-Whiskers Ferro total.....	59
Figura 34 - Box-Whiskers Turbidez.....	59
Figura 35 - Curva granulométrica.....	62
Figura 36 - Desenvolvimento da perda de carga na 2ª carreira de filtração.....	65
Figura 37 - Desenvolvimento da perda de carga na 5ª carreira de filtração.....	65
Figura 38 - Carga hidráulica e perda de carga no FLRb, 8ª carreira de filtração.....	66
Figura 39 - Desenvolvimento da perda de carga na 7ª carreira de filtração.....	67
Figura 40 - Perda de carga durante as nove carreiras de filtração.....	68
Figura 41 - Foto do filtro FLC após raspagem da camada biológica....	69
Figura 42 - Turbidez durante a retrolavagem na 3ª carreira de filtração	70
Figura 43 - Turbidez durante a retrolavagem na 7ª carreira de filtração	71
Figura 44 - Possível distribuição da água durante a retrolavagem do FLRb.....	72

Figura 45 - Filtro FLRb e piezômetro auxiliar instalado.....	72
Figura 46 - Representação do filtro FLR após a retrolavagem.....	73
Figura 47 - Turbidez após a lavagem dos filtros início da 4ª carreira de filtração	74
Figura 48 - Cor aparente após a lavagem dos filtros início da 4ª carreira de filtração.....	75
Figura 49 - Médias das medidas de cor aparente durante as carreiras de filtração	80
Figura 50 - Médias das leituras de turbidez durante as carreiras de filtração	81
Figura 51 - Diferenças dos valores individuais (cor aparente).....	84
Figura 52 - Diferenças dos valores individuais (turbidez)	85
Figura 53 - Diferenças dos valores individuais (carreira de filtração) ..	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características usuais da areia de filtros lentos.....	11
Tabela 2 - Valores recomendados de água bruta para uso da filtração lenta.....	17
Tabela 3 - Variáveis que alteram a eficiência do filtro lento.....	19
Tabela 4 - Comprimento equivalentes (m) em peças de P.V.C rígido ou cobre.....	35
Tabela 5 - Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos analisados	49
Tabela 6 - Caracterização da água bruta	56
Tabela 7 - Duração das carreiras de filtração válidas.....	64
Tabela 8 - Resultado do monitoramento dos filtros	77
Tabela 9 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação de <i>Pearson</i> 83	
Tabela 10 - Teste t-pareado cor aparente	84
Tabela 11 - Teste t-pareado turbidez.....	85
Tabela 12 - Teste t-pareado tempo de carreira	86

1. Introdução e Justificativa

O tratamento e distribuição de água potável em locais isolados muitas vezes são deficientes. Água de qualidade é necessária não somente para o consumo humano como também para atividades domésticas e agropecuárias. Diante deste cenário é de fundamental importância a busca por tecnologias para garantir o fornecimento de água de qualidade a esta parcela da população.

A configuração da ocupação do território rural faz com que muitas vezes pequenas comunidades sejam desprovidas de tratamento e abastecimento de água. Diversas soluções tecnológicas são utilizadas para suprir esta demanda como: domiciliar (coleta e armazenamento de água de chuva), coletiva (uma torneira comunitária para uma quantidade de residências) e convencional (abastecimento de água em cada residência através de rede de abastecimento).

Os filtros lentos podem fazer parte, de sistemas individuais, coletivos ou convencionais, dependendo de como estes são dimensionados. Nas comunidades rurais os filtros lentos podem ser de grande utilidade, devido à simples operação e dependendo condição topográfica da região por não necessitar de energia elétrica. Nesta técnica não se adiciona produtos químicos o que facilita e reduz os custos de implantação, operação e diminui o risco de formação de subprodutos.

A filtração lenta é basicamente a passagem da água por um meio poroso (geralmente areia), de forma controlada dando condições para que os mecanismos responsáveis pela remoção das partículas (transporte, aderência e processos microbiológicos) atuem de forma eficaz. A operação de um filtro lento consiste basicamente em controle de vazão e limpeza do leito filtrante ao final da carreira de filtração. Geralmente na filtração lenta, a limpeza do meio filtrante é realizada através da raspagem da camada biológica e de alguns centímetros do material filtrante.

Os filtros lentos quando utilizados como solução individual ou coletiva, ganham dimensões menores o que pode permitir um filtro lento em uma residência. Para facilitar a operação desta tecnologia propõe-se neste trabalho, uma maneira alternativa de lavar o meio filtrante, através da retrolavagem. Desta forma é possível com a abertura de válvulas executar a limpeza periódica do filtro. A não necessidade de retirar parte da areia para limpeza, que é um processo muito dispendioso e muitas vezes afastam potenciais usuários, diminui o tempo gasto com a limpeza, dispensa uma unidade de recuperação de areia e reduz o tempo que o filtro não produz água.

Este projeto de pesquisa tem por objetivo aplicar a tecnologia de filtração lenta para tratamento de água de lago, obtendo água de qualidade para o consumo humano em especial nas propriedades rurais e comunidades isoladas, que muitas vezes dispõem deste tipo de manancial. É de extrema importância a adoção de alternativas, pois dificilmente as Estações de Tratamento de Água (ETA's) atendem localidades isoladas.

O projeto de pesquisa foi desenvolvido na Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri em Florianópolis, onde três filtros foram instalados, e alimentados com a mesma água bruta utilizada pela estação de tratamento no abastecimento do Sul da ilha de Santa Catarina. Em cada filtro lento a limpeza é realizada de forma diferenciada, sendo um de maneira convencional (raspagem) e dois por retrolavagem, utilizando água filtrada pelo próprio filtro e outro com água bruta.

A limpeza dos filtros uma etapa de fundamental importância para a garantia de produção de água tratada de qualidade, portanto, a avaliação de diferentes métodos de limpeza do meio filtrante deve vir a contribuir neste sentido.

Neste contexto, a tecnologia proposta poderá suprir a demanda, tanto em qualidade quanto quantidade, nas situações como as apresentadas acima, pois ao passar pela filtração lenta, espera-se que a água alcance os padrões mínimos exigidos na Portaria nº 518 de 2004 do Ministério da Saúde que estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e das outras providências.

Assim, a pesquisa tem como propósito estudar filtração lenta e comparar a eficiência de diferentes concepções de lavagem de filtro

lento, buscando um tratamento de baixo custo e fácil operação para a potabilização de água.

Quando se propõe a retrolavagem com água bruta, além da altura do filtro diminuir consideravelmente, objetiva-se acelerar o processo de formação da camada biológica, obtendo assim água de qualidade em menor tempo.

Este trabalho trata-se da continuação de estudos na linha de pesquisa de Tratamento de águas e de efluentes líquidos domésticos e industriais, coordenados pelo Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOÁ), sob a supervisão do professor Mauricio Luiz Sens. O Laboratório realiza estudos de tecnologias convencionais e não convencionais de tratamento de água de abastecimento, com propostas de fornecimento de água de qualidade nas mais diversas situações.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho objetiva avaliar a eficiência de diferentes concepções de limpeza de filtro lento, visando um tratamento de fácil manutenção para a potabilização de água, utilizando como água de estudo uma lagoa com elevada concentração de fitoplâncton.

2.2. Objetivos Específicos

- Implantar sistema piloto de filtração lenta convencional, filtração lenta retrolavável com água filtrada;
- Desenvolver sistema de limpeza de filtro lento com retrolavagem com água bruta;
- Estudar as diferentes concepções de lavagem dos filtros lentos para redução de parâmetros de qualidade de água;
- Avaliar desempenho dos filtros lentos quanto ao tempo de carreira de filtração.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Histórico da filtração lenta

Segundo USEPA (2000), registros antigos, de civilizações que residiam próximo de fontes de água (lagos e rios), já relatavam a ocorrência de sabor, odor e aparência desagradável da água. Milhares de anos se passaram e em 4000 a.C se tem os primeiros registros escritos da utilização de métodos, dentre eles a filtração, para a remoção de cor, sabor e odor da água. No texto em sânscrito Ousruta Sanghita, é recomendado que a *“água impura deve ser purificada pela fervura em fogo ou aquecida ao sol, ou mergulhada na água uma barra de cobre aquecida, ou purificada pela filtração em areia e pedregulho e posteriormente resfriada”* (CEBALLOS; DANIEL; BASTOS, 2009).

Por volta de 1700 d.C., a filtração se estabelece como meio eficiente para remoção das partículas suspensas na água, embora o grau de clarificação da água ainda não fosse mensurado na época (USEPA, 2000). Em 1703, o cientista francês Phillippe La Hire propôs a utilização de filtro de areia e cisterna para tratamento domiciliar da água. Outro cientista francês Joseph Amy patenteou em 1746 o primeiro desenho de filtro, que era basicamente composto de esponja e areia com uma variedade de configurações. No final deste século, a água começa a ser vendida em pequena escala. O arquiteto britânico James Peacock, por sua vez patenteou, em 1971, um filtro de fluxo ascendente composto por três tanques, sendo a limpeza realizada com a inversão do fluxo (RIWRB, 2009).

Até então, a filtração era utilizada apenas para melhorar a qualidade estética da água. Entretanto, por volta de 1800, cientistas começam a perceber a relação entre a água de má qualidade com as doenças causadas na população, sendo a partir de então o tratamento da água realizado também para prevenir doenças (RIWRB, 2009).

No início de 1800 a filtração lenta começava a ser regularmente utilizada na Europa. Um dos primeiros registros do uso da filtração lenta para tratamento de água para abastecimento público data de 1829, quando James Simpson construiu uma instalação para tratar a água fornecida pela *Chelsea Water Company*, em Londres. Por volta de 1852, esta prática está bem estabilizada e suas vantagens são evidentes (WHO, 1974). No ano de 1832 foi construída em Richmond, nos Estados Unidos, uma estação de tratamento que atendia 295 consumidores. Os filtros lentos foram introduzidos em Massachusetts em meados de 1870 (RIWRB, 2009).

De 1874 a 1907, diversos filtros lentos foram projetados e instalados em Poughkeepsie, Hudson, Nova Jersey, Nova Milfor, St. Johnsbury, Burlington e Keokuk, Lewiston e Stillwater, Golden, Pawtucket e Storm Lake. Em 1904, foram instalados filtros de escoamento descendente em Battlesville e em 1907, em Nova York e sua limpeza era realizada por contra fluxo, tendo-se como meio filtrante pedra, carvão, areia ou combinações desses materiais. Na época, a ineficiência desse método de limpeza contribuiu com a desativação das instalações nos Estados Unidos (CEBALLOS; DANIEL; BASTOS, 2009).

Durante o final do século XIX e início do século XX, a preocupação em relação à qualidade da água de abastecimento concentrou-se na presença de microorganismos capazes de induzir a transmissão de doenças. Descobriu-se então, que a turbidez não é somente um parâmetro estético, pois a matéria em suspensão pode abrigar organismos patogênicos, organismos que vinham provocando febre tifóide, disenteria, cólera e demais doenças de veiculação hídrica (USEPA, 2000).

A filtração lenta tem o diferencial do tratamento biológico, que possibilita a esta técnica a redução e remoção de patógenos. Também tem a característica de ser uma técnica que utiliza pouco ou nenhum produto químico, o que diminui os riscos de formação de subprodutos. Atualmente, diversas localidades no mundo utilizam esta técnica para o tratamento da água de abastecimento como: Londres (Inglaterra), Paris (França), Amsterdã (Holanda), Zurique (Suíça), entre outras.

No Brasil, são poucas as unidades de filtração lenta, e geralmente são operadas por serviços autônomos municipais ou pela Fundação Nacional de Saúde, sem o adequado monitoramento dos parâmetros de

qualidade das águas bruta e tratada (MURTHA; HELLER; LIBÂNIO, 1997).

Por ser uma técnica relativamente simples, que não requer o uso de produtos químicos, segundo Murtha e Heller (2003), o filtro lento pode ser uma alternativa para o tratamento de águas de abastecimento em comunidades de pequeno e médio portes, representando uma potencial melhoria dos indicadores sanitários e de saúde pública no país. A esta técnica são atribuídas vantagens como: facilidade operacional, baixos custos de implantação e operação e grande eficiência na remoção de sólidos e organismos patogênicos.

Filtros lentos de areia têm uma longa história de sucesso no tratamento da água, quando aplicado à fonte apropriada, construído e operado adequadamente. Utilizações mal sucedidas têm acontecido e continuarão a ocorrer, por falha de projeto ou quando os princípios básicos de funcionamento são ignorados (LOGSDON, 2002).

3.2. Filtros lentos

Caracterizados por operar com taxa de filtração de 20 a 50 vezes menores que os filtros rápidos (HUISMAN, 1974), os filtros lentos utilizam taxas de filtração variando de 2 a 14 m³/m².dia. Utilizado taxas de filtração baixas, os filtros desenvolvem carreiras de filtração longas, chegando até 60 dias, sem comprometer a qualidade da água filtrada (MEDINA, 2000). Estes podem ser de três tipos: filtro lento descendente, ascendente e filtro lento dinâmico (COSTA, 1980).

Os filtros lentos descendentes são compostos basicamente de um tanque com controlador de vazão, camada filtrante, camada suporte, sistema de drenagem, tubulação de descarga do sobrenadante, tubulações, válvulas e acessórios de saída (HUISMAN, 1974). Tais filtros podem operar com coluna de água constante ou variável, conforme apresentado nas Figuras 1 e 2 respectivamente. Segundo Di Bernardo, Brandão e Heller (1999), a eficiência dos dois modos de operação é equivalente, sendo o filtro que opera com coluna de água variável preferível do ponto de vista econômico e operacional.

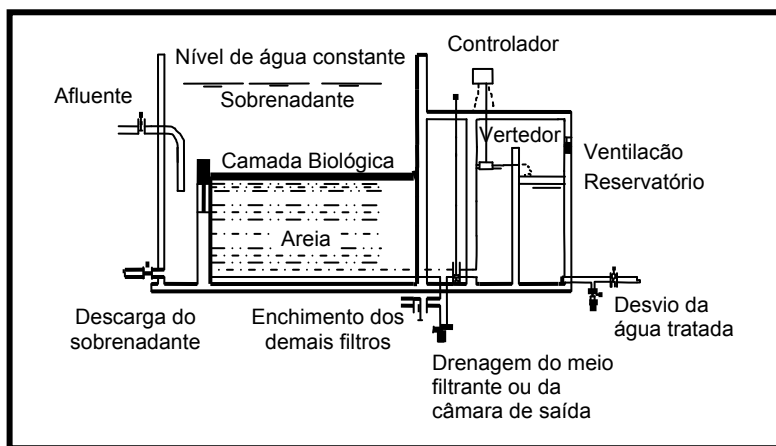


Figura 1 - Arranjo de filtro lento com nível de água constante
Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005).

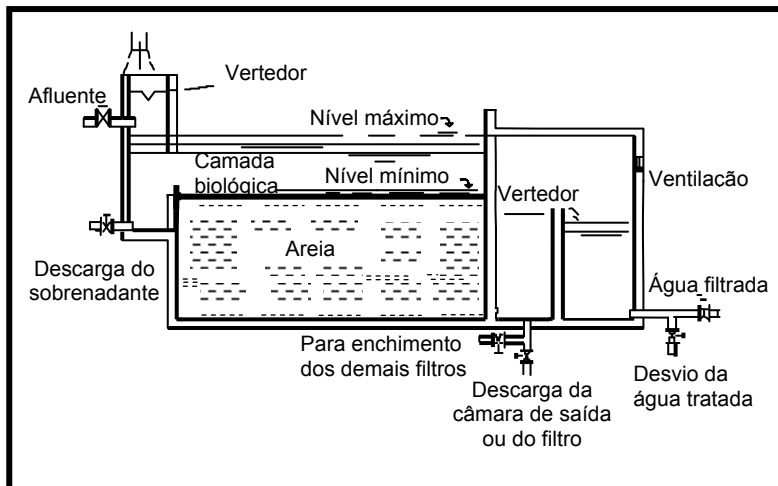


Figura 2 - Arranjo de filtro lento com nível de água variável
 Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005).

Os filtros lentos são tradicionalmente concebidos com camada de areia de 1 m de altura, diâmetro efetivo (d_{10}) entre 0,15 e 0,35 mm e coeficiente de desuniformidade (d_{60}/d_{10}) deve estar entre 5 e 3, preferencialmente inferior a 3 (LOGSDON et al., 2002). Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), após pesquisas realizadas com diferentes granulometrias de areia, chegou-se a conclusão sobre as características do meio filtrante mais eficiente. A Tabela 1 apresenta os parâmetros e valores usuais utilizados para a camada filtrante de um filtro lento.

Tabela 1 - Características usuais da areia de filtros lentos

Parâmetro	Valor usual
Espessura da camada (m)	0,6 a 0,9
Tamanho dos grãos (mm)	0,104 a 1,0
Coeficiente de desuniformidade	2 a 4
Tamanho efetivo (mm)	0,15 a 0,30
Coeficiente de esfericidade	0,7 a 0,8
Porosidade inicial	0,38 a 0,40
Massa específica (t/m^3)	2,6 a 2,7

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005).

Um parâmetro de projeto importante a ser considerado nos filtros lentos, é referente a perda de carga aplicada sobre o leito filtrante, que tem ligação direta com o tempo de carreira de filtração. Dependendo da qualidade da água bruta, uma perda de carga de 1,0 a 1,5 m resulta em carreira com duração geralmente superior a 30 dias (DI BERNADO; DANTAS, 2005).

A operação de filtros lentos não exige mão de obra técnica avançada. São considerados por diversos autores uma excelente alternativa para o fornecimento de água potável em comunidades rurais e/ou isoladas, quando se dispõe de um manancial passível de tratamento com esta técnica. É de fácil operação, pois na grande maioria das vezes não se utilizam produtos químicos na água bruta, entretanto é de fundamental importância o cuidado com a vazão aplicada ao filtro, para garantir a taxa de filtração que foi projetada para o filtro. Costa (1980) ressalta que se a taxa de filtração diminui rapidamente, a eficiência do tratamento será afetada, uma vez que a pressão no leito filtrante aumenta, provocando bolhas de ar no mesmo, as quais tendem a sair do meio filtrante formando caminhos preferenciais o que pode resultar em um tratamento ineficiente.

Os filtros lentos também podem ser cobertos ou descobertos, sendo usualmente descobertos. Entretanto, em alguns casos, a cobertura é uma proteção para minimizar problemas de congelamento da água em regiões muito frias, e em regiões quentes a cobertura é utilizada para minimizar a ação dos raios solares, desta maneira reduzindo o crescimento das algas (PÁDUA et al., 2006).

3.3. Princípios da filtração lenta

A filtração lenta é um tratamento que quando projetado e aplicado em situações corretas, mostra-se bastante eficaz. É um processo que não necessita adição de coagulante, trabalha com taxas de filtração baixas e utiliza meio filtrante de granulometria fina. Com a utilização de baixas taxas de filtração a água permanece por um maior tempo sobre o leito filtrante, o que favorece uma intensa atividade biológica no filtro lento e garante a produção de água com qualidade apropriada para uma posterior desinfecção (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999).

Também conhecida como filtração biológica, a filtração lenta consiste na passagem de água bruta por um meio poroso, freqüentemente areia. Durante a filtração, as impurezas entram em contato com a superfície das partículas do meio filtrante e são retidas. As partículas retidas no filtro lento podem ser até 100 vezes menores que o espaço entre os grãos do meio filtrante, sendo a retenção de partículas, dessa forma, explicada por diversas ações que ocorrem durante a filtração (COSTA 1980). Durante a filtração lenta ocorrem simultaneamente ações físicas, químicas e biológicas (VARGAS, 1992; WEBER-SHIRK; DICK, 1997b).

No decorrer de uma carreira de filtração podem ser observadas quatro etapas distintas que têm ligação direta com a qualidade da água produzida e da evolução da perda de carga: 1ª período de maturação com melhora progressiva da qualidade da água; 2ª fase de máxima eficiência; 3ª ponto de ruptura começa ocorrer transpasse de flocos e a qualidade supera o valor crítico; 4ª etapa de degradação progressiva da qualidade, até atingir um estágio de estabilização (Dalsasso, 2005).

Segundo Costa (1980) e Sá (2006), no tratamento de água por filtração lenta, são três os mecanismos responsáveis pela remoção das partículas: transporte, aderência e processos microbiológicos. Os mecanismos com que a partículas em suspensão são removidas por meio de filtração são influenciados pelas características físicas e químicas das partículas, do meio filtrante, da taxa de filtração, das características químicas da água e da maneira de operação do filtro (AMIRTHARAJAH, 1988).

Conforme ilustrado na Figura 3, durante a filtração, as partículas a serem removidas precisam atravessar as linhas de fluxo de modo que fiquem próximas o suficiente dos grãos de areia (no caso de filtração em areia) para que possam ser coletadas. As partículas removidas pelos grãos do filtro tendem a se acumular formando depósitos das mais diversas geometrias, de acordo com a forma das partículas e dos grãos de areia. Estes depósitos reduzem o espaço entre os grãos (também denominados coletores), aumentando, desta forma, a velocidade de escoamento pelas linhas de fluxo, uma vez que taxa de filtração permanece constante. O aumento da velocidade pode fazer com que as partículas anteriormente aderidas se desprendam, sendo estas aderidas em um grão próximo. Os fenômenos de adesão e desprendimento ocorrem simultaneamente (AMIRTHARAJAH, 1988; DALSASSO, 2005).

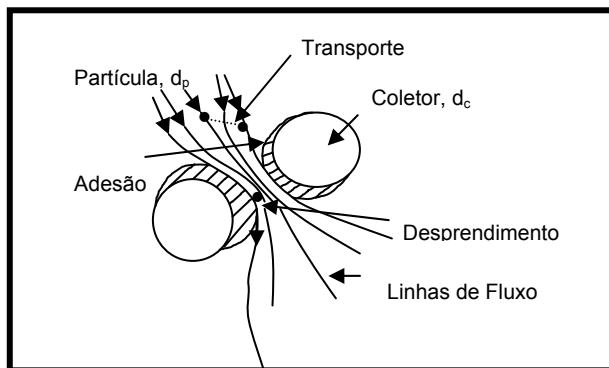


Figura 3 - Adesão e desprendimento de partículas durante a filtração
Fonte: Amirtharajah (1988).

No que se refere aos mecanismos de transporte, as atividades que mais se destacam são: ação física de coar, sedimentação, difusão, impacto inercial, interceptação e ação hidrodinâmica. Na filtração de água os três primeiros mecanismos são predominantes (AMIRTHARAJAH, 1988; SÁ, 2006). A Figura 4 demonstra sistematicamente os mecanismos de transporte da filtração e o movimento das partículas nas linhas de fluxo e sua interceptação no coletor.

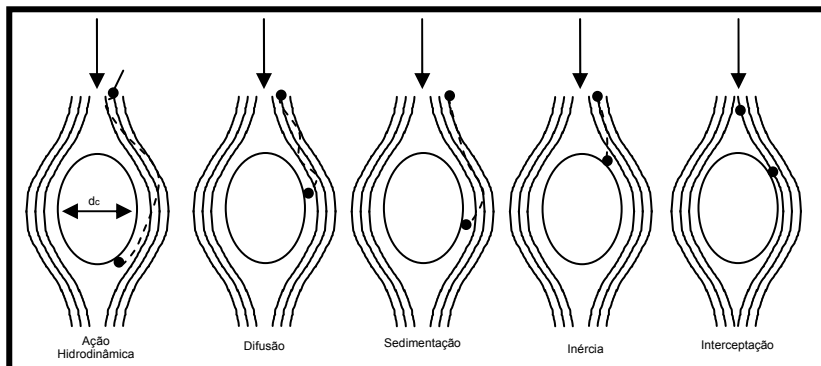


Figura 4 - Mecanismos de transporte da filtração

Fonte: Amirtharajah (1988).

Segundo Dalsasso (2005), na ação hidrodinâmica as partículas em suspensão possuem gradiente de velocidade diferente de zero e suas extremidades estão sujeitas a velocidades tangenciais diferentes das do centro de gravidade da partícula, fazendo-as girar, produzindo uma diferença de pressão na direção perpendicular à do escoamento, resultando numa força que as conduz para a região de menor velocidade, de modo que elas podem ser transportadas para a superfície do coletor. A ação hidrodinâmica tem importância no transporte de partículas relativamente grandes ($\sim 10 \mu\text{m}$).

Difusão é o transporte resultante do movimento browniano, que é o movimento aleatório das partículas num fluido como consequência dos choques das moléculas do fluido nas partículas. A intensidade deste fenômeno é proporcional à energia termodinâmica da água e ao inverso do tamanho das partículas, sendo mais expressivo em partículas que se aproximam do tamanho das moléculas de água (menores que $1 \mu\text{m}$) (AMIRTHARAJAH, 1988; DALSASSO, 2005).

De acordo com Amirtharajah (1988), a sedimentação é devida à força da gravidade e da velocidade de sedimentação da partícula, que a faz atravessar as linhas de fluxo e alcançar o coletor. Neste mecanismo, a densidade de partículas e da temperatura da água tem papéis importantes. Mecanismo importante no transporte de partículas maiores que $1 \mu\text{m}$.

O transporte de partículas pelo mecanismo da inércia ocorre quando a partícula tem velocidade superior a velocidade das linhas de fluxo, tendo assim, quantidade de movimento suficiente para atravessar as linhas de fluxo e ir de encontro ao coletor.

Já no mecanismo de interceptação, a partícula a ser retida está próxima ao coletor, de modo, que ao tocá-lo, a partícula adere-se ao coletor. Conforme comenta Dalsasso (2005), este mecanismo ocorre quando a distância entre a linha de fluxo e a superfície do coletor é menor que a metade do tamanho da partícula, considerando-a esférica. Segundo Weber-Shirk e Dick (1997a), a maior eficiência deste mecanismo ocorre após a maturação do meio filtrante.

A aderência entre as partículas pode ocorrer diretamente na superfície dos grãos ou em partículas previamente retidas. Esta ação é atribuída a dois fenômenos: a interação entre forças elétricas e de Van der Waals, e interação química entre as partículas e a superfície de grãos de um material intermediário (MALDONADO; VARGAS; BARRENECHEA, 2004).

Os filtros lentos de areia são um apoio substancial a vida biológica devido ao longo período que a água permanece sobre o meio filtrante (tempo de retenção hidráulica). Partículas, principalmente algas e outros microorganismos, são os responsáveis pelo crescimento do filme biológico sobre a areia da superfície (CAMPOS, 2002).

No início do processo de filtração, bactérias predadoras ou benéficas podem ser transportadas pela água e crescer de forma seletiva sobre a camada filtrante, contribuindo assim para a formação do filme biológico, também conhecida como *Schmutzdecke*, que possui coloração castanha escuro. Estas bactérias oxidam a matéria orgânica presente na água obtendo assim, a energia necessária para o metabolismo (desassimilação) e para o seu crescimento (assimilação).

A atividade biológica descrita é mais pronunciada na parte superior do filtro e decresce gradualmente com a profundidade e a disponibilidade de alimento (quando fluxo descendente). Quando ocorre a limpeza da camada superior do filtro, as bactérias são removidas, sendo necessário um período de maturação do meio filtrante até que se desenvolva a camada biológica novamente (VARGAS, 2004). Estudos de Weber-Shirk e Dick (1997b), indicam que os mecanismos biológicos são importantes para remoção de partículas menores que 2 µm.

3.4. Limitações do filtro lento

A filtração lenta é reconhecida como uma técnica simples, confiável e eficaz no tratamento de água. No entanto, esta tecnologia não necessariamente elimina todas as substâncias indesejáveis, de modo a deixar a água de acordo com os padrões de aceitação para o consumo humano (GALVIS, 1999).

A principal limitação na aplicabilidade do filtro lento está ligada a qualidade da água bruta. No entanto, não existe um consenso na qualidade ideal da água bruta para alimentar um filtro lento. A Tabela 2 traz as recomendações de alguns autores quanto às características da água bruta para aplicação do filtro lento.

Tabela 2 - Valores recomendados de água bruta para uso da filtração lenta

Parâmetro	Valores máximos recomendados	
	Di Bernardo; Dantas (2005)	Cleasby (1991)
Turbidez (uT)	100% < 15 95% < 10 90% < 5	5
Cor verdadeira (uC)	100% < 10 95% < 5	-
Ferro (mg Fe/L)	100% < 1,5 95% < 1,0 90% < 0,5	0,3
Manganês (mg Mn/L)	100% < 0,7 95% < 0,5 90% < 0,2	0,05
Algas	100% < 500 (UPA/mL) 95% < 250 (UPA/mL) 90% < 100 (UPA/mL)	5µg clorofila-a/L
Coli. Totais (NMP/100mL)	100% < 1000 95% < 250 90% < 100	-
<i>E. coli</i> (NMP/100mL)	100% < 500 95% < 250 90% < 100	-

Fonte: Adaptado de Di Bernardo e Dantas (2005).

Segundo Cleary (2005), uma grande limitação da filtração lenta está na utilização de água bruta com turbidez elevada, que leva a um aumento rápido da perda de carga, resultando em uma carreira de filtração de poucos dias.

Os filtros lentos de areia não são uma boa alternativa para remoção de cor verdadeira, pois este parâmetro está relacionado à presença na água de substâncias dissolvidas ou coloidais, particularmente substâncias húmicas, que são parâmetros que não são removidos unicamente com processos físicos de separação. A remoção eficaz dessas substâncias depende da coagulação química (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999).

No meio filtrante habitam bactérias que contribuem para a oxidação de ferro e manganês, entretanto altas concentrações destes metais acarretam em entupimento prematuro da camada biológica. A baixa concentração de ferro aumenta a capacidade de remoção de componentes orgânicos quando se utiliza filtração em múltiplas etapas (SÁNCHEZ et al., 2006).

Apesar do importante papel das algas, bactérias, protozoários entre outros microorganismos (presentes na água bruta) na atividade biológica do filtro lento, quando em elevadas concentrações estas formas de vida exercem uma influência negativa no processo de filtração, ocasionando um rápido entupimento do meio filtrante, o que contribui para a formação de uma camada biológica (*shmutzdecke*) mais impermeável, o que conseqüentemente, diminui a carreira de filtração (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999). Os mesmos autores ressaltam que a presença de algas na água bruta ou filtrada pode provocar problemas de sabor, odor, trialometanos, sendo que algumas espécies de algas podem liberar toxinas.

Mesmo sendo uma das características do filtro lento a alta remoção de bactérias, segundo Cleary (2005), a presença de uma elevada quantidade de bactérias pode resultar na obstrução prematura do meio filtrante e uma potencial passagem de organismos patogênicos. Desta forma, é importante a utilização de pré-tratamento para otimizar a remoção de bactérias no filtro lento, quando estas encontram-se em concentrações elevadas.

3.5. Fatores que inibem a eficiência da filtração lenta

Segundo Maldonato, Vargas e Barrenechea (2004), a eficiência da filtração está relacionada às características das partículas em suspensão, do meio filtrante, da hidráulica da filtração e da qualidade da água bruta. Os fatores que inibem a eficiência de um filtro lento estão classificados em: parâmetros de projeto, operacionais e ambientais (MARRÓN, 1999; VARGAS, 2004; DI BERNARDO; DANTAS, 2005). De acordo com Weber-Shirk e Dick, (1997b), com o amadurecimento da camada biológica do filtro lento se evidenciam a remoção de partículas, sendo que este período pode variar de seis horas a duas semanas (LETTERMAN; CULLEN, 1985).

A Tabela 3 apresenta, segundo Vargas (2004), as variáveis que alteram a eficiência do processo de filtração lenta.

Tabela 3 - Variáveis que alteram a eficiência do filtro lento

Fatores inibidores	Variáveis
Parâmetros de Projeto (desenho)	Taxa de filtração;
	Tamanho da areia d_{10} e C.U.;
	Perda de carga permitida;
	Profundidade do leito de areia (máxima e mínima).
Parâmetros operacionais	Frequência das limpezas;
	Tempo fora de operação entre as limpezas;
	Mínima altura permitida para o leito;
	Tempo de maturação do filtro;
	Variações de fluxo;
	Idade e tipo de <i>schmutzdecke</i> ;
Parâmetros ambientais da água bruta	Distância entre a película de gelo e o leito de areia (em lugares frios).
	Temperatura da água;
	Qualidade da água bruta;
	Tipo de microorganismos presentes;
	Tipo e concentração de algas;
	Magnitude e origem da turbidez;
Concentração e tipo de compostos orgânicos;	
Concentração e tipo de nutrientes.	

Fonte: Vargas (2004).

3.6. Limpeza de filtro lento

A limpeza do filtro lento de areia é uma das etapas mais importantes no processo de tratamento de águas de abastecimento, ocorrendo quando a perda de carga ou carga hidráulica estipulada previamente é atingida. Quando isso ocorre, a quantidade de água que entra no filtro não é a mesma quantidade de água filtrada e, conseqüentemente, a taxa de filtração é alterada e o filtro passa a operar com taxa de filtração declinante e carga hidráulica constante.

Os problemas de uma lavagem inadequada são observados na carreira de filtração seguinte, isto porque, a lavagem afeta diretamente na qualidade da água. Segundo Richter e Azevedo Neto (2003), um filtro é tão bom quanto a sua lavagem.

No método tradicional de limpeza de filtros lentos, ocorre a drenagem até que o nível de água fique logo abaixo da superfície. Dessa forma, o *Schmutzdecke* e os primeiros 1 a 5 cm de areia são raspados, lavados e acondicionados para serem repostos no filtro quando a altura de areia do filtro fique com a espessura mínima recomendada (0,6 m). Extrair, limpar e repor a areia é uma operação que leva tempo e necessita mão de obra intensa. Segundo Di Bernardo (2005), para que a atividade biológica no filtro se inicie rapidamente após a limpeza a reposição da areia deve ser de forma adequada de modo que acima da areia a ser recolocada no filtro permaneça uma camada de areia já com o filme biológico formado. Com a adoção desta técnica de limpeza é inevitável que haja perda de quantidades de areia que deverão ser repostas quando conveniente. Segundo revisão literária realizada por Logsdon (2002), em um filtro com dimensões de 100 m² são necessárias 1 a 5 horas para a execução da limpeza, considerando apenas a remoção da areia.

Além do método tradicional comentado anteriormente, existem algumas outras formas de limpeza de filtro lento, sempre com o objetivo de facilitar a manutenção periódica dos filtros.

Na década de 70, Castro em um trabalho de divulgação de filtro lento para aplicação no Nordeste do Brasil, desenvolveu uma maneira simples e rápida de limpeza de filtro lento. A técnica consistia em ao

final da carreira de filtração, abaixar o nível de água do filtro até que se observasse o aparecimento da camada biológica e da areia, deixando o *Schmutzdecke* exposto ao tempo, que na região apresenta sol intenso, baixa umidade do ar e ventos secos. Estes três fenômenos, agindo em conjunto sobre o leito filtrante durante 2 a 4 horas, deixavam o *Schmutzdecke* seco e com varias rachaduras (denominado, pelo idealizador da técnica, de beijus), o que tornava fácil a retirada manual com auxílios de vassouras e pás. Esta técnica tinha como benefício a pouca perda de areia durante a limpeza e um menor tempo de maturação do filtro (COSTA, 1980).

O método de rastelagem é atualmente aplicado em filtros grandes, e serve para desempacotar e remover a camada biológica dos grãos que ficam na parte superior do filtro, ocorrendo, em seguida, a inversão de fluxo sem que haja expansão, sendo a água suja retirada por um extravasor. Este método apresenta uma série de importantes benefícios operacionais em comparação com a limpeza tradicional, principalmente em relação a não ocorrência de perda de material filtrante (COLLINS; EIGHMY; MALLEY, 1991; CANTABRANA, 1998; MARRÓN, 1999; LOGSDON, 2002).

Uma variação desta técnica é utilizada nos Estados Unidos, e consiste em duas etapas: primeiro se reduz o nível de água do filtro até o nível mínimo de operação (vertedor) e se promove a aração da areia, cravando cerca de 20 centímetros o arado na areia e injeção de água bruta na tubulação longitudinal do filtro de modo a resultar em velocidade de escoamento superficial que leve o material despreendido para o canal de descarga do filtro; na segunda etapa, agora sem injeção de água, o arado é substituído por um trator, sendo realizado um leve revolvimento no material filtrante superficial para não ocorrer compactação. Dentre as vantagens desta técnica pode-se ressaltar: número reduzido de pessoas para limpeza, menores custos de operação e manutenção, menor período de amadurecimento do filtro, e possibilidade de aplicação em grandes unidades de filtração (DI BERNARDO; SABOGAL-PAZ, 2008).

Uma forma de facilitar a limpeza de filtros lentos, de acordo com Di Bernardo e Sabogal-Paz (2008), é o emprego de mantas sintéticas não tecidas, colocadas no topo da camada de areia do filtro lento, evitando assim, a remoção da camada superior de areia, lavagem da areia e posterior recolocação. Quando aplicadas taxas de filtração inferiores a

6 m³/m²dia, praticamente não ocorre penetração de impurezas na camada de areia, bastando a limpeza da manta para que o filtro lento seja colocado novamente em operação ao final da carreira. Outros benefícios reportados são também redução da camada de areia para cerca de 0,40 m e a duração da carreira de filtração até cinco vezes mais longa do que a correspondente em um filtro lento com camada de areia de mesma espessura e sem mantas.

Segundo Huisman (1974), algumas cidades que possuem estações de tratamento por filtração lenta já utilizaram um equipamento de limpeza *in situ*, que consiste de uma longa e estreita calha invertida com dois níveis e comprimento igual à largura do filtro. A limpeza é realizada com o cravamento de uma parte da calha (aproximadamente 5 cm) e a penetração do tubo guia para injeção de água, deste modo é realizada a retrolavagem da camada de areia superior, sendo a água de lavagem aspirada através do segundo nível da calha (Figura 5).

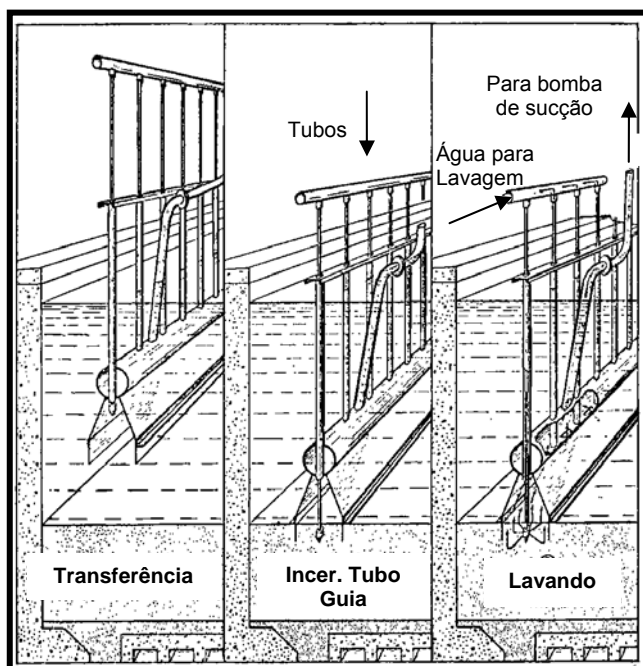


Figura 5 - Equipamento de limpeza de filtro lento *in loco*
Fonte: Huisman (1974).

Um método de limpeza é utilizado em Londres não necessita a drenagem do filtro, onde o filtro em seu nível máximo de operação e com auxílio de um equipamento especial de sucção que é montado sobre uma plataforma flutuante, ou sobre grandes trilhos suspensos. Este equipamento é capaz de raspar e sugar a primeira camada de areia, e enviar continuamente através de uma tubulação flexível para uma unidade de recuperação de areia. A camada a ser raspada é controlada através de raio *laser*. Esta técnica economiza de 80 a 85% do tempo gasto se fosse utilizada a forma convencional. Apesar de ser um equipamento sofisticado, os custos de operação e manutenção foram reduzidos (DI BERNARDO; SABOGAL-PAZ, 2008; DAVISON; BANER, 2009).

Com a utilização dos filtros lentos em zonas rurais e/ou isoladas, estes ganharam menores dimensões, uma vez que cada filtro abastece um número pequeno de pessoas. Desta forma, objetivando facilitar a limpeza do filtro, foi proposta por Sens (1992), a filtração lenta de escoamento descendente com retrolavagem, utilizando a água filtrada no próprio filtro para realizar a limpeza da camada filtrante.

Estudos de Michielin (2002) deram continuidade à proposta de Sens, quando foi desenvolvido o primeiro sistema piloto de filtração lenta com retrolavagem com o objetivo de estudar as condições hidráulicas para a fluidificação do material filtrante. Em continuidade, Emmendoerfer (2006), avaliou a altura da camada filtrante, a duração das carreiras, qualidade da água tratada, aspectos hidráulicos e a configuração da lavagem.

Com este estudo foi concebido um filtro lento retrolavável com água filtrada, em que, com a abertura de apenas uma válvula, ocorre à fluidificação do material filtrante, o que provoca atrito entre as partículas de areia ocorrendo à limpeza da camada filtrante. Este filtro foi instalado por membros do LAPOÁ na Estação Experimental da EPAGRI, localizado no município de Agrônômica/SC, para o tratamento de água de abastecimento com aplicação em propriedades rurais de uso familiar.

Marnoto (2008), em suas pesquisas, produziu um sistema piloto de bancada que reproduzia o filtro lento retrolavável, fruto de trabalhos anteriores, e avaliou diferentes expansões durante a retrolavagem e sua influência na duração nas carreiras de filtração, qualidade da água filtrada e tempo de formação da camada biológica.

3.7. Vantagens X limitações

A filtração lenta é um processo que vem se mostrando, ao longo dos anos, bastante eficiente para o tratamento de água, quando se respeita uma série de critérios abordados na seção 3.4. Inúmeras são as vantagens para a adoção desta técnica como, por exemplo, a elevada eficiência de remoção de bactérias, vírus e cistos de *Giardia*.

No que se refere à *Escherichia coli*, nos estudos de Murta e Heller (2003), a filtração lenta é uma ótima alternativa para a redução e muitas vezes a eliminação total deste organismo que é o principal indicativo de contaminação fecal.

No processo de filtração lenta normalmente não se utilizam produtos químicos, o que inibe a formação de subprodutos. Por este motivo, segundo Murtha, Heller e Libânio (1997), o resíduo gerado da filtração pode ser utilizado na agricultura e na piscicultura.

Segundo Azevedo Netto (1979), a água filtrada tem características menos corrosivas e os equipamentos utilizados são mais simples.

Por ser uma técnica simples e a operação consistir basicamente de controle da vazão e limpeza do meio filtrante, os custos com manutenção e operação desta tecnologia são menores. Muitas vezes não se utiliza energia elétrica, pois a alimentação pode ser realizada por gravidade.

O emprego desta técnica demanda uma área de instalação consideravelmente maior, em comparação com a filtração rápida, pois utiliza taxas de filtração menores. 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.

Como na filtração lenta a água permanece mais tempo acima do leito filtrante, nos primeiros centímetros da areia ocorre a formação de um filme biológico, o que reduz os espaços entre os grãos, tendo-se que, conseqüentemente a primeira camada de areia se torna também uma barreira física para as impurezas.

O processo de filtração lenta tem certa limitação na remoção de partículas coloidais e compostos orgânicos. Tais compostos podem

causar uma concentração elevada de trihalometanos na água filtrada após cloração. Entretanto, essa limitação pode ser amenizada com o emprego de pré-tratamento com coagulante orgânico ou inorgânico, com dosagem de aproximadamente 10% da dosagem usualmente utilizada em tratamentos que adotam coagulação. Ou até mesmo por pós-tratamento com carvão ativado granular, quando a utilização de coagulante não é indicada (MANZ, 2004).

A grande limitação da filtração lenta está na qualidade da água bruta, que deve estar entre os recomendados na Tabela 2. Outro fator importante é que os filtros lentos não suportam picos de turbidez, o que resulta em um efluente de pior qualidade e carreiras de filtração curtas.

Com relação a filtração lenta com retrolavagem algumas vantagens estão na redução de água necessária para a limpeza e a não necessidade de unidade de recuperação de areia, uma vez que esta não é retirada do filtro para lavagem. O tempo gasto com a limpeza do filtro também é reduzido e consequentemente o filtro permanece um menor tempo sem produzir água.

4. Metodologia

4.1. Considerações gerais

A pesquisa se baseia na filtração lenta para o tratamento de água de lago com o objetivo de avaliar a influência do tipo de limpeza proposto na duração das carreiras de filtração e qualidade da água tratada com a adoção desta tecnologia. Para alcançar os objetivos propostos, foram dimensionadas, avaliadas e analisadas as seguintes etapas de tratamento em escala piloto (Figura 6):

- Caracterização da Água bruta;
- Filtração lenta com limpeza convencional (FLC);
- Filtração lenta retrolavável com água filtrada (FLR);
- Filtração lenta retrolavável com água bruta (FLRb).

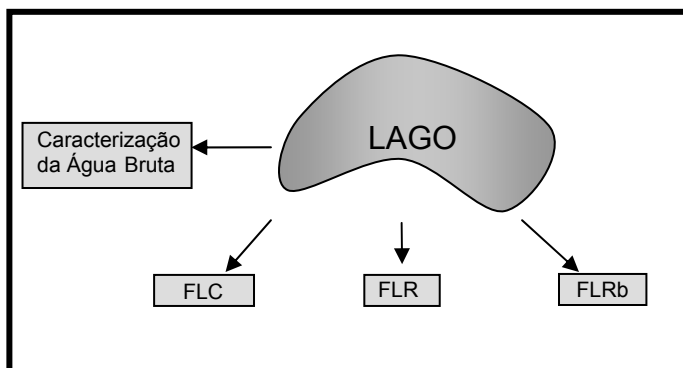


Figura 6 - Esquema do tratamento

4.2. Localização do sistema piloto

A pesquisa foi realizada no período de janeiro a novembro de 2009, no Laboratório de Águas da Lagoa do Peri (LALP) situado na Estação de Tratamento de Água da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), localizado ao Sul de Florianópolis.

O manancial, Lagoa do Peri (Figura 7), tem área superficial de $5,2 \text{ km}^2$ e bacia de contribuição de $20,1 \text{ km}^2$ (CASAN, 2009), sendo alimentado principalmente por dois rios, o Rio Cachoeira Grande e o Rio Ribeirão Grande. A lagoa tem contato com o mar através do canal Sangradouro, situado a aproximadamente 3 m acima do nível do mar, isso faz com que a lagoa não receba água salgada, sendo, portanto, totalmente doce. Segundo Simonassi (2001), a lagoa tem volume de aproximadamente $21,2 \times 10^6 \pm 0,1 \times 10^6 \text{ m}^3$, profundidade média de 4,2 m e máxima de 11 m, comprimento máximo de 3,8 km (eixo NE/SW) e largura máxima de 1,8 km (eixo E/W).

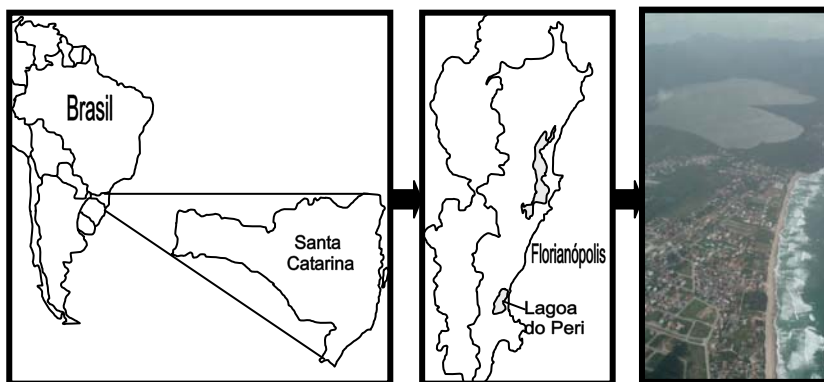


Figura 7 - Localização da Lagoa do Peri

4.3. Água de estudo

A água de estudo é proveniente da Lagoa do Peri (mesmo manancial que abastece acosta Leste e o Sul da ilha desde o ano 2000), e coletada do poço de captação localizado nas dependências da Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri, sendo a água superficial da lagoa encaminhada para o poço através de tubulação subterrânea. A caracterização da água bruta foi realizada por meio de análises físico-químicas e microbiológicas, realizadas com água proveniente do poço de captação.

Diversos estudos já caracterizaram as águas da lagoa do Peri, concluindo que o manancial possui cor moderada, baixa turbidez e elevada densidade de fitoplâncton, que causam dificuldades operacionais verificadas no tratamento empregado na ETA (filtração direta), devido à rápida colmatação dos filtros. (SIMONASSI, 2001; MONDARDO, 2004; CORAL, 2009).

Em estudos anteriores, Marnoto (2008) verificou que as características da água bruta da Lagoa do Peri, resultaram em carreiras de filtração de mais de 35 dias, quando utilizado um pré-filtro de bidin. Desta forma, mesmo o manancial tendo características que desfavorecem o uso da filtração lenta, foram obtidas carreiras de filtração longas.

A água de estudo foi captada do poço de captação da ETA através de bomba centrífuga modelo BCR-2000V com $\frac{1}{2}$ cv (Figura 8) que fica ligada continuamente, conduzindo a água bruta até as unidades piloto de filtração lenta.



Figura 8 - Poço de captação e bomba centrífuga

4.4. Dimensionamento dos sistemas piloto

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/pessoa.dia), conforme CISAM/AMVAP (2006), operando a uma taxa de filtração de $4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{dia}$. Por meio da equação 1 foi determinada a área superficial de filtração, de $0,625 \text{ m}^2$, resultando em um filtro com diâmetro interno de aproximadamente $0,90 \text{ m}$.

$$T = \frac{Q}{A_f} \quad (1)$$

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).

A altura da camada filtrante foi reduzida a 40 cm (usualmente se utiliza $0,9$ a $1,5 \text{ m}$), uma vez que estudos comprovam que a remoção de sólidos e bactérias ocorre, predominantemente, nos primeiros 30 cm de profundidade, tendo-se observado, a partir desta, apenas variações inexpressivas de coliformes totais, *Escherichia coli*, turbidez e cor aparente (MURTHA; HELLER, 1999). Bellamy, Hendricks e Logsdon (1985) reportam redução da eficiência de remoção de coliformes de $0,2 \text{ log}$, comparando camada de areia com alturas de $0,97 \text{ m}$ e $0,47 \text{ m}$. O emprego dessa espessura de camada filtrante assegura assim, uma eficiente redução dos indicadores básicos de qualidade da água.

A granulometria da areia foi escolhida em função de estudos preliminares (EMMENDOERFER, 2006), em que foram realizados estudos hidráulicos de expansão da areia com diâmetro efetivo de $0,22 \text{ mm}$ e coeficiente de desuniformidade igual a $1,8$.

O sistema de retrolavagem sem utilização de bombas foi dimensionado utilizando alguns parâmetros anteriormente estudados no grupo de pesquisa e parâmetros indicados na literatura, como: perda de carga em tubulação e no meio filtrante.

A retrolavagem foi dimensionada para uma expansão média de 40% a uma velocidade de aproximação 0,34 m/min. De acordo com os estudos de Emmendoerfer (2006), nesta expansão a camada de areia encontra-se completamente fluidificada (Figura 9) e se relata perda de carga na camada suporte de 0,06 m.

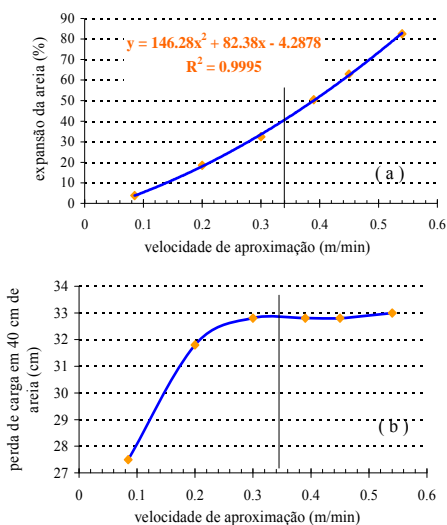


Figura 9 - Expansão (a) e Perda de Carga (b) x vel. de aproximação da água
Fonte: Emmendoerfer (2006).

Para determinar o volume de água necessário para lavagem dos filtros foi estipulado tempo de lavagem de 2 minutos, conforme sugere Marnoto et al. (2008). Considerando área de filtração de $0,64 \text{ m}^2$ ($0,9 \text{ m}$ de diâmetro) e velocidade ascensional de $0,34 \text{ m/min}$ ($5,67 \times 10^{-3} \text{ m/s}$), a partir da equação 2 se obtém a vazão de lavagem e, com a equação 3, o volume de água necessário para a retrolavagem.

$$Q_L = V \times A_f \quad (2)$$

onde:

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

V = velocidade de aproximação (m/s);

A_f = área de filtração (m^2).

$$V = Q_L \times t \quad (3)$$

onde:

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

Q_L = vazão de lavagem (m^3/s);

t = tempo de lavagem (s).

Nos sistemas de retrolavagem com água filtrada e bruta, o volume necessário para a limpeza do meio filtrante por dois minutos é de aproximadamente 435 L por filtro.

Para se determinar as cotas mínimas dos reservatórios e das saídas, necessárias para que ocorra a retrolavagem com expansão média do meio filtrante de 40 %, foi somada a perda de carga na areia, na camada suporte, os comprimentos equivalentes das tubulações e conexões utilizadas em cada configuração de retrolavagem (com água filtrada e água bruta), conforme Figura 10 e Figura 11, respectivamente.

Pode-se observar que as cotas Z_2 em ambos os filtros, se localizam no centro do reservatório de água para retrolavagem (Figura 10 e Figura 11). Este artifício foi utilizado como margem de segurança para garantir as condições hidráulicas para expansão média de 40%, uma vez que, com a variação da carga hidráulica, a velocidade de aproximação também se modifica, variando conseqüentemente, a expansão do meio filtrante.

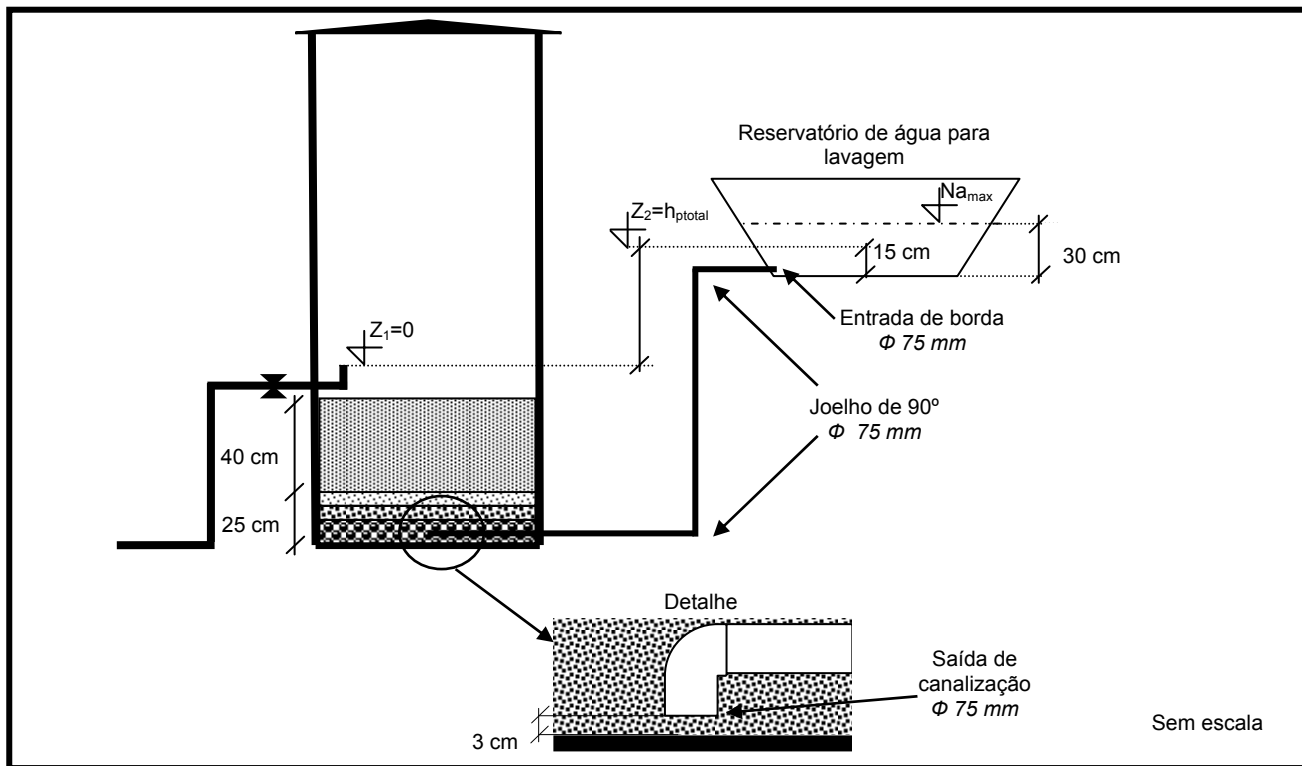


Figura 10 - Configuração do sistema de retrolavagem com água filtrada

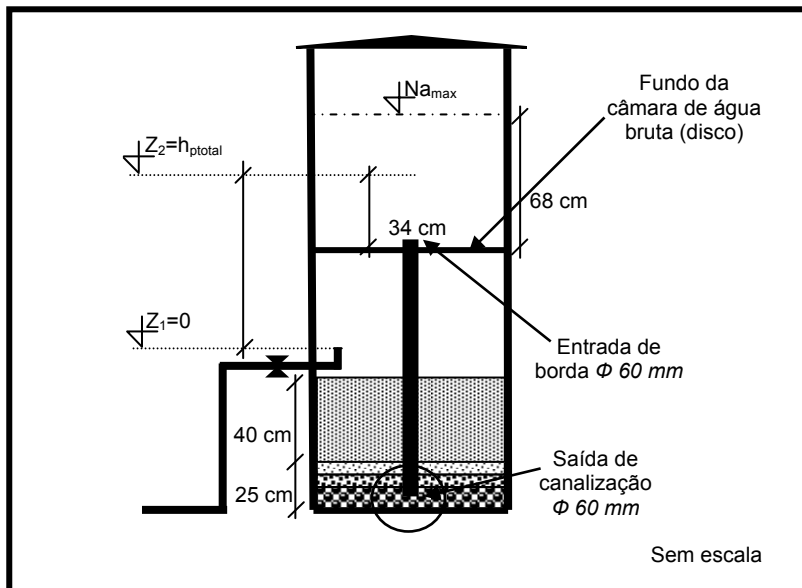


Figura 11 - Configuração do sistema de retrolavagem com água bruta

Para o sistema de retrolavagem com água filtrada foram contabilizados os seguintes itens para o cálculo da perda de carga total nas tubulações, conexões e acessórios:

- 3 joelhos de 90° de P.V.C. soldável de Φ de 75 mm;
- 1 entrada de borda Φ de 75 mm;
- 1 saída de canalização de Φ de 75 mm;
- 2 metros de tubo de P.V.C. soldável de Φ de 75 mm.

No sistema de retrolavagem com água bruta foram contabilizados:

- 1 entrada de borda Φ de 60 mm;
- 1 saída de canalização de Φ de 60 mm;
- 1,0 metros de tubo de P.V.C. soldável de Φ de 60 mm.

A Tabela 4 apresenta os comprimentos equivalentes das peças de P.V.C. rígido ou cobre conforme a ABNT (PORTO, 2006).

Tabela 4 - Comprimento equivalentes (m) em peças de P.V.C rígido ou cobre

Diâmetro de referência (mm)	de Joelho de 90°	Entrada de borda	Saída de canalização
60	3,4	2,8	3,3
75	3,7	3,3	3,5

Fonte: Porto (2006).

Segundo Porto (2006), em projetos de instalações prediais de água fria ou quente, que tem por característica tubulações com diâmetro menor que 110 mm, trechos curtos e conexões, usualmente se utiliza a fórmula de Fair-Whipple-Hisiao na determinação da perda de carga unitária J (m/m). A equação 4 é utilizada para P.V.C. rígido conduzindo água fria.

$$J = 0,0008695 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad (4)$$

onde:

J = perda de carga unitária (m/m);

Q = vazão na tubulação (m^3/s);

D = diâmetro da tubulação (m).

A perda de carga total na tubulação se obtém a partir da equação 5, onde se somam todas as conexões, acessórios e comprimento linear de tubulação.

$$\Delta h = J \times L_{total} \quad (5)$$

onde:

Δh = perda de carga na tubulação (m);

J = perda de carga unitária (m/m);

L_{total} = comprimento total (m).

Com o somatório da perda de carga nas tubulações e conexões de P.V.C., meio filtrante e camada suporte, foram definidas as cotas para a implantação dos sistemas de filtração lenta com retrolavagem.

No sistema de retrolavagem com água filtrada o dimensionamento resultou em cota $Z_2=0,59$ m e para o sistema com limpeza através de retrolavagem com água bruta $Z_2=0,60$ m, resultado do somatório das perdas de carga do sistema durante a retrolavagem.

4.5. Descrição e funcionamento dos sistemas piloto

Com os dados obtidos na seção 4.4 foram construídos três sistemas piloto que operaram em paralelo (Figura 12), sendo eles: filtração lenta com limpeza convencional (sistema 1); filtração lenta retrolavável com água filtrada (sistema 2); e filtração lenta retrolavável com água bruta (sistema 3).



Figura 12 - Foto do conjunto dos três sistemas piloto de tratamento por filtração lenta

Os três filtros foram construídos em fibra de vidro e dispostos sobre um contra piso de concreto armado de 15 cm, o qual serve de apoio para que os filtros não se movimentem lateralmente e, para facilitar a inspeção/manutenção dos mesmos foram construídas também plataformas de madeira (Figura 13).

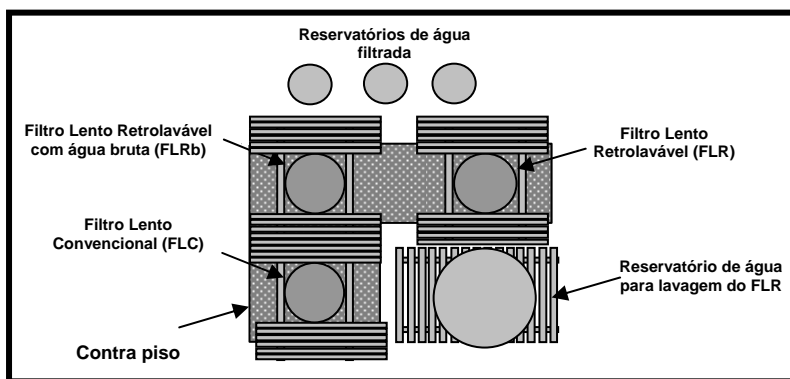


Figura 13 - Desenho esquemático de disposição dos filtros, vista em planta

Os filtros lentos são cobertos, de fluxo descendente, com 90 cm de diâmetro, trabalham com taxa de filtração constante de $4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ e carga hidráulica variável, visando, dessa forma, produção de aproximadamente 2500 L de água filtrada por dia. O controle da vazão na entrada dos filtros é realizado através de câmara de nível constante com escoamento por orifício (Figura 14). A coluna de água na câmara foi fixada em 15 cm e, com auxílio da equação (6), foi determinado o diâmetro do orifício que fornece vazão suficiente para manutenção da taxa de filtração em $4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$.

$$Q = Cd \times A \times \sqrt{2 \times g \times h} \quad (6)$$

onde:

Q = vazão (m^3/s);

Cd = Coeficiente de descarga = 0,82;

A = área do orifício (m^2);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

h = altura do orifício em relação ao nível de água dentro da câmara de nível constante (cm).



Figura 14 - Foto da câmara de nível constante

A lavagem e término dos ensaios (carreira de filtração) ocorriam quando a carga hidráulica sobre o meio filtrante atingia 0,80 m, o que é acompanhado através de piezômetros fixados na lateral dos filtros.

Os filtros têm meio filtrante formado por camada de areia de 40 cm, com diâmetro efetivo de 0,22 mm, coeficiente de desuniformidade $< 1,8$ e camada suporte de 25 cm de espessura, com grãos variando de 1,4 a 4,5 mm (Figura 15), características recomendadas por Emmendoerfer (2006).

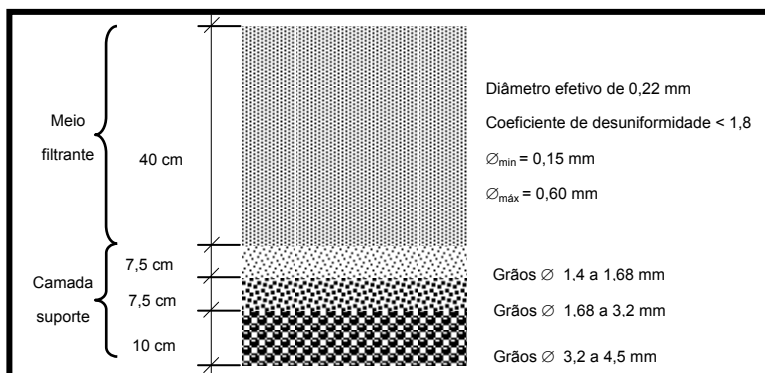


Figura 15 - Esquema da composição da camada suporte e meio filtrante

4.5.1. Filtração lenta com limpeza convencional - Sistema 1

O sistema 1 é composto de um filtro em fibra de vidro, com diâmetro interno de 90 cm, 1,96 m de altura, reservatório de água filtrada de 100 L e tubulações de P.V.C. soldável de 25 mm na entrada e saída da câmara de nível constante e demais tubulações, exceto no dreno do filtro e saída de água filtrada, que é de 40 mm. A Figura 16 esquematiza o FLC em operação e no Apêndice 1 pode ser visualizado o desenho a partir do qual o filtro foi construído.

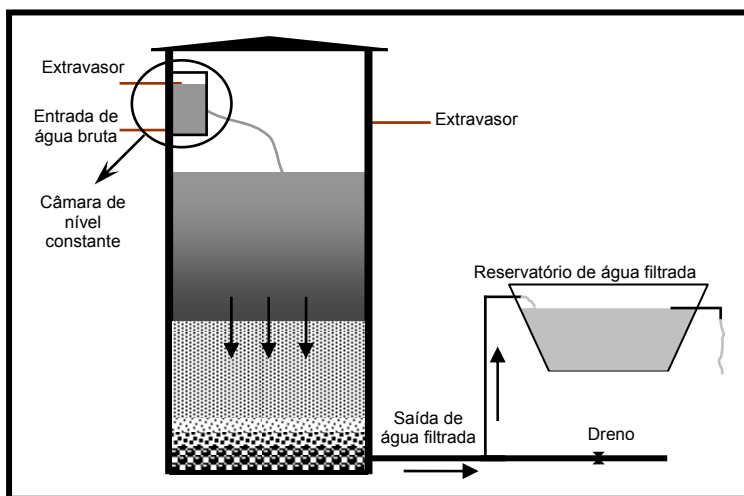


Figura 16 - Esquema do filtro FLC em operação

A limpeza do sistema 1 era realizada da forma convencional, ou seja, ao atingir a carga hidráulica anteriormente estipulada (0,80 m), seguia-se o seguinte procedimento: a água sobrenadante era sifonada (até o nível de água chegasse próximo a camada de areia); o dreno era aberto (até que o nível de água ficasse logo abaixo dos primeiros centímetros do meio filtrante); a camada biológica formada e aproximadamente 2 – 3 cm da camada filtrante era raspados; lavava-se manualmente a areia; e recolocava-se a areia no filtro.

4.5.2. Filtração lenta retrolavável - Sistema 2

O sistema 2 (Figura 17) é composto por um filtro em fibra de vidro de 90 cm de diâmetro interno e altura de 3,00 m, reservatório de água para lavagem de 1000 L (volume utilizado: aproximadamente 435 L), reservatório de 100 L de água filtrada, tubulações de P.V.C. soldável de 25 mm de diâmetro para entrada e saída da câmara de nível constante. A tubulação que conduz a água do reservatório de água filtrada para lavagem possui diâmetro de 75 mm. Demais dimensões utilizadas na construção do filtro pode ser visualizada no Apêndice 2.

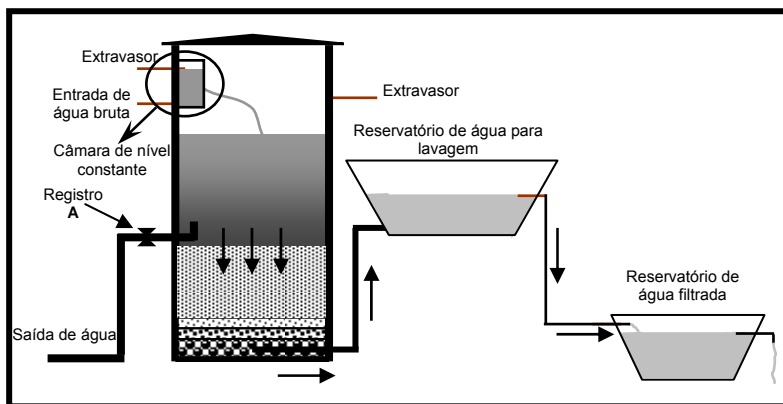


Figura 17 - Esquema do filtro FLR em operação

Diferentemente do sistema 1, a limpeza do sistema 2 foi projetada para ocorrer por contra-fluxo (com expansão média da areia de 40%). A partir da abertura de um registro (Registro A), a lavagem ocorre durante 2 minutos com a água filtrada pelo próprio filtro que foi armazenada em um reservatório localizado de forma que a diferença de cotas permita o contra-fluxo e se mantenha a vazão média de lavagem recomendada por Emmendoerfer (2006), conforme ilustra a Figura 18. Objetivando-se a distribuição da água de lavagem em todo o filtro, foi instalado um joelho de 90° virado para baixo localizado no centro e a 3 cm do fundo do filtro, como pode ser observado no detalhe da Figura 18.

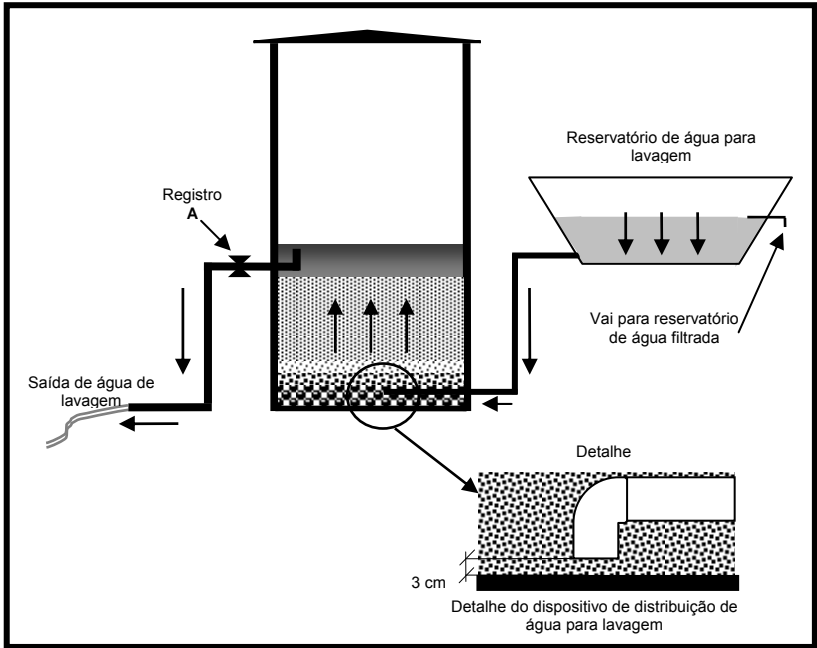


Figura 18 - Esquema da lavagem do filtro FLR

4.5.3. Filtração lenta retrolavável com água bruta - Sistema 3

Como ilustrado na Figura 19, o sistema 3 é constituído por um filtro em fibra de vidro de 90 cm de diâmetro interno e altura de 2,20 m, reservatório de água filtrada de 100 L e respectivas tubulações. No Apêndice 3 pode ser visualizado o desenho a partir do qual o filtro foi construído.

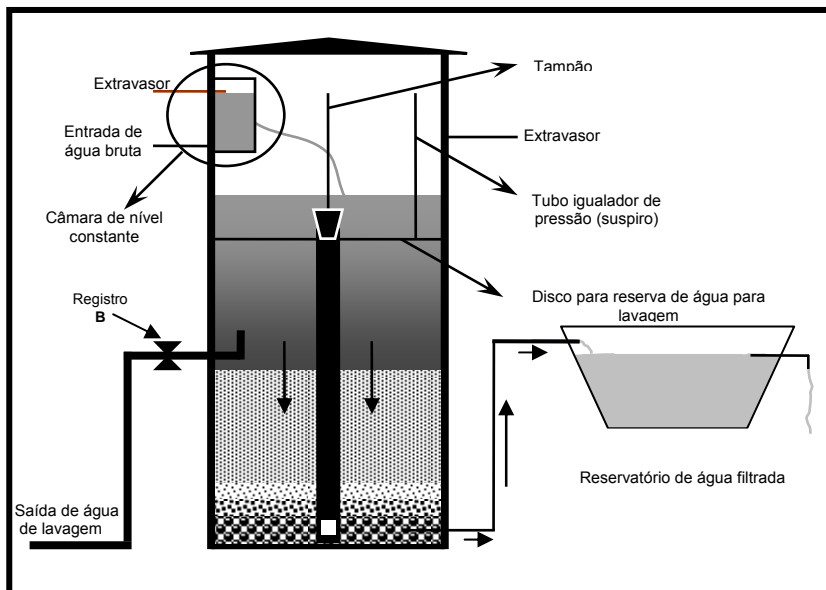


Figura 19 - Esquema do filtro FLRb em operação

Como no sistema 2, a limpeza do filtro no sistema 3 (Figura 20) ocorre por contra fluxo, tendo-se como diferencial a utilização de água bruta para realizar a retrolavagem. A água de lavagem é armazenada no próprio filtro com o auxílio de um disco de fibra (removível) alocado dentro do filtro. O procedimento de lavagem é realizado abrindo-se o registro da saída de água de lavagem (Registro B). Quando para de sair água desta tubulação, o tampão é retirado para que a água bruta escoe pelo tubo central do filtro, assim ocorrendo a retrolavagem com

expansão média de 40%. A lavagem é realizada por 2 minutos, tempo necessário para se esgotar a água armazenada acima do disco. Para que a água se distribua por todo filtro, o tubo possui duas aberturas em forma de retângulo com três centímetros de altura com o maior comprimento possível.

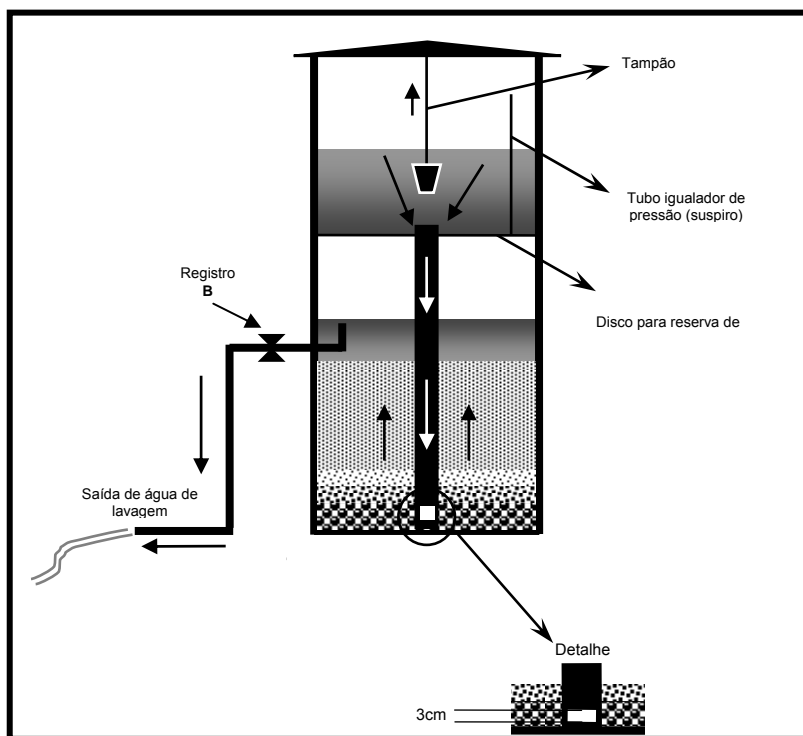


Figura 20 - Esquema da lavagem do filtro FLRb

Algumas adaptações foram realizadas para que o filtro funcionasse adequadamente, como: uso de um tampão oco de forma a evitar a formação de bolhas de ar no tubo central do filtro (Figura 21); instalação de um respiro para igualar e manter a pressão atmosférica entre o disco e a saída de água de lavagem (Figura 22), para que no momento que fosse aberto o registro de água de lavagem não se formasse vácuo abaixo do disco que armazena a água para lavagem.



Figura 21 – Foto do tampão do tubo central do FLRb



Figura 22 - Foto do tubo igualador de pressão (suspiro)

4.6. Implantação dos sistemas piloto

Os filtros lentos construídos a partir do dimensionamento descrito na seção 4.4, foram executados e instalados em janeiro de 2009. A camada filtrante e camada suporte com as características descritas na seção 4.5 foram encomendadas com a empresa Alzira materiais filtrantes.

Foram realizados testes hidráulicos antes da colocação da areia. Verificada a não ocorrência de vazamentos no corpo dos filtros, canalizações e conexões, foi colocada a camada suporte e a areia, nas respectivas alturas conforme a Figura 15.

As Figuras 23, 24 e 25 mostram os filtros internamente, podendo-se também observar o FLC completo de areia e pronto para entrar em operação, o FLR vazio e com material filtrante, e no FLRb pode ser observado o tubo central por onde a água é conduzida para retrolavagem e o disco que armazena a água para retrolavagem.



Figura 23 - Foto do interior do filtro FLC



Figura 24 - Foto do interior do filtro FLR

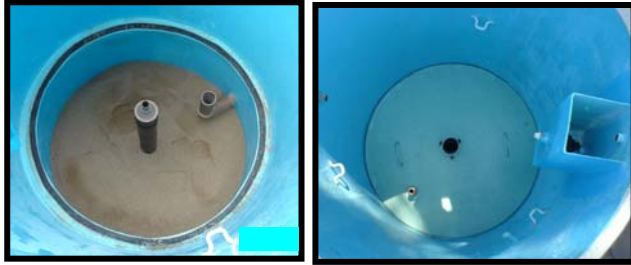


Figura 25 - Foto do interior do filtro FLRb

Posteriormente a colocação da areia nos filtros, realizou-se o enchimento dos filtros com água bruta vagarosamente, a fim de eliminar possíveis bolhas de ar no material filtrante. Eliminadas as bolhas de ar, os filtros receberam água bruta com vazão de projeto até que a perda de carga no meio filtrante atingisse 0,80 m, então os filtros foram lavados e se iniciaram os ensaios de filtração.

4.7. Parâmetros monitorados

Os parâmetros de qualidade de água analisados são alguns dos parâmetros mínimos exigidos pela Portaria nº 518 de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde para se considerar a potabilidade da água em estudo. As análises foram realizadas nas águas bruta e filtradas.

Nas amostras das águas foram analisadas através dos seguintes parâmetros de controle: alcalinidade, clorofila-a, coliformes totais, condutividade, contagem de fitoplâncton, cor aparente, cor verdadeira, *Escherichia coli*, ferro total, manganês, nitrato, nitrito, oxigênio dissolvido, pH, sólidos totais dissolvidos, temperatura e turbidez. Também foram monitorados parâmetros operacionais nos filtros lentos como: vazão, carga hidráulica, perda de carga no meio filtrante e expansão da areia durante a retrolavagem.

4.7.1. Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos

Os procedimentos das análises seguiram os protocolos definidos no Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (1998). Na Tabela 5 estão apresentados os parâmetros analisados, unidade obtida, equipamento utilizado e frequência de cada análise.

As análises físico-químicas e bacteriológicas foram realizadas no Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), localizado no departamento de Engenharia Sanitária, com exceção dos parâmetros monitorados a cada dois dias que foram analisados no Laboratório de Águas da Lagoa do Peri (LALP), situado na Estação de Tratamento de Água da CASAN.

Os parâmetros monitorados uma vez por carreira de filtração foram coletados e analisados após sete dias do início dos ensaios de filtração.

Tabela 5 - Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos analisados

Análise	Unidade	Equipamento	Frequência
Alcalinidade	CaCO ₃ mg/L	Bureta automática com solução de H ₂ SO ₄ 0,02N	a cada ensaio
Clorofila-a	µg/L	Extração em etanol - espectrofotômetro HACH DR/4000	a cada ensaio
Coliformes totais	NMP/100mL	COLILERT®	a cada ensaio
Condutividade	µS/cm	Condutivímetro portátil HACH	a cada ensaio
Cor Aparente	uH	espectrofotômetro HACH DR/2010	a cada 2 dias
Cor verdadeira	uH	espectrofotômetro HACH DR/2010	a cada 2 dias
Densidade de fitoplâncton	cel/mL	em câmara de UTERMOL – RENOLDS	a cada ensaio
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100mL	COLILERT® + Luz UV	a cada ensaio
Ferro total	mg/L	espectrofotômetro HACH DR/4000	a cada ensaio
Manganês	mg/L	espectrofotômetro HACH DR/4000	a cada ensaio
Nitrato	mg/L	espectrofotômetro HACH DR/4000	a cada ensaio
Nitrito	mg/L	espectrofotômetro HACH DR/4000	a cada ensaio
O.D.	mg/L	Oxímetro ALFAKIT	a cada ensaio
pH		pHmetro HACH	a cada 2 dias
Sólidos totais diss.	mg/L	Condutivímetro portátil HACH	a cada ensaio
Temperatura	°C	Termômetro	a cada 2 dias
Turbidez	uT	Turbidímetro HACH 2100P	a cada 2 dias

4.7.2. Parâmetros operacionais

Os parâmetros operacionais monitorados diariamente com exceção da expansão do meio filtrante são:

a) Vazão

A vazão foi aferida volumetricamente (Figura 26), com o auxílio de cronômetro e proveta graduada, e quando necessário o orifício era limpo para que a vazão pré-estabelecida se restabelecesse. O procedimento foi repetido a cada dois dias em cada filtro;



Figura 26 - Foto da aferição volumétrica da vazão

b) Carga hidráulica / duração das carreiras

A carga hidráulica foi obtida visualmente através de piezômetros instalados ao lado de cada filtro, tendo-se que, ao chegar à carga hidráulica estipulada (0,80m), procedia-se a limpeza do filtro. Foram instalados dois piezômetros um no início e outro no final da camada de areia, de forma a permitir a verificação da perda de carga no meio filtrante, como ilustrado na Figura 27.

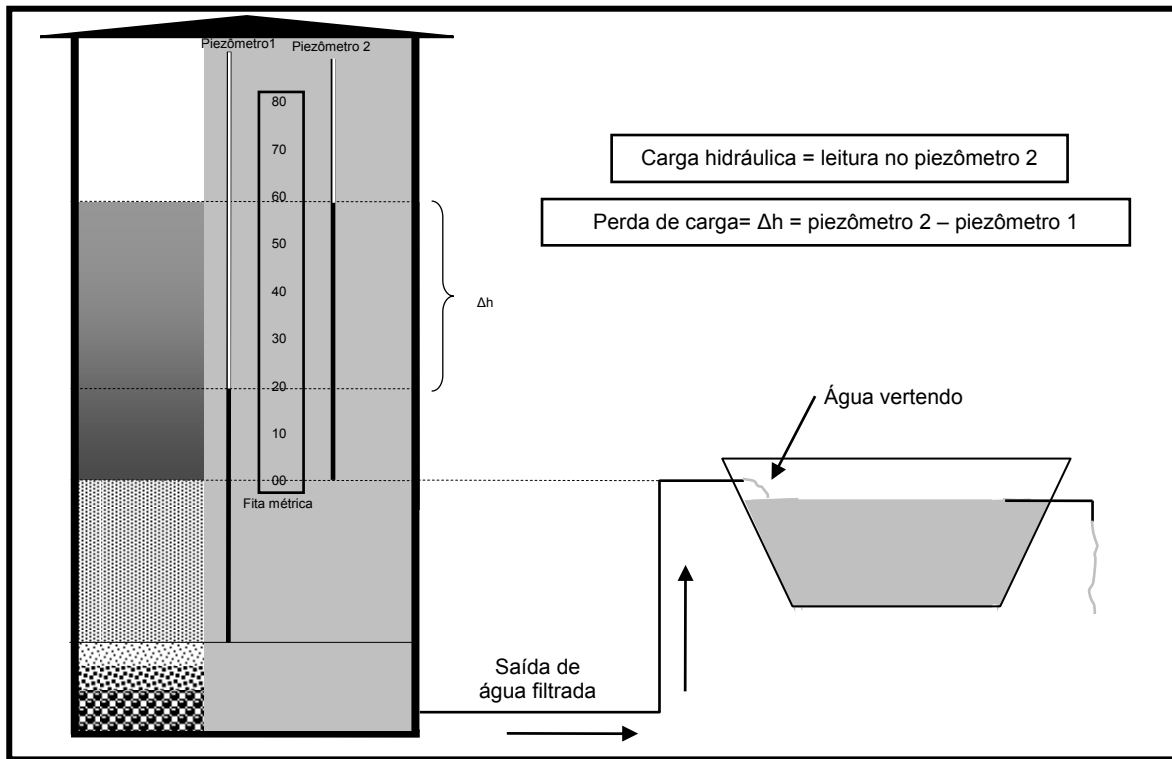


Figura 27 - Esquema da leitura da carga hidráulica e perda de carga no meio filtrante

c) Expansão do meio filtrante durante a retrolavagem

A aferição da expansão da camada filtrante durante a retrolavagem foi realizada na primeira carrega de filtração com o auxílio de uma haste de madeira com peneiras alocadas de forma correspondente a percentagem de expansão. Desta forma a última peneira que tiver material filtrante retido é equivalente a expansão durante a retrolavagem. O equipamento utilizado consiste em uma régua graduada com pequenas peneiras fixadas nos intervalos correspondentes a 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40% de expansão considerando 40 cm de altura do meio filtrante (Figura 28).

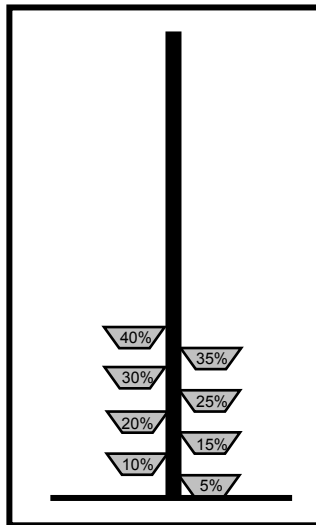


Figura 28 - Equipamento para aferir a expansão do meio filtrante

4.8. Análise estatística do sistema

Os dados foram submetidos à análise estatística realizada através do programa Minitab® 15. Os parâmetros cor, turbidez e tempo de carreira tiveram suas médias avaliadas através do teste t-pareado.

O teste t-pareado é um teste de hipóteses para a diferença média entre observações pareadas que são relacionadas ou dependentes. O teste-t pareado é útil para analisar diferenças em medidas de antes e depois em um mesmo elemento, e diferenças entre dois tratamentos dados aos mesmos elementos, que é o caso de estudo onde a mesma água bruta é submetida a filtros diferentes.

Este procedimento testa a hipótese nula de que há verdadeira diferença média dentro dos pares ($\mu_d = \mu_1 - \mu_2$) é igual a um valor hipotético ($H_0: \mu_d = \mu_1 - \mu_2 = \mu_0$). A hipótese alternativa pode ser unilateral à esquerda ($\mu_d < \mu_0$), unilateral à direita ($\mu_d > \mu_0$), ou bilateral ($\mu_d \neq \mu_0$).

O teste usa as seguintes hipóteses:

$H_0: \mu_d = 0$ (não há diferença entre as medias dos grupos analisados)

$H_1: \mu_d \neq 0$ (há diferença entre as medias dos grupos analisados)

O teste-t pareado indica se a diferença média observada dentro dos pares é estatisticamente significativa. O nível de confiança do teste foi de 95%.

5. Resultados e discussões

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho foi inicialmente avaliada a qualidade da água bruta com vistas à utilização da tecnologia proposta, em seqüência realizado o dimensionamento e implantação dos sistemas de filtração lenta. Estes foram avaliados a partir dos parâmetros de controle descritos na metodologia, e por fim foi realizada a análise estatística dos resultados visando comparar os sistemas.

5.1. Caracterização da água bruta

Os dados apresentados nesta seção referem-se ao monitoramento da água bruta no decorrer da pesquisa, que compreendeu os meses de março a dezembro de 2009. Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos, os valores correspondentes ao padrão de potabilidade da Portaria nº 518 de 2004 do Ministério da Saúde e os valores recomendados para utilização de filtros lentos.

Observa-se na Tabela 6, que os parâmetros: manganês, nitrito, nitrato e sólidos totais dissolvidos já se encontravam de acordo com a legislação vigente antes do tratamento. Sendo necessário tratamento nos demais parâmetros constantes na tabela.

A eficiência da filtração lenta esta relacionada às características da água bruta, desta forma, comparou-se os resultados obtidos com os valores recomendados para a utilização desta tecnologia de tratamento. Os Box-Whiskers (Figura 29 a 34) dos parâmetros de qualidade de água, coliformes totais, cor verdadeira, densidade de fitoplâncton, *E. coli*, ferro e turbidez, auxiliaram para avaliar a possibilidade de tratamento da água de estudo através da filtração lenta, tendo como base os valores recomendados por Bi Bernardo e Dantas (2005).

Quando respeitado os limites recomendados se esperam carreiras de filtração com duração superior a 30 dias. Valores acima dos recomendados sobrecarregam os filtros resultando em carreiras de curta duração.

Tabela 6 - Caracterização da água bruta

Parâmetro	Água Bruta	Padrão de potabilidade	Recomendação para uso de filtração lenta
Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$)	12,27 ^a ±9,47 ^b (5,58 – 18,97) ^c	-	5 *
Coliformes totais (NMP/100 mL)	2988±1014 (1726 – 3970)	Ausência em 100 mL	100% < 1000 ** 95% < 250 90% < 100
Densidade de fitoplâncton (células/mL)	615015 ± 352035 (207163 – 968295)	-	500 (UPA/mL)**
Cor aparente (uH)	64±12 (43 – 114)	15	-
Cor verdadeira (uH)	9±5 (2 – 23)	-	100% < 10 ** 95% < 5
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	28,8±18,5 (12,1 – 51)	Ausência em 100 mL	100% < 500 ** 95% < 250 90% < 100
Ferro total (mg/L)	0,32±0,20 (0,14 – 0,59)	0,3	100% < 1,5 ** 95% < 1,0 90% < 0,5
Manganês (mg/L)	0,056±0,024 (0,026 – 0,083)	0,1	100% < 0,7 ** 95% < 0,5 90% < 0,2
Nitrato (mg/L)	0,255±0,065 (0,177 – 0,337)	10	-
Nitrito (mg/L)	< LDT	1	-
pH	6,48±0,54 (5,38 – 7,63)	6,0 – 9,5	-
Sólidos totais diss. (mg/L)	42,9±10,4 (34,8 – 64,1)	1000	-
Turbidez (uT)	4,99±1,31 (3,49 – 9,98)	5 (rede) 2 (saída do tratamento)	100% < 15 ** 95% < 10 90% < 5

a média; b desvio padrão; c intervalo de dados; LDT limite de detecção; * Cleasby (1991); ** Di Bernardo e Dantas (2005).

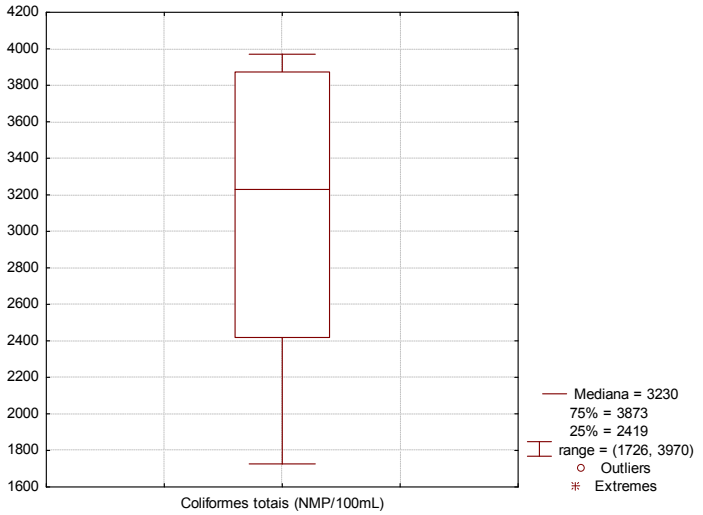


Figura 29 - Box-Whiskers Coliformes totais

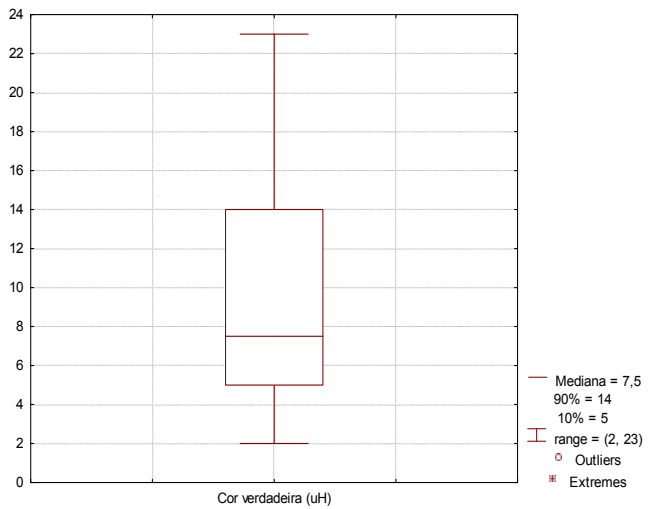


Figura 30 - Box-Whiskers Cor verdadeira

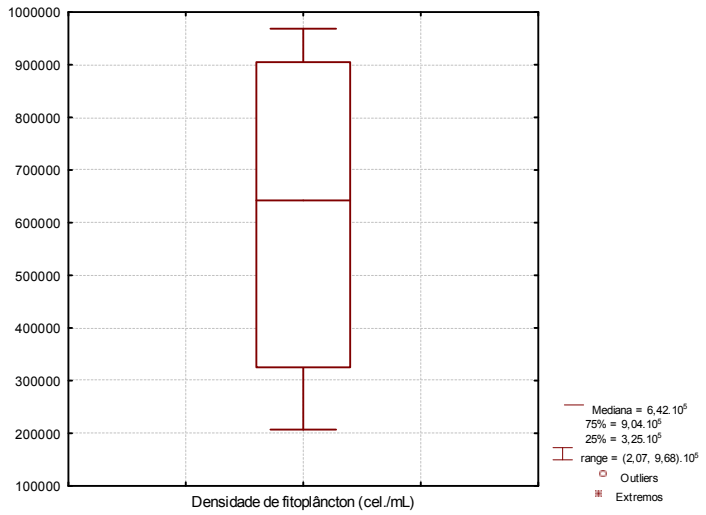


Figura 31 - Box-Whiskers Densidade de fitoplâncton

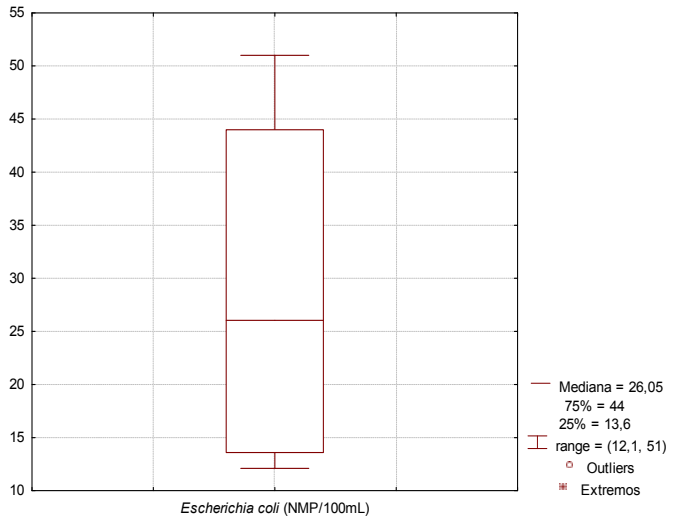


Figura 32 - Box-Whiskers E. coli

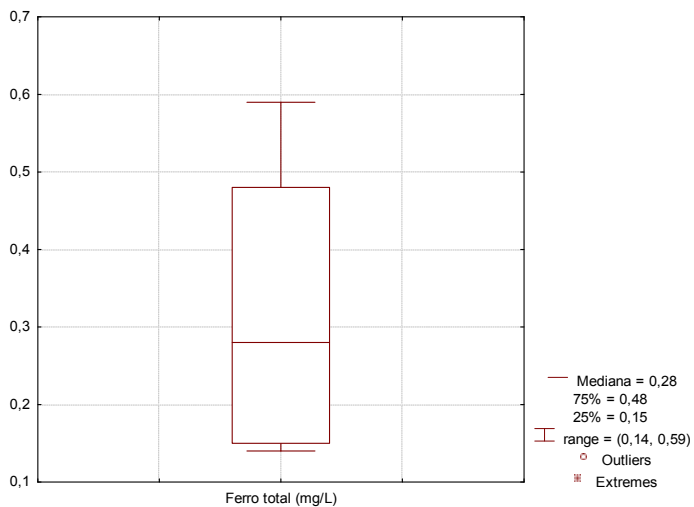


Figura 33 - Box-Whiskers Ferro total

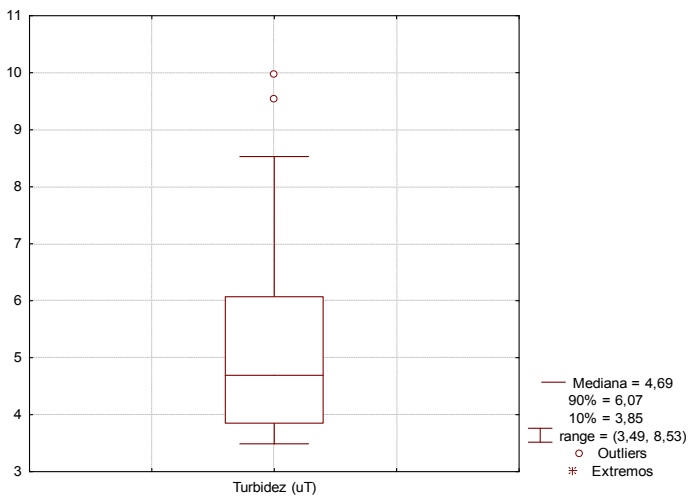


Figura 34 - Box-Whiskers Turbidez

A partir da tabela apresentada (Tabela 6) e Box-Whiskers (Figura 29 a 34) dos parâmetros de qualidade de água avaliados, é possível observar a variação da qualidade da água bruta, como também a distribuição dos resultados dos parâmetros avaliados. A água bruta obteve valores superiores aos recomendados por Di Bernardo e Dantas (2005), com exceção dos parâmetros *E. coli*, ferro total, manganês e turbidez que se encontram dentro dos recomendados.

Nas amostras de coliformes totais em 100% dos casos a água bruta ficou acima do recomendado. Apesar da filtração lenta, ter por característica a elevada redução deste parâmetro, sem adoção de pré-tratamento, não se espera a eliminação total de coliformes, necessitando posterior desinfecção, para adequação aos padrões de potabilidade da portaria nº 518 de 2004.

A cor verdadeira permaneceu em 90% das amostras abaixo de 14 uH. Este parâmetro que está ligado à presença de ácidos húmicos, sendo um potencial problema quando realizada a desinfecção da água filtrada resultando na geração de subprodutos da desinfecção, que são compostos potencialmente cancerígenos. A filtração lenta não tem bom desempenho na remoção de cor verdadeira, diante disto não se espera remoção significativa deste.

Os resultados da densidade de fitoplâncton com valores médios de $6,1 \times 10^5$ células/mL, mesmo não podendo ser comparados aos recomendados expressos em UPA/mL (unidade padrão de área por mililitro), demonstram que o manancial é rico em microalgas, esta característica conseqüentemente resultará em carreiras de filtração curtas, uma vez que as microalgas obstruirão rapidamente a camada superficial de areia. Cleasby, Hilmoie e Dimitracopoulos (1984), em seus estudos constaram que as carreiras de filtração se tornam mais longas quando a população algal é reduzida, atingindo carreiras de 141 dias no inverno e apenas 9 dias em um *bloom* algal.

A água bruta com as características apresentadas, principalmente em termos de densidade de fitoplâncton, resultaria em carreiras de filtração curtas se utilizada a tecnologia de filtração lenta (CLEASBY; HILMOIE; DIMITRACOPOULOS, 1984; DI BERNARDO, 1995; BRANDÃO et. al., 1999; DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999; CEZAR; CARVALHO; BRANDÃO, 2002).

As características apresentadas na água bruta desfavorecem a utilização da filtração lenta isoladamente, sendo necessária à adoção de pré-tratamento para se obter carreiras de longa duração. Para este trabalho não foi adotado pré-tratamento, pois carreiras de filtração mais curtas são interessantes para que estas fossem avaliadas em maior número no decorrer da pesquisa.

5.2. Ensaio preliminar: aferição da expansão do material filtrante

Após a colocação do material filtrante os três filtros entraram em operação com mesma taxa de filtração ($4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$). Durante a primeira carreira de filtração foi monitorado apenas a taxa de filtração. Ao final do ensaio com 0,80 m de perda de carga em cada filtro, foi realizada a limpeza da camada filtrante de cada filtro e aferida a expansão no filtro FLR, com o equipamento similar ao da Figura 28.

Ao final da operação de lavagem do filtro FLR foi observado que a expansão média durante a retrolavagem foi de 10%, não coincidindo com os 40% de expansão do dimensionamento anteriormente realizado. Refeitos os cálculos e não detectado erro no mesmo foi realizada a análise granulométrica do material filtrante. A Figura 35 apresenta o resultado da curva granulométrica com a areia utilizada nos três filtros. Observa que a areia entregue pela empresa não coincidia com o produto encomendado, uma vez que na curva granulométrica se observa, o diâmetro efetivo (d_{10}) de aproximadamente de 0,55 mm, superior aos 0,22 mm que foi tomado como base para realizar o dimensionamento.

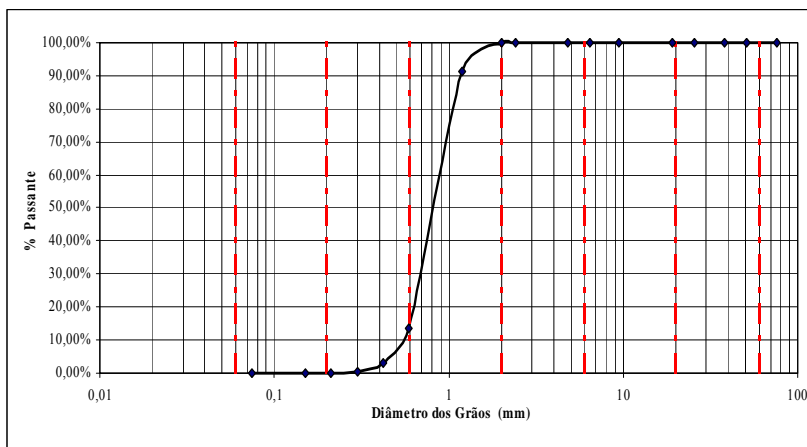


Figura 35 - Curva granulométrica

Normalmente o diâmetro efetivo utilizado em filtros lentos como abordado na seção 3.2 varia de 0,15 a 0,35 mm, entretanto Bellamy, Hendricks e Logsdon (1985), estudaram uma faixa de granulometria para filtros lentos compreendendo os diâmetros efetivo de 0,128 mm e 0,615 mm e relatam redução de eficiência de remoção de cistos de giárdia de 99,4% para 96,0% utilizando areia de diâmetro efetivo de 0,128 mm e 0,615 mm respectivamente.

A utilização de material filtrante de granulometria superior diminuiria então a eficiência, mas resultaria em carreiras de filtração mais longas, uma vez que teríamos uma maior penetração das impurezas.

O material filtrante com uma maior granulometria necessita maior velocidade de aproximação para que ocorra a expansão e fluidificação durante a retrolavagem, necessitando de carga hidráulica disponível superior, quando comparado a material de menor granulometria. A carga hidráulica disponível determinada no dimensionamento (realizado para camada filtrante de 0,40 m e $d_{10} = 0,22$ mm) não foi suficiente para que ocorresse expansão média de 40% em uma camada de areia de 0,4 m de altura e $d_{10} = 0,55$ mm, então a carga hidráulica disponível foi motivo pelo qual a expansão média alcançou apenas 10%.

Marnoto (2008) estudou a eficiência da filtração lenta com retrolavagem segundo a expansão da camada filtrante e obteve resultados promissores para expansão de 5 a 10% que garantiram a qualidade da água produzida e redução da quantidade de água para lavagem, em seu estudo foi utilizado areia com diâmetro efetivo de 0,30 mm e altura da camada filtrante de 40 cm.

Optou-se então por não trocar a areia dos filtros, e avaliar a filtração lenta com granulometria maior e expansão média de 10%. O tempo de limpeza por retrolavagem também foi alterado visto que a velocidade de aproximação foi menor, o tempo médio de retrolavagem ficou em torno de 7 min.

5.3. Duração das carreiras de filtração e perda de carga

Durante o tempo de monitoramento dos sistemas piloto foi possível realizar nove carreiras de filtração válidas. As primeiras duas carreiras de filtração foram desconsideradas por apresentarem duração média de 26 dias (32 e 20 dias respectivamente), estas carreiras foram consideradas para aclimação dos filtros, problemas com controle de vazão e cortes no fornecimento de energia elétrica deixaram algumas outras carreiras de filtração inválidas, uma vez que a alteração da vazão durante o ensaio afeta a qualidade de água e no desenvolvimento da perda de carga e conseqüentemente na duração da carreira. A Tabela 7 apresenta somente a duração dos ensaios considerados válidos.

Tabela 7 - Duração das carreiras de filtração válidas

Carreira nº	Duração da carreira de filtração (dias)		
	FLC	FLR	FLRb
1	15	15	15
2	15	17	17
3	15	13	11
4	11	13	9
5	13	13	N.D.
6	7	5	N.D.
7	15	17	N.D.
8	17	13	N.D.
9	13	15	N.D.

N.D.: não determinada

As carreiras de filtração tiveram em média duração de 13,4 dias para os filtros FLC e FLR. No filtro FLRb foi observado carreiras de filtração com duração média de 13 dias até o quarto ensaio, a partir daí foi detectado alteração no desenvolvimento da perda de carga no meio filtrante. A Figura 36 apresenta o comportamento da perda de carga na segunda carreira de filtração, tal comportamento foi observado até a quarta carreira nos três filtros.

A Figura 37 apresenta o comportamento da perda de carga da quinta carreira de filtração, tal comportamento no filtro FLRb foi observado até o final dos ensaios.

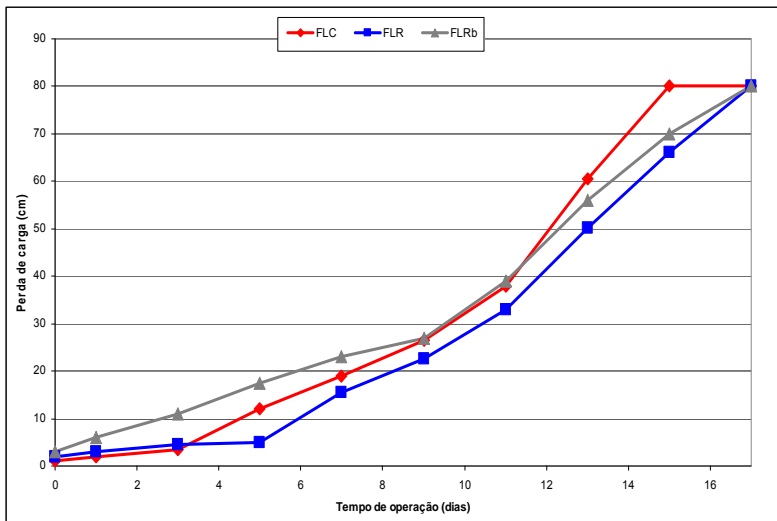


Figura 36 - Desenvolvimento da perda de carga na 2ª carreira de filtração

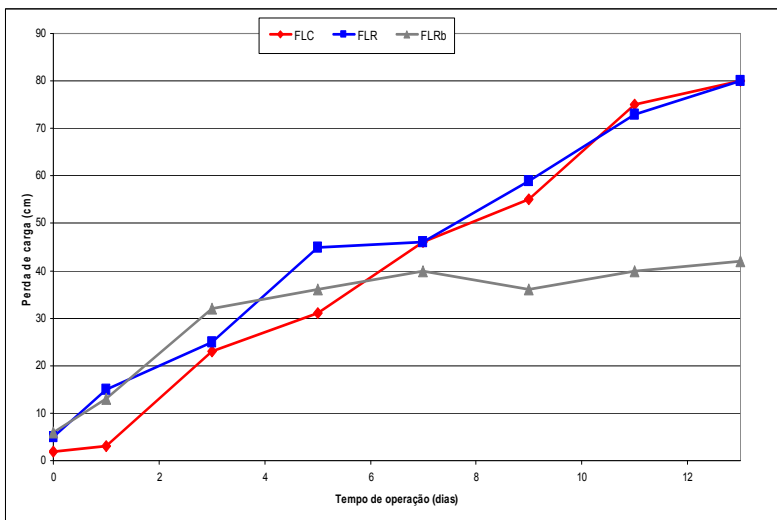


Figura 37 - Desenvolvimento da perda de carga na 5ª carreira de filtração

A partir da quinta carreira de filtração o filtro FLBb passou a operar com carga hidráulica máxima, entretanto a perda de carga no material filtrante não atingia 0,8 m. Em função disso o filtro passou a operar com carga hidráulica constante e taxa de filtração declinante. A condição de carga hidráulica máxima e taxa de filtração declinante iniciava entre o segundo e terceiro dia de carreira como pode ser observado na Figura 38, que apresenta os valores de carga hidráulica e perda de carga no meio filtrante para o filtro FLRb na oitava carreira de filtração.

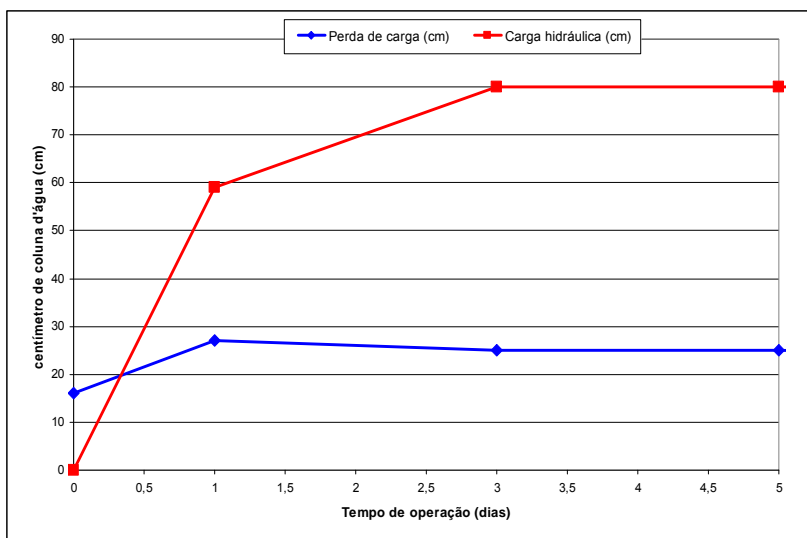


Figura 38 - Carga hidráulica e perda de carga no FLRb, 8ª carreira de filtração

Como a perda de carga não era acusada nos piezômetros locados nos extremos da camada filtrante, de forma a mensurar apenas a perda de carga nesta, o que estaria obstruindo a passagem de água poderia ser uma eventual colmatação da camada suporte.

Ao final da sexta carreira de filtração que apresentou duração de 7 e 5 dias para o FLC e FLR respectivamente, procedeu-se a limpeza da seguinte forma, retirou-se o dobro de material filtrante no filtro FLC (aproximadamente 5 cm) para limpeza, e foram realizadas 2 retrolavagens consecutivas nos filtros FLR e FLRb. Este procedimento

prolongou a carreira de filtração subsequente dos filtros FLC e FLR. A Figura 39 apresenta o desenvolvimento da perda de carga na sétima carreira de filtração. Observa-se que o procedimento não alterou o comportamento do filtro FLRb.

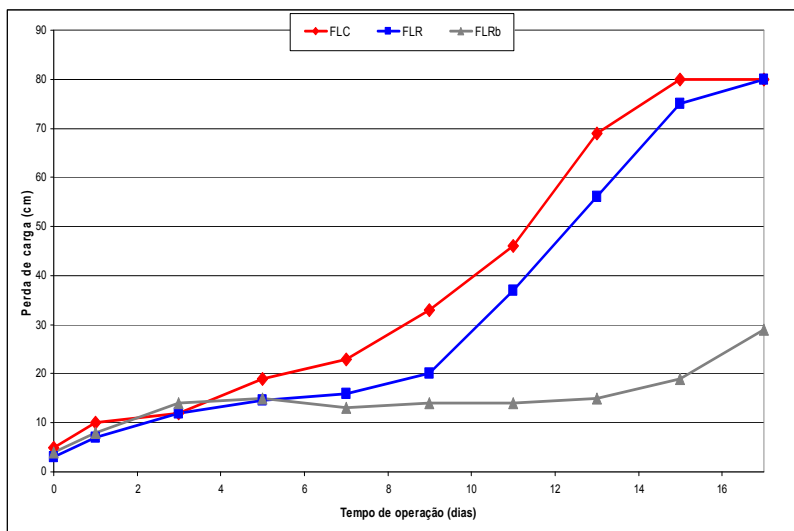


Figura 39 - Desenvolvimento da perda de carga na 7ª carreira de filtração

Como comentado anteriormente as carreiras de filtração não foram longas (acima de 30 dias), uma vez que não foram respeitados os valores de recomendados para utilização da tecnologia. A duração curta dos ensaios já era esperada, entretanto ressalta-se que a manutenção (limpeza) dos filtros retrolaváveis foi bastante facilitada, um dos objetivos do desenvolvimento desta técnica de limpeza.

Os filtros lentos FLC e FLR não parecem apresentar lavagem insuficiente uma vez que a perda de carga inicial no meio filtrante em ambos não aumenta consideravelmente com o decorrer de 5 carreias de filtração, como observado na Figura 40.

Contudo a curta duração da carreira nº 6 pode indicar uma deficiência na limpeza da 5ª carreira de filtração confirmando a afirmação de Richter e Azevedo Neto (2003), de que um filtro é tão bom

quanto sua limpeza, e esta é observada da carreira de filtração seguinte. Não se obteve relação da menor duração da sexta carreira de filtração com a alteração da água bruta, caracterizando novamente a limpeza insuficiente ao final do quinto ensaio de filtração. O problema foi solucionado na carreira de filtração seguinte que obteve duração de 15 dias para o filtro FLC e 17 para o filtro FLR.

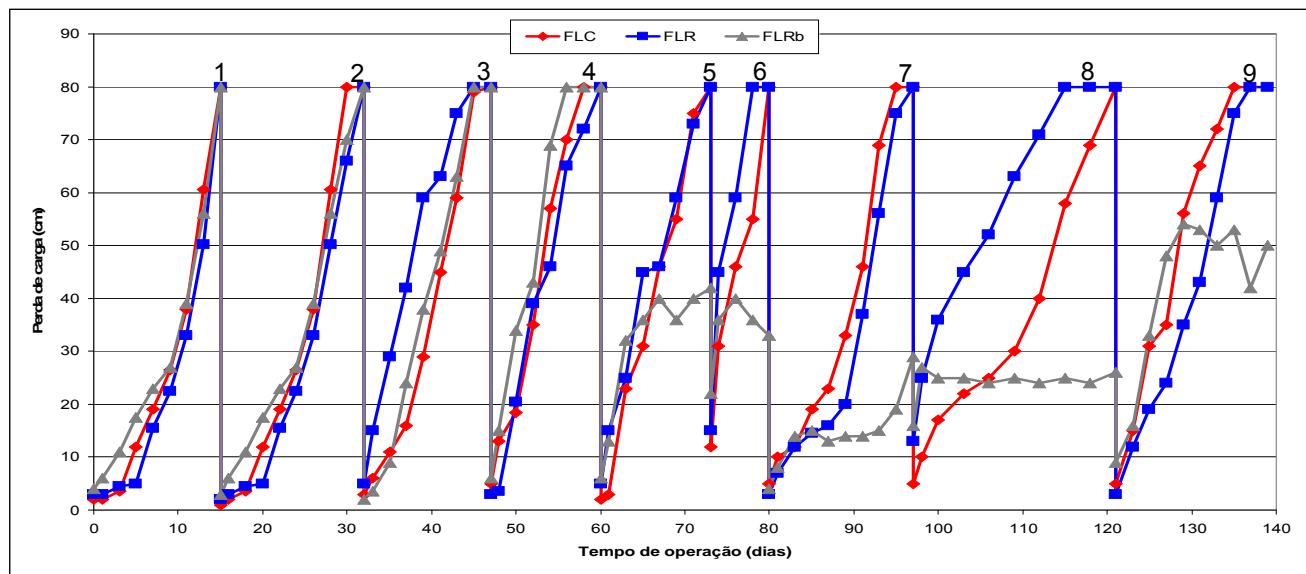


Figura 40 - Perda de carga durante as nove carreiras de filtração

5.4. Avaliação da limpeza dos filtros

Ao final dos ensaios de filtração os filtros eram lavados conforme descrito na metodologia nas seções de 4.5.1 a 4.5.3. A Figura 41 mostra o FLC com metade da camada filtrante raspada para evidenciar a presença da camada biológica.



Figura 41 - Foto do filtro FLC após raspagem da camada biológica

Durante a retrolavagem dos filtros FLR e FLRb, foi monitorado a cada 30 segundos a turbidez de modo a acompanhar a limpeza do material filtrante, é possível observar na Figura 42, referente a retrolavagem após a terceira carreira de filtração, que ocorre a elevação da turbidez em primeiro momento e a diminuição desta no decorrer da lavagem. Tal comportamento foi observado até a quarta operação de limpeza, nos dois filtros.

Os valores de turbidez, durante a retrolavagem, no filtro FLRb são mais elevados que no filtro FLR, isso porque, mesmo os dois filtros sendo alimentados com a mesma água bruta, dimensionados da mesma forma, conseqüentemente ocorrendo a mesma expansão na camada filtrante, a água utilizada durante a retrolavagem do FLR é uma água com turbidez média menor que 1 uT, o que não ocorre no FLRb que é retrolavado com água bruta que tem turbidez média de 5 uT.

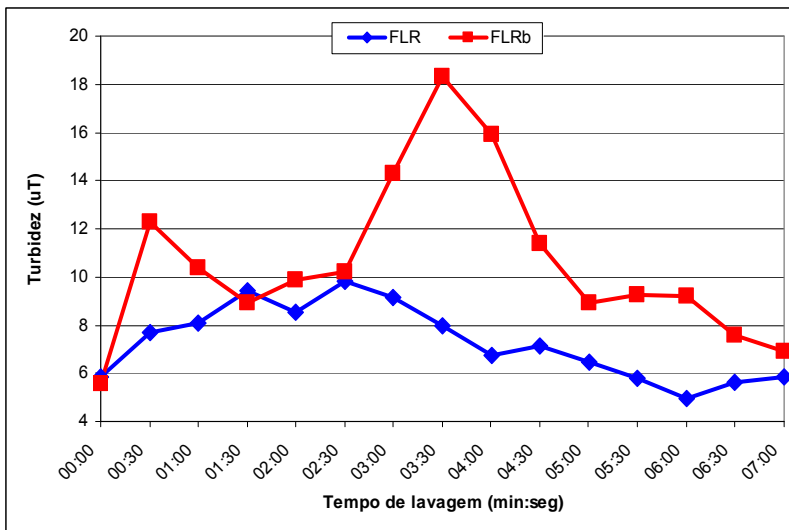


Figura 42 - Turbidez durante a retrolavagem na 3ª carreira de filtração

A amplitude de turbidez alcançada se deve ao fato da expansão durante a retrolavagem alcançar em média 10% (ou 4 cm), tal expansão não fluidifica a camada filtrante não causando, atrito intenso entre os grãos o que causaria um maior desprendimento do filme biológico aderido a superfície dos grãos, conseqüentemente uma maior magnitude turbidez durante a lavagem.

A partir da quinta carreira de filtração, foi observado, como comentado anteriormente, uma alteração no desenvolvimento da perda de carga no filtro FLRb. O que conseqüentemente alterou também a característica dos gráficos Turbidez x Tempo de lavagem até então observados. A Figura 43 mostra que durante a retrolavagem o FLRb a turbidez não se eleva e posteriormente diminuí, o que mais uma vez pode indicar que a areia não esteja “sujando”, e que maior parcela da perda de carga total do sistema ocorre na camada suporte colmatada.

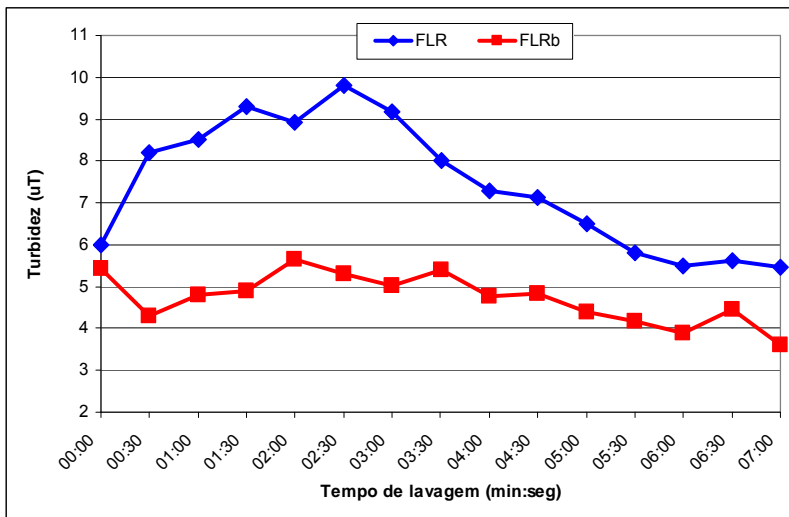


Figura 43 - Turbidez durante a retrolavagem na 7ª carreira de filtração

O comportamento do gráfico da Figura 43 pode ser indicativo de uma possível ineficiência na distribuição da água para a retrolavagem. A Figura 44 esquematiza o que possivelmente esteja ocorrendo durante a retrolavagem.

A instalação de um piezômetro na tubulação de saída de água filtrada, conforme ilustra a Figura 45, confirmou perda de carga considerável entre a camada suporte e saída de água filtrada. A ineficiência de distribuição possivelmente gerou a colmatação em parte da camada suporte, o que resulta nas condições de operação do filtro FLRb observadas desde a quarta carreira de filtração.

Um fator que pode estar também agravando a má distribuição da água para lavagem em ambos os filtros e a localização da saída da água de lavagem, como pode ser observado na Figura 46. A saída de água de lavagem através de uma única tubulação pode estar induzindo um fluxo preferencial durante a retrolavagem, visto que ela se encontra do lado oposto à região que tem a limpeza insuficiente no filtro FLR.

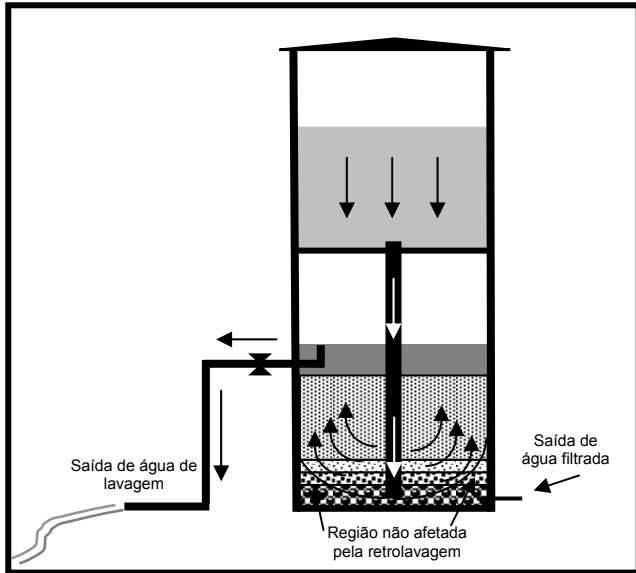


Figura 44 - Possível distribuição da água durante a retrolavagem do FLRb

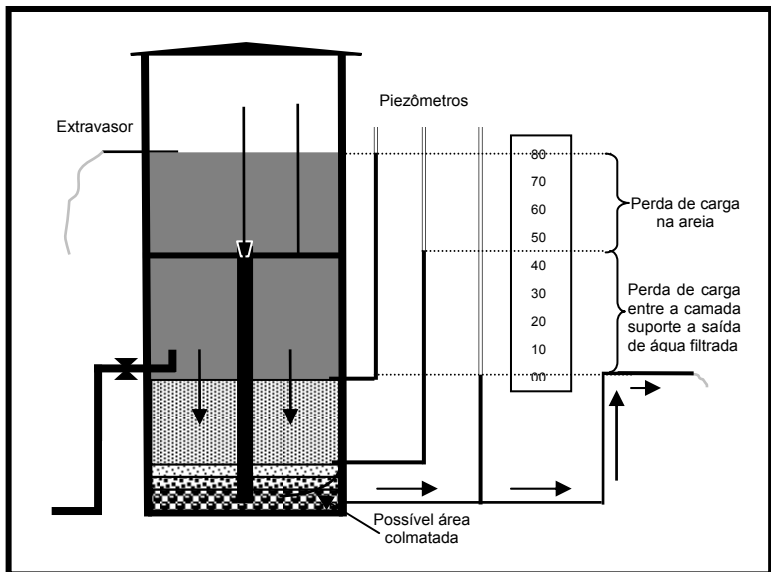


Figura 45 - Filtro FLRb e piezômetro auxiliar instalado

Foi detectada visualmente, logo após a terceira carreira de filtração, uma deficiência na distribuição de água para retrolavagem no FLR, como pode ser observada na Figura 46, a tubulação que conduz a água para a retrolavagem pode criar caminhos preferenciais para a passagem da água, assim não ocorrendo a limpeza de forma homogênea em todo o meio filtrante. Na limpeza da sétima carreira de filtração, em que foi realizada duas retrolavagens consecutivas, obteve-se uma maior área visualmente limpa.

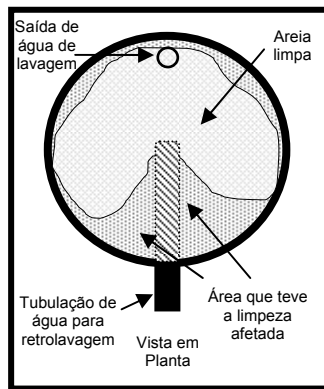


Figura 46 - Representação do filtro FLR após a retrolavagem.

Com auxílio de um bastão, foi possível verificar que onde a areia parecia visualmente mais limpa havia ocorrido expansão, pois o bastão penetrava facilmente, por outro lado onde a areia parecia que não tinha sido lavada suficientemente o bastão tinha maior resistência a penetração. Apesar da aparente deficiência na distribuição da água durante a retrolavagem, a mesma não gerou alteração do regime de funcionamento do filtro FLR.

Este problema de má distribuição da água durante a retrolavagem, pode ser solucionado, em ambos os filtros (FLR e FLRb) com a adoção de fundo falso, desta maneira garantindo a distribuição uniforme da água para a retrolavagem. O emprego deste dispositivo agregaria aproximadamente 20 cm a mais no tamanho total dos filtros retrolaváveis. No que se refere ao fluxo preferencial, a adoção de calha de coleta de água de lavagem amenizaria o problema.

5.5. Qualidade da água após limpeza

Após a limpeza dos filtros lentos as primeiras horas de filtração produzem água com qualidade insatisfatória, a fim de avaliar a recuperação da qualidade da água, após a limpeza referente a terceira carreira de filtração foi monitorado a qualidade da água em termos de cor e turbidez. As Figuras 47 e 48 apresentam a recuperação da qualidade da água depois de efetuada a limpeza.

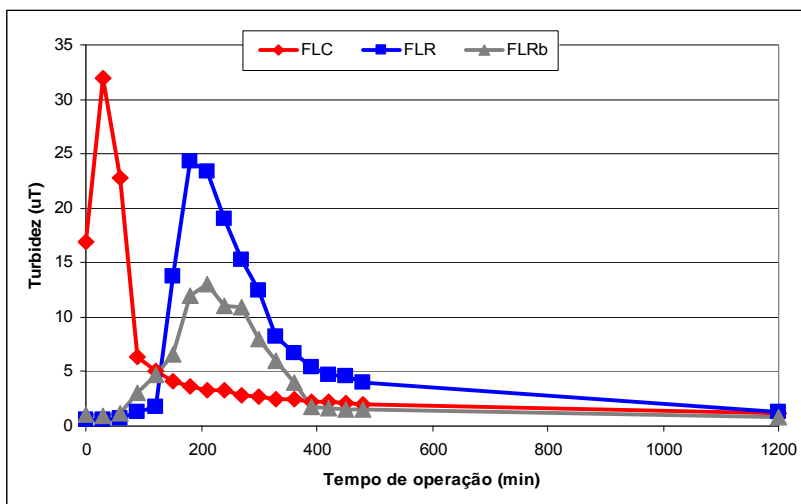


Figura 47 - Turbidez após a lavagem dos filtros início da 4ª carreira de filtração

Observa-se na Figura 47, que no filtro FLC, o parâmetro turbidez permanece 2 horas acima de 5 uT, que é o valor máximo permitido segundo a Portaria nº 518 de 2004 do Ministério da Saúde. Já nos outros dois filtros a partir de duas horas de operação, o parâmetro ultrapassa o valor de 5 uT, atinge o pico e inicia a recuperação.

Nos filtros FLR e FLRb, após ultrapassarem 5 uT, os mesmos levam aproximadamente 5 horas para a turbidez retornar ao patamar de cinco unidades, isto se deve ao fato que durante a retrolavagem ocorre um maior revolvimento na camada filtrante do que quando se utiliza o

método de raspagem. Ao final de 20 horas de operação os três filtros apresentavam turbidez abaixo de 2 uT (1,57, 1,5 e 1,02 uT para os filtros FLC, FLR e FLRb, respectivamente), o máximo permitido em 95% das amostras após o tratamento segundo a mesma portaria do ministério da saúde.

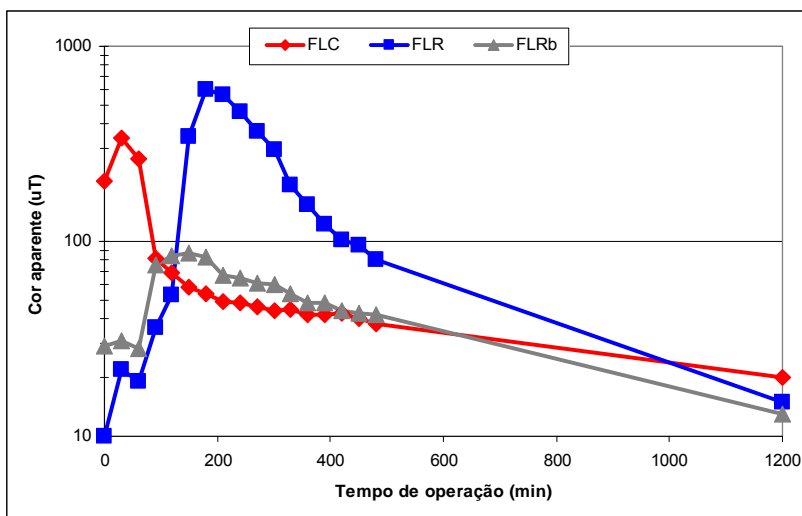


Figura 48 - Cor aparente após a lavagem dos filtros início da 4ª carreira de filtração

No entanto a cor aparente em nenhum dos filtros estava abaixo de 15 uH, após 20 horas de operação, apresentando valores de 17, 21 e 19 uH para os filtros FLC, FLR e FLRb, respectivamente. O comportamento dos picos e recuperação da qualidade foi equivalente ao da turbidez, sendo nos dois parâmetros analisados no filtro FLC ocorreu primeiro o pico e a recuperação da qualidade, como era de se esperar uma vez que os outros dois filtros são retrolavados com fluxo contrário ao da filtração, o que gera um maior revolvimento de todo o material filtrante.

5.6. Qualidade da água filtrada

Nesta seção será abordada a qualidade da água filtrada depois de ao menos 24 horas de início da carreira até o seu final. Os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos avaliados são alguns dos exigidos na Portaria nº 518 de 2004 do Ministério da Saúde, outros parâmetros foram monitorados a fim de avaliar o desempenho dos filtros. A Tabela 8, apresentam os resultados referentes ao período de monitoramento dos filtros.

Como mencionado na seção 5.1 alguns parâmetros já se encontravam abaixo dos valores máximos permitidos da portaria. Mesmo assim foram avaliados estes parâmetros após a filtração e os mesmos continuaram dentro dos padrões estabelecidos pela mesma, dentre eles estão: manganês, nitrato, nitrito e sólidos dissolvidos totais.

Com relação ao parâmetro manganês, este sempre permaneceu abaixo da faixa de recomendação para utilização do método (0,1 – 3 mg/L), como o valor máximo permitido da portaria é 0,1 mg/L e os valores mensurados sempre foram ao menos 5 vezes abaixo deste, não se preocupou em utilizar outro método para detecção deste parâmetro.

O mesmo ocorreu com os parâmetros nitrato e nitrito que tem seu valor máximo permitido de 10,0 e 1,0 mg/L respectivamente. Os métodos utilizados para a detecção de nitrito e nitrato são recomendados para intervalos de concentração de 0,10 e 15,00 mg/L para nitrato e 0,02 e 0,50 mg/L para nitrito. O nitrato é um padrão de potabilidade com valor máximo fixado em 10 mg/L, no decorrer dos ensaios foram mensurados concentrações entre 0,035 – 0,396 mg/L, tais concentrações não causam impedimento no que diz respeito a potabilidade de acordo com a portaria. A faixa de nitrito encontrado sempre esteve fora do limite de detecção do método e abaixo do valor máximo permitido.

A alcalinidade foi avaliada com o intuito de relacioná-la a alteração do sabor da água (amargo), uma vez que ela não representa risco potencial a saúde, sendo rejeitada com concentrações inferiores as que podem trazer prejuízos mais sérios (PIVELI; KATO, 2006). Sendo o pH que regula os componentes da alcalinidade e este sempre esteve abaixo de 8,3 à alcalinidade mensurada é devida apenas a bicarbonatos.

Tabela 8 - Resultado do monitoramento dos filtros

Parâmetro	Água Bruta	FLC	FLR	FLRb	Padrão de potabilidade
Alcalinidade	12,2 ^a ±3,0 ^b (9,4 – 18,6) ^c	11,3±5,2 (7,6 – 22,8)	12,7±7,3 (7,6 – 28,8)	13,0±9,0 (6,8 – 33,0)	-
Clorofila a (µg/L)	12,28±9,47 (5,58 – 18,97)	1,01±0,16 (0,89 – 1,12)	0,76±0,52 (0,39 – 1,12)	1,34±1,90 (0,00 – 2,68)	-
Coliformes totais (NMP/100 mL)	2988±1014 (1726 – 3970)	95,1±113,9 (8,6 – 261,3)	83,4±73,7 (3,1 – 195,0)	175,9±153,9 (4,1 – 410,6)	Ausência em 100 mL**
Condutividade (µS/cm ²)	88,35±21,49 (73,1 – 128,2)	73,45±3,78 (66,0 – 76,4)	72,68±5,38 (62,0 77,2)	74,02±4,94 (64 – 77)	-
Cor Aparente (uH)	64±12 (43 – 114)	15±8 (4 – 47)	18±9 (6 – 47)	16±8 (3 – 46)	15 **
Cor verdadeira (uH)	9±5 (2 – 23)	9±4 (1 – 18)	9±5 (1 – 23)	9±5 (1 – 24)	-
Densidade de fitoplâncton (células/mL)	6,1×10 ⁵ ±3,5×10 ⁵ (2,0×10 ⁵ – 9,7×10 ⁵)	1,3×10 ⁵ ±1,3×10 ⁵ (4,5×10 ⁴ – 3,3×10 ⁵)	1,3×10 ⁵ ±5,2×10 ⁴ (8,1×10 ⁴ – 1,9×10 ⁵)	2,8×10 ⁵ ±3,4×10 ⁵ (6,2×10 ⁴ – 7,9×10 ⁵)	-
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	28,8±18,5 (12,1 – 51)	< 1 (< 1)	< 1 (< 1 – 3,1)	< 1 (< 1 – 1)	Ausência em 100 mL **

a média; b desvio padrão; c intervalo de dados; * abaixo do limite de detecção; ** após desinfecção

Tabela 8 - Resultado do monitoramento dos filtros (continuação)

Parâmetro	Água Bruta	FLC	FLR	FLRb	Padrão de potabilidade
Ferro total (mg/L)	0,32 ^a ±0,20 ^b (0,14 – 0,59) ^c	0,04±0,03 (0,01 – 0,09)	0,09±0,06 (0,03 – 0,18)	0,11±0,06 (0,04 – 0,18)	0,3
Manganês (mg/L)	*	*	*	*	0,1
Nitrato (mg/L)	0,255±0,065 (0,177 – 0,337)	0,205±0,123 (0,035 – 0,384)	0,330±0,068 (0,225 – 0,396)	0,287±0,040 (0,227 – 0,341)	10
Nitrito (mg/L)	*	*	*	*	1
Oxigênio dissolvido (mg/L)	8,61±0,58 (7,68 – 9,34)	3,82±0,97 (2,80 – 4,92)	3,48±1,09 (2,52 – 4,54)	2,89±1,26 (1,60 – 4,60)	-
pH	6,48±0,54 (5,38 – 7,63)	6,08±0,49 (4,70 – 7,15)	6,07±0,41 (5,22 – 6,88)	5,97±0,41 (5,09 – 6,73)	6,0 – 9,5
Sólidos totais Diss. (mg/L)	42,9±10,4 (34,8 – 64,1)	36,8±2,1 (33,0 – 38,6)	36,5±2,9 (31,0 – 39,4)	37,0±2,5 (32,0 – 39,1)	1000
Temperatura	22,98±3,89 (15,6 – 29,3)	22,40±3,93 (15,4 – 28,9)	22,89±3,85 (15,1 – 29,4)	22,36±3,84 (15,2 – 28,3)	-
Turbidez (uT)	4,99±1,31 (3,49 – 9,98)	0,93±0,36 (0,47 – 2,58)	1,07±0,36 (0,54 – 2,46)	0,94±0,38 (0,42 – 2,92)	5 (rede) 2 (saída do tratamento)

a média; b desvio padrão; c intervalo de dados; * abaixo do limite de detecção; ** após desinfecção

A população algal, muito importante na adequação da água bruta para utilização da filtração lenta, como comentado na seção 5.1, obtiveram valores mensurados para clorofila-a e densidade de fitoplâncton que resultaram em carreiras curtas como foi constatado na seção 5.3. A espécie predominante no manancial é da cianobactéria da espécie *Cylindrospermopsis raciborskii*, sua presença gera um problema em potencial ao tratamento uma vez que podem liberar toxinas, e por apresentarem formas filamentosas contribuem para a rápida colmatação de meio filtrante. Os filtros apresentaram remoção de fitoplâncton de aproximadamente 78% para FLC e FLR e 54,65% para o FLRb. A baixa remoção do FLRb pode ser atribuída também a desprendimento de algas da camada suporte colmatada.

Mesmo os filtros lentos operando fora da recomendação em termos de coliformes totais, estes obtiveram desempenho satisfatório na remoção deste parâmetro, com remoções médias de 96,8, 97,2 e 94,1 % (1,5log; 1,6log; 1,2log) para os filtros FLC, FLR e FLRb respectivamente. O parâmetro *E. coli.*, foi observado apenas uma vez nos filtros FLR e FLRb, onde foi mensurado 3,1 e 1 NMP/100mL respectivamente. Nas demais amostras durante os experimentos sempre foi detectado < 1 NMP/100mL. Estudos de Murtha e Heller (2003) e Brito et. al. (2005), indicam maior percentual destes parâmetros até 45 cm de meio filtrante. A eficiência na remoção dos parâmetros em questão é evidenciada com o amadurecimento do filtro (BRITO et al., 2005; ELLIOTT et al., 2008). A remoção esperada destes parâmetros varia de 1 a 3 logs (COLLINS; EIGHMY; MALLEY, 1991). Ou seja de 90 a 99,9 %.

A cor verdadeira por ser atribuída a substâncias dissolvidas ou coloidais principalmente substâncias húmicas, seria necessário coagulação química da água para remoção efetiva deste parâmetro (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999). A remoção deste parâmetro variou entre 0 e 40 % nos filtros, com incremento de cor em algumas carreiras. Nas nove carreiras de filtração válidas a remoção média deste parâmetro foi insignificante.

Por outro lado a cor aparente, que é padrão de potabilidade com valor máximo permitido de 15 uH, foi removida de forma significativa de modo a deixar os três filtros próximos ao valor máximo permitido. No filtro FLC a percentagem remoção foi de 76,56±4,07, no FLR 73,11±5,64 e no FLRb 74,67±4,56. Tais remoções estão acima da

normal esperada em filtros lentos de acordo com Azevedo Netto (1976), que relata remoção de 50 à 60%. Percentagens inferiores às obtidas por Rocha et. al. (2000) que mensuraram remoções de até 50% e Murtha; Heller (2003), que relatam eficiência de 41% na remoção de cor aparente.

A Figura 49, apresenta as médias das medidas de cor aparente durante as nove carreiras de filtração, a linha de referência está localizada na faixa de 15 uH valor máximo permitido (VMP) de acordo com a portaria.

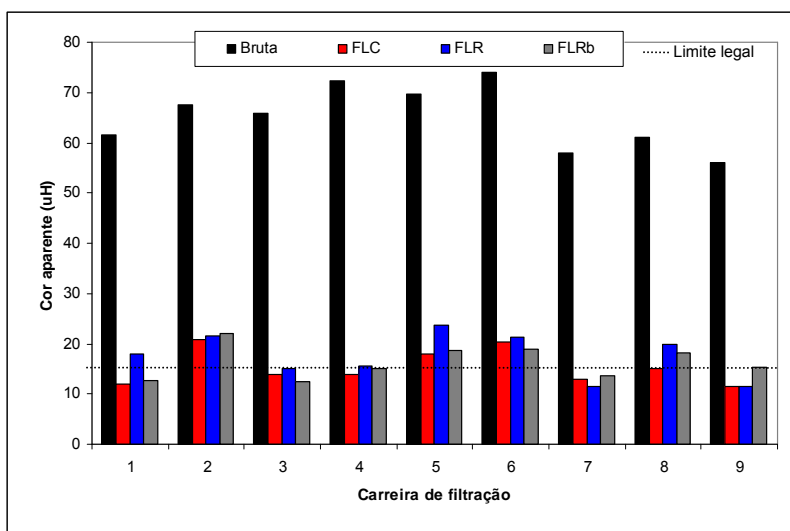


Figura 49 - Médias das medidas de cor aparente durante as carreiras de filtração

No manancial em estudo, a água bruta apresenta turbidez proveniente principalmente pela grande concentração de fitoplâncton, esta elevada concentração seria um ponto negativo para aplicação da tecnologia de filtração lenta, no que se refere ao tempo de carreira de filtração. Na Figura 50, observa-se uma elevada remoção de turbidez e um efluente com turbidez média de aproximadamente uma unidade, metade do valor máximo permitido pela Portaria nº 518 do Ministério da Saúde que fixa como turbidez máxima de água filtrada através de

filtração lenta em 2 uT, mas como já comentado nas seções anteriores a carreiras de filtração são mais curtas que as esperadas para este tipo de tecnologia. As remoções variaram durante as carreiras de filtração, apresentando percentagens médias de 81,67±2,83 (FLC), 79,33±3,09 (FLR) e 81,56±3,20 (FLRb).

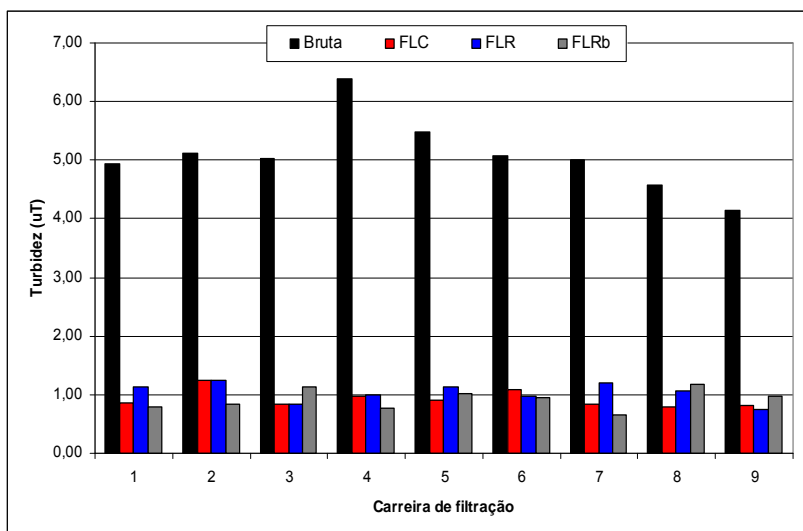


Figura 50 - Médias das leituras de turbidez durante as carreiras de filtração

A remoção de ferro nos filtros foi significativa, permanecendo os três filtros abaixo do limite da portaria. Sendo observado no filtro FLC observado a maior remoção média (86%), seguido do FLR com 72% e o FLRb com 67%. Esta remoção pode ser atribuída em partes à precipitação do ferro na camada biológica.

O oxigênio dissolvido foi avaliado para garantia de oxigênio para a ação biológica. Após a filtração parte do oxigênio foi consumido no processo, para reverter esta situação a água deve ser reaerada, a fim de retomar a concentração de oxigênio dissolvido próximo a 8 mg/L.

Os valores de pH na água em estudo variaram entre 5,38 e 7,63, com valores médios próximos de 6,48, não tendo sido observadas

grandes alterações deste parâmetro nas águas filtradas, que tiveram valor médio em torno de 6,0, valor limite da portaria.

A temperatura da água bruta e filtradas variaram ao longo dos ensaios, em função das estações do ano e também com a condição climática no momento da coleta (sol, chuva).

Nas carreiras após o problema de colmatação no filtro FLRb constatado, a água filtrada passou a apresentar odor desagradável. Este odor também é relacionado com a colmatação da camada suporte. Segundo Piveli; Kato (2006), ambientes eutrofizados, podem liberar sabor e odor na água, e certos gêneros de cianobactérias produzem compostos odoríferos. O odor observado era característico da degradação biológica da matéria orgânica.

Ressalta-se que em nenhum momento foi realizada a desinfecção das águas filtradas, que é necessária para o consumo desta água. Uma vez realizada a desinfecção da água parâmetros como: cor aparente, coliformes totais, *E. coli*, densidade de fitoplâncton e ferro total teriam suas concentrações reduzidas.

5.7. Avaliação estatística do sistema

Os resultados obtidos em função de cor aparente, turbidez e duração das carreiras foram submetidos a análise estatística a fim de determinar estatisticamente o desempenho dos filtros. Os dados de cor e turbidez utilizados na análise foram obtidos a partir de 24 horas do início das carreiras de filtração. O filtro FLRb foi excluído desta análise uma vez que este teve seu funcionamento prejudicado pela má distribuição da água durante a lavagem. A Tabela 9 apresentam os valores da média, desvio padrão e coeficiente de variação de *Pearson*. Este coeficiente (desvio padrão sobre a média) indica a dispersão dados de uma amostra, sendo que quanto menor seu valor, mais homogêneo é o conjunto de dados. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do Microsoft Office Excel 2003 e Minitab® 15.

Tabela 9 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação de *Pearson*

Parâmetro \ Filtro	FLC	FLR
Cor aparente (uH)	15 ^a ±8 ^b (0,53) ^c	18±9 (0,50)
Turbidez (uT)	0,93±0,36 (0,39)	1,07±0,36 (0,37)
Tempo de carreira (dias)	13±3 (0,23)	13±4 (0,31)

a média; b desvio padrão; c coeficiente de variação de *Pearson*;

Para os parâmetros cor aparente e turbidez, o coeficiente de variação de *Pearson* apresenta uma pequena diferença, o que indica que os valores mensurados têm a mesma distribuição, cada um em relação a sua média. Já no que se refere ao tempo de carreira de filtração, que tem médias iguais o coeficiente indica pouca dispersão dos dados.

Com o objetivo de comparar os dois grupos, FLC e FLR, visto que os dados são continuados, a amostra é um conjunto de pares combinados, uma vez que dos dois filtros recebem a mesma água bruta, se utilizou o teste t-pareado para avaliar as diferenças entre as médias das observações, pois estas seguem distribuição simétrica.

A Tabela 10 e a Figura 51 apresentam o resultado do teste t-parado para o parâmetro cor aparente.

Tabela 10 - Teste t-pareado cor aparente

Teste t-pareado para CI: FLC (cor); FLR (cor)				
	N	Média	Desvio padrão	Erro padrão
FLC	53	15,34	7,67	1,05
FLR	53	17,77	7,83	1,08
Diferença	53	-2,434	4,893	0,672
95% CI para diferença média: (-3,783; -1,085)				

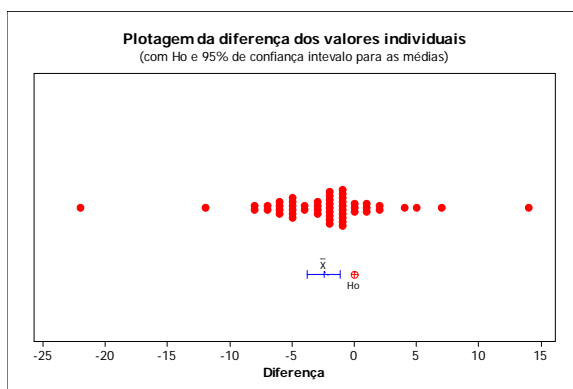


Figura 51 - Diferenças dos valores individuais (cor aparente)

Antes do teste já se observava que havia diferença entre as médias da cor aparente dos dois filtros avaliados, o que foi comprovado através da análise estatística, onde se observa que a diferença entre as médias fica fora do intervalo de confiança de 95%. Isto demonstra que para este parâmetro o filtro FLC obteve eficiência superior e diferente do filtro FLR durante os ensaios de filtração.

A Tabela 11 e Figura 52 apresentam o mesmo teste aplicado para o parâmetro turbidez, que aparentemente tinha pouca variação entre as médias.

Tabela 11 - Teste t-pareado turbidez

Teste t-pareado para CI: FLC (turbidez); FLR (turbidez)				
	N	Média	Desvio padrão	Erro padrão
FLC	56	0,9336	0,3554	0,0475
FLR	56	1,0886	0,3700	0,0494
Diferença	56	-0,1550	0,3914	0,0523
95% CI para diferença média: (-0,2598; -0,0502)				

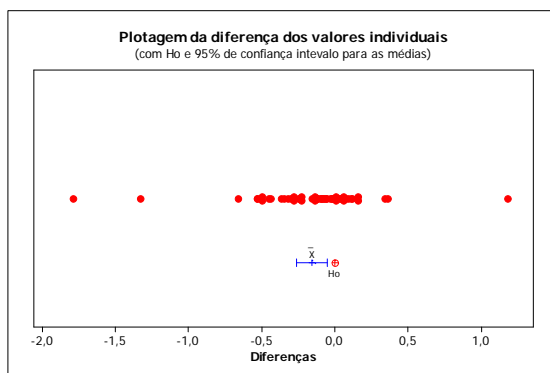


Figura 52 - Diferenças dos valores individuais (turbidez)

A turbidez com variação entre as médias de 0,1 uT, parecia não ter diferença significativa, no entanto após a realização do teste t-pareado se verificou que esta diferença está fora do intervalo de confiança de 95%, provando que as médias são estatisticamente diferentes entre si. Desta forma o filtro FLC obteve novamente melhor desempenho que o filtro FLR.

Com relação ao tempo de carreira que tem a média aritmética igual, também foi aplicado o teste para comprovar estatisticamente, que os dois filtros, com relação a esta variável, se comportaram de maneira similar. Os resultados do teste estatístico são apresentados na Tabela 12 e Figura 53.

Tabela 12 - Teste t-pareado tempo de carreira

Teste t-pareado para CI: FLC (carreira); FLR (carreira)				
	N	Média	Desvio padrão	Erro padrão
FLC	9	13,44	2,96	0,99
FLR	9	13,44	3,57	1,19
Diferença	9	-0,000	2,236	0,745
95% CI para diferença média: (-1,719; 1,719)				

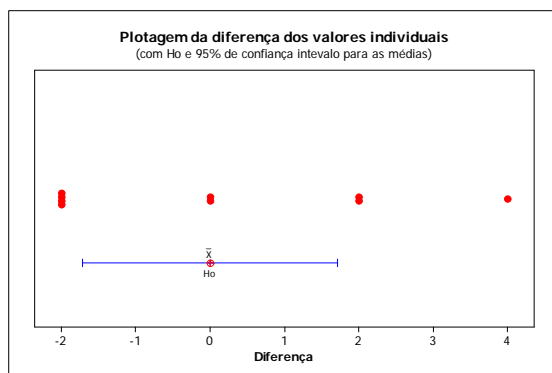


Figura 53 - Diferenças dos valores individuais (carreira de filtração)

No que se refere ao tempo de carreira de filtração foi confirmado estatisticamente que não existe diferença significativa entre as médias, ou seja, os dois filtros se comportaram estatisticamente de forma similar durante os ensaios.

Analisando as três variáveis, se observa que o filtro FLC teve melhor desempenho em duas variáveis. Do ponto de vista de qualidade da água a variável turbidez esta de acordo com os padrões de potabilidade em ambos os filtros, já para a variável cor aparente o filtro FLR produziu efluente acima do limite máximo permitido. Por outro lado, do ponto de vista operacional, apesar dos dois filtros apresentarem carreiras de filtração de mesma duração, a limpeza do filtro FLC demanda maior mão de obra em comparação ao filtro FLR que tem a limpeza facilitada, com a abertura de uma única válvula.

6. Conclusões e recomendações

Ao final desta pesquisa se conclui que:

- A água bruta da Lagoa do Peri, não é ideal para a utilização da filtração lenta com limpeza convencional sem pré-tratamento, do ponto de vista de duração de carreias de filtração;
- Do ponto de vista de qualidade de água, os filtros tiveram bom desempenho mesmo operando fora das condições recomendadas para a tecnologia;
- A camada filtrante de 40 cm foi suficiente para garantir a qualidade de água em termos de coliformes totais e *E. coli*.
- A carga hidráulica máxima aplicada esta abaixo da carga hidráulica na qual inicie o transpasse de impurezas, pois não a perda de qualidade em termos de cor e turbidez durante as carreias de filtração;
- A expansão de 10% no filtro FLR e o tempo de lavagem de aproximadamente 7 min foram suficientes para limpeza do meio filtrante;
- Se utilizada a técnica de filtração com retrolavagem as carreias de filtração tiveram duração satisfatória, tendo em vista a facilidade da limpeza;

- Durante a retrolavagem é importante que a água seja distribuída uniformemente e a coleta da água de lavagem não favoreça fluxo preferencial;
- Os filtros avaliados produzem água com turbidez adequada após 20 horas de operação;
- Estatisticamente o filtro FLC demonstrou melhor desempenho em relação a qualidade da água, entretanto os dois filtros analisados produziram água de qualidade;
- O filtro FLR tem operação de limpeza facilitada pelo sistema de lavagem adotado.

Recomenda-se para futuras pesquisas:

- Avaliar a formação da camada biológica e seu papel no tratamento;
- Avaliar a atividade biológica do meio filtrante após a retrolavagem;
- Avaliar outras taxas de filtração e sua influência quanto a qualidade de água filtrada;
- Avaliar o desempenho dos filtros com diferentes expansões durante a retrolavagem;

- Estudar diferentes granulometrias, com o intuito de prolongar a carreira de filtração utilizando manancial rico em fitoplâncton;
- Avaliar o desempenho do sistema com adoção de pré-tratamento;
- Aprimorar o desenho dos filtros FLR e FLRb, com adoção de fundo falso e calha de coleta de água de lavagem;
- Avaliar o potencial de formação de sub-produtos da desinfecção, após cloração do efluente filtrado.

7. Referências bibliográficas

- AMIRTHARAJAH, A. Some theoretical and conceptual views of filtration. **Journal of the American Water Works Association**, v. 80, n.12, p. 36-46, 1988.
- APHA – **American Public Health Association**. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20^o ed. Washington: APHA, 1998.
- AZEVEDO NETTO, J. M. A. - **Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água – Volume 2**. 2^a edição - S. Paulo; CETESB, 1979
- BELLAMY, W. B.; HENDRICKS, D. W.; LOGSDON, G. S. Slow sand filtration: influences of selected process variables. **Journal Of The American Water Works Association**, Nova Iorque, p. 62-66. 1 dez. 1985
- BRANDÃO, C. C. S.; et al. Pré-filtração em pedregulho aplicada ao tratamento de águas com elevados teores de algas - influência da granulometria e da taxa de filtração. 1999, Rio de Janeiro. **Anais do 20^o Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 1634 - 1643.
- BRASIL (2004). **Portaria nº 518 de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde**. Estabelece procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e das outras providências. 2004.
- BRITO, L. L. A.; et al. Amadurecimento de filtros lentos de areia e remoção de microrganismos indicadores de qualidade da água ao longo da profundidade do leito: uma avaliação em instalação piloto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, p. 307-317. dez. 2005.
- CAMPOS, L. C. **Modelling and simulation of the biological and physical processes of slow sand filtration**, 2002. 120 f. Tese

- (Doutorado) - Imperial College of Science, Technology and Medicine, Londres, 2002.
- CANTABRANA, C. M. – **Filtro lento modificado de bajo costo y limpieza por trillado.** Asociación Peruana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental; AIDIS. Gestión ambiental en el siglo XXI. Lima, APIS, 1998, p.1-9.
- CASAN, 2008. Companhia Catarinense de águas e saneamento - **Mananciais superficiais utilizados pela CASAN na grande Florianópolis.** Disponível em <www.casan.com.br>. Acessado em 27/01/2009.
- CEBALLOS, B. S. O.; DANIEL, L. A.; BASTOS, R. K. X. **Água:** Remoção de microorganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano. Belo Horizonte: Abes, 2009. 392 p.
- CEZAR, M. C. M.; CARVALHO, R. P. M.; BRANDÃO, C. C. S. Aplicabilidade da filtração ascendente em pedregulho, precedida ou não de coagulação química, como pré tratamento para filtração rápida descendente e filtração lenta de águas com presença de algas. 2002, Cancun. **Anais do 28º Congresso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental.** Cancun: AIDIS, 2002. p. 1 - 9. CD-ROM.
- CISAM / AMVAP (Brasil) Conselho Intermunicipal de Saneamentos Ambiental / Associação dos Municípios da Microrregião do Vale do Paranaíba. **Manual de saneamento rural.** Uberlândia, 2006. 94 p.
- CLEASBY, J. L.; HILMOE, D. J.; DIMITRACOPOULOS, C. J. Slow sand and direct in-line filtration of a surface water. **Journal Of The American Water Works Association**, Nova Iorque, p. 44-55. 1 dez. 1984.
- CLEARY, S. A. **Sustainable drinking water treatment for small communities using multistage slow sand filtration.** 2005. 288 f. Dissertação (Mestrado) - University Of Waterloo, Ontario, 2005.
- COLLINS, M. R.; EIGHMY, T. T.; MALLEY, J. P. Evaluating modifications to slow sand filter. **Journal Of The American Water Works Association**, Nova Iorque, p. 62-70. 1 set. 1991.

- CORAL, L. A. **Remoção de cianobactérias e cianotoxinas em águas de abastecimento pela associação de flotação por ar dissolvido e nanofiltração.** 198 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Florianópolis – SC – Março, 2009.
- COSTA, R. H. R. **Estudos comparativos da eficiência de filtros lentos de areia convencionais e de fluxo ascendente.** 1980. 1 v. Dissertação (Mestre) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1980.
- DALSASSO, R. L. **Estudo de diferentes materiais para floculação em meio granular, precedendo a filtração rápida descendente no tratamento de água para abastecimento.** 2005. 272 f. Tese (Doutor) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- DAVISON, R; BANER, M. J. **Slow sand filters:** Registro em 27/03/1990. United States Patent. Disponível em: <<http://www.freepatentsonline.com/4911831.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2009.
- DI BERNARDO, L. **Algas e suas influências na qualidade das águas e nas tecnologias de tratamento.** Rio de Janeiro: ABES, 1995. 140 p.
- DI BERNARDO, L; BRANDÃO, C. C. S.; HELLER, L. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (Brasil). Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 114p.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** 2. ed. São Carlos: Rima, 2005. 1565 p. 2 v.
- DI BERNARDO, L. ; SABOGAL-PAZ, L. P. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água.** São Carlos: Cubo, 2008. 2 v.
- ELLIOT, M. A.; et al Reductions of E. coli, echovirus type 12 and bacteriophages in an intermittently operated household-scale slow sand filter. **Water Research**, New York, p. 1-9. jan. 2008.
- EMMENDOERFER, M. L. **Filtração Lenta com retrolavagem para propriedades rurais de uso familiar.** TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia

Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

- GALVIS, G. **Development and Evaluation of Multistage Filtration Plants: An Innovative, Robust and Efficient Water Treatment Technology.** 1999. 273 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Centre For Environmental Health Engineering, School Of Engineering In The Environment University Of Surrey, Surrey, 1999.
- HUISMAN, L. **Slow sand filtration.** Belgica: World Health Organization, 1974. 120 p.
- LETTERMAN, R. D.; CULLEN, T. R. The effect of slow sand filter maintenance on water quality. **Journal Of The American Water Works Association**, Nova York, p. 48-55. dez. 1985.
- LOGSDON G. S. et al. – **Slow sand filtration for small water systems** Journal of Environmental Engineering and Science, Volume 1, Number 5, September 2002 , pp. 339-348(10). NRC Research Press, Canada, 2002.
- MALDONADO, V.; VARGAS, L. C.; BARRENECHEA, A. - **Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida- Manual I - Teoría tomo II.** Capítulo 9: Filtración. pp. 83-152. CEPIS. Lima, 2004.
- MONDARDO, R. I. **Influência da pré-oxidação na tratabilidade das águas via filtração direta descendente em manancial com elevadas concentrações de microalgas e cianobactérias.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, SC, 2004.
- MANZ, D. H. New Horizons for Slow Sand Filtration. In: **Proceedings of Eleventh Canadian National Conference And Second Policy Forum On Drinking Water And The Biennial Conference Of The Federal-Provincial-Territorial Committee On Drinking Water**, 11., 2004 Canada: Public Health Through Safe Drinking Water, 2004. p. 682 - 692.
- 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

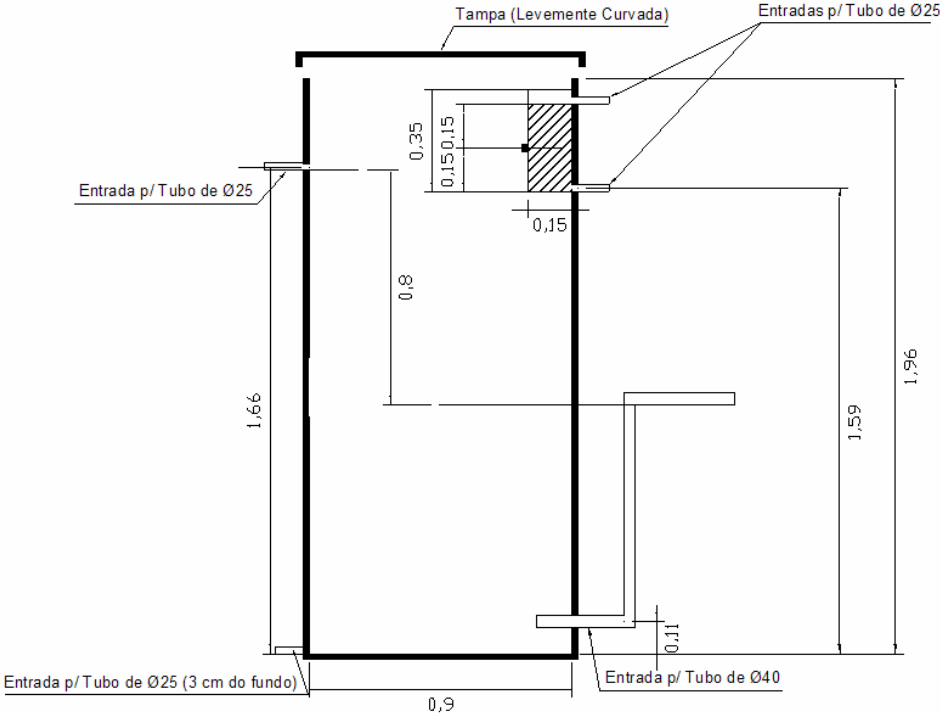
- Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- MARNOTO, M. J. E.; et al. A influência da expansão da areia durante a retrolavagem na qualidade de água para abastecimento produzida por filtros lentos. In: Congresso Interamericano AIDIS, 2008, Santiago. **Anais do XXXI Congresso Interamericano AIDIS**. Santiago: Aidis, 2008. p. 1 - 7.
- MARRÓN, C. **Plantas de tratamiento por filtración lenta: Diseño, operación y mantenimiento**. 43. ed. Lima: Ali Arte Gráfico Publicaciones, 1999.
- MEDINA, L. R. Uso de filtros lentos para el tratamiento de agua a nivel domiciliario. **Ingeniería Hidráulica y Ambiental**, Nova York, p. 44-49. out. 2000.
- MICHIELIN, A. K. **Filtro Lento com Retrolavagem**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- MURTHA, N.A; HELLER L. **Avaliação da eficiência da filtração lenta em areia segundo a profundidade do leito filtrante**. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. II – 043, pp. 1280 – 1289. ABES, 1999.
- MURTHA, N.A; HELLER L. **Avaliação da Influência de Parâmetros de Projeto e das Características da Água Bruta no Comportamento de Filtros Lentos de Areia**. Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil, Vol. 8 – Nº 4. pp. 257 – 267, Out/Dez 2003.
- MURTHA, N.A.; HELLER L.; LIBÂNIO, M. **A Filtração Lenta em areia como alternativa tecnológica para o tratamento de águas de abastecimento no Brasil**. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. II – 085, pp. 1542 – 1556. ABES, 1997.
- PÁDUA, V. L.; et al. **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Abes, 2006.

- PIVELI, R. P., KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. SÃO Paulo: ABES, 2005. 285p.
- PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4ª São Carlos: Eesc-usp, 2006. 540 p.
- RICHTER, C. A; AZEVEDO NETTO, J.M. **Tratamento de Água – Tecnologia Atualizada**; 5ª re-impressão, Edgard Blucher, São Paulo, 2003.
- RIWRB – Rhode Island Water Resources Board. **A brief history of drinking water**. Disponível em <http://www.wrb.ri.gov/program_eohistory.html>. Acessado em 02/02/2009.
- ROCHA, N.A.; et. al. **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. II – 049, pp. 568 – 573. ABES, 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. 190 f. Tese (Doutor) - Universidade De Brasília, Brasília, 2006.
- SÁNCHEZ, L. D.; et al. **Multi-Stage Filtration: Thematic Overview Paper 15**. Cali: Irc International Water And Sanitation Centre, 2006. 64 p.
- SENS, M. L. **Curso sobre filtração de água para um grupo de extensionistas rurais – UFSC – Florianópolis, SC 1992**.
- SIMONASSI, J. C. **Caracterização da Lagoa do Peri, através da análise de parâmetros físico-químicos e biológicos, como subsídio ao gerenciamento dos recursos hídricos da ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**. 2001. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- USEPA – United States Environmental Protection Agency. **The history of drinking water treatment** - EPA 816-F-00-006, Office of Water Washington, D.C., 2000.

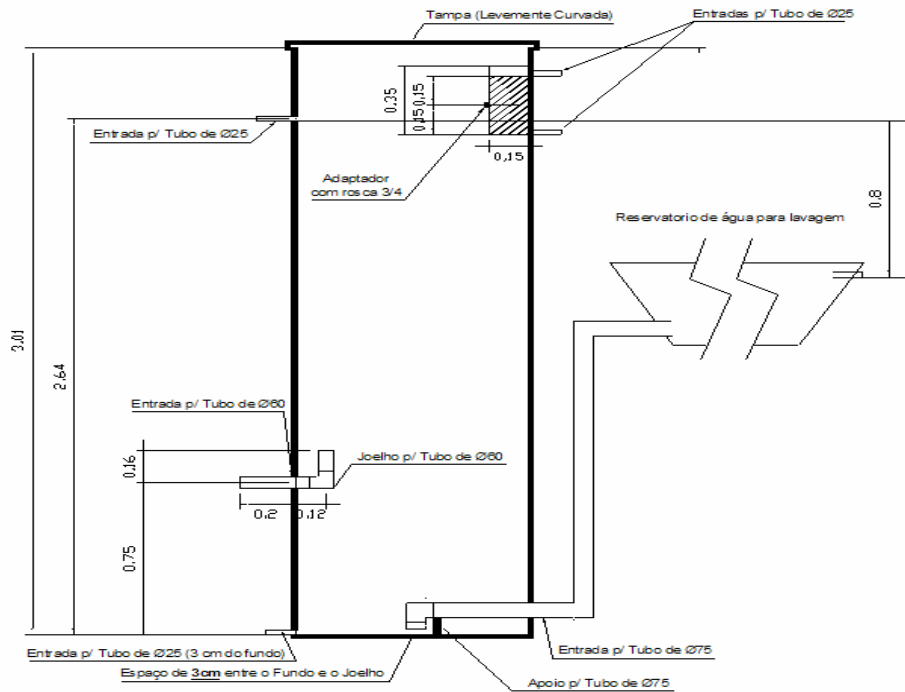
- VARGAS, L. C. **Manual I:** Teoria y evaluacion. [s.i.]: Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria Y Ciencias Del Ambiente, 1992. 66 p. (Filtracion lenta).
- VARGAS, L. C. **Filtración lenta como proceso de desinfección.** Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Simposio regional sobre calidad del agua: desinfección efectiva. Lima, CEPIS / OPS, 2004, p.1-17.
- WEBER-SHIRK, M. L.; DICK, R. I. Physical-chemical mechanisms in slow sand filters. **Journal Of The American Water Works Association**, Nova York, p. 87-100. jan. 1997a.
- WEBER-SHIRK, M. L.; DICK, R. I. Biological mechanisms in slow sand filters. **Journal Of The American Water Works Association**, Nova York, p. 72-83. fev. 1997b.
- WHO – **World Health Organization.** Slow sand filtration. **Genebra, Suíça**, 1974.

Apêndices

Apêndice 1 – Filtro FLC



Apêndice 2 – Filtro FLR



Apêndice 3 – Filtro FLRb

