

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPOS DE
FILTRO LENTO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA EM
DOMICÍLIOS RURAIS**

PROJETO FINAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL 2

CAMILA REBELLO AMUI

RAÍSSA MARIA COMETA MOTA MORUZZI

ORIENTADORA: PROF. CRISTINA CELIA BRANDÃO

BRASÍLIA/DF, 08 de DEZEMBRO de 2016.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPOS DE
FILTRO LENTO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA EM
DOMICÍLIOS RURAIS**

**CAMILA REBELLO AMUI
RAÍSSA MARIA COMETA MOTA MORUZZI**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

**CRISTINA CELIA SILVEIRA BRANDÃO
(ORIENTADORA)**

**YOVANKA PÉREZ GINORIS
(EXAMINADORA INTERNA)**

**RICARDO SILVEIRA BERNARDES
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 08 de DEZEMBRO de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

AMUI, CAMILA REBELLO; MORUZZI, RAÍSSA MARIA COMETA MOTA.

Desenvolvimento e Avaliação de Protótipos de Filtro Lento para Tratamento de Água em Domicílios Rurais [Distrito Federal] 2016.

xiii, 97 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2016)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Filtração Lenta

2. Tratamento de Água Domiciliar

3. Saneamento Rural

I. ENC/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMUI, C. R., MORUZZI, R. M. C. M. (2016). Desenvolvimento e Avaliação de Protótipos de Filtro Lento para Tratamento de Água em Domicílios Rurais. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DAS AUTORAS: Camila Rebello Amui e Raíssa Maria Cometa Mota Moruzzi.

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Desenvolvimento e Avaliação de Protótipos de Filtro Lento para Tratamento de Água em Domicílios Rurais.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Camila Rebello Amui

SQSW 104, Bloco E, apto 305

70670-405 – Brasília/ DF – Brasil.

FICHA CATALOGRÁFICA

AMUI, CAMILA REBELLO; MORUZZI, RAÍSSA MARIA COMETA MOTA.

Desenvolvimento e Avaliação de Protótipos de Filtro Lento para Tratamento de Água em Domicílios Rurais [Distrito Federal] 2016.

xiii, 97 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2016)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Filtração Lenta

2. Tratamento de Água Domiciliar

3. Saneamento Rural

I. ENC/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMUI, C. R., MORUZZI, R. M. C. M. (2016). Desenvolvimento e Avaliação de Protótipos de Filtro Lento para Tratamento de Água em Domicílios Rurais. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DAS AUTORAS: Camila Rebello Amui e Raíssa Maria Cometa Mota Moruzzi.

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Desenvolvimento e Avaliação de Protótipos de Filtro Lento para Tratamento de Água em Domicílios Rurais.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Raissa Maria Cometa Mota Moruzzi

SQN 402, Bloco p, apto 208

70834-160 – Brasília/ DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS DA CAMILA

Agradeço à Deus e ao universo por todas as oportunidades que a vida me deu para chegar até aqui e por todas as pessoas que passaram pela minha vida. Por todas as idas e vindas, os altos e baixos e o dar e receber.

À minha mãe, meu pai e meu irmão, pelo amor incondicional, pelo apoio, por me acompanhar nessa trajetória e principalmente pelos ensinamentos de amor ao próximo. Sem vocês, nada eu seria. Minha eterna gratidão! E à minha família: meus tios, primos e avó. Obrigada por ser meu porto seguro.

À Raissa, pelo companheirismo nessa caminhada. Por todas as noites mal dormidas, os dias de laboratório, as risadas nervosas, os canos cortados e os problemas enfrentados. Obrigada por ser a melhor dupla que eu poderia ter.

À Cristina, pela orientação impecável. Pela confiança, dedicação e por sempre nos acompanhar, nos ajudar e nos guiar. Pelos ensinamentos que vão muito além do acadêmico. Muito obrigada!

Aos técnicos do Laboratório de Saneamento Ambiental, em especial ao Boy, à Marcilene e a Carla, pelo apoio para que esse projeto fosse possível. Aos professores, servidores e técnicos da Engenharia Ambiental, que me guiaram e auxiliaram por essa jornada pela universidade.

Aos amigos de UnB: Isa, Ceci, Bia, Goi, Nini, Vivi, Mari, Borato, Cadu, Shrek, Dutra, Cami Oliveira, Bah, Gino, Amanddinha, Carol, Taís, Mari, Soninha, Bruninha, Flora, Maria, Lis, Luli, Mila Ribeiro, Thais, Keka, Sábio, Taynah, Geovana, Matheus (Formiga, Ramos e Maciel), Tomás, Alana, Aninha, Babi, Joãozinho, Amanda, Japa, João Ponciano, Samuca, Thainy, Marina, Franck e Lukeka, por terem feito os meus anos de universidade os melhores possíveis!

À Dani, Brunna e Milena: pela amizade, pelos puxões de orelha, pelos sorrisos e segredos compartilhados, e por tornar minha vida muito mais feliz. Obrigada por ter surgido na minha vida tão de repente e ter ficado! Gratidão!

Ao Guto, Foguinho, Juliano e De Hong, pelas melhores ideias não executadas, pelas melhores histórias e por estarem sempre presentes no meu coração, mesmo quando ausentes fisicamente. Amo vocês.

Aos amigos de intercâmbio: Isadora, Amanda, Carolina, Joana, Fernanda, Victor, Augusto, Pedro Ivo e Lari, por ter feito parte da melhor experiência e pela amizade que continua mesmo com a distância.

Aos amigos do Litro de Luz, obrigada por abrir as portas dessa ONG que acolheu meu coração, e por

me permitir crescer sempre, me apaixonando cada vez mais por trabalhos sociais e pelas mudanças que somos capazes de fazer.

Aos amigos do Semeador e à todas as crianças que lá frequentam, obrigada pela ajuda na reforma íntima, maior presente que poderia receber.

À Universidade de Brasília, por ter proporcionado inúmeras experiências que me alegraram profundamente e me fizeram crescer.

À todos que, de alguma forma, participaram dessa trajetória. Obrigada!

RESUMO

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPOS DE FILTRAÇÃO LENTA PARA DOMICÍLIOS RURAIS

A garantia do acesso equitativo à água potável é um dos principais desafios da atualidade. Para ampliar o atendimento, as alternativas de tratamento precisam se adequar às diferentes realidades encontradas, como a do meio rural, onde os domicílios são distantes e não são atendidos pela rede de abastecimento. Dentre as opções de tratamento que se adequam ao meio rural, a filtração lenta é uma alternativa por apresentar baixa necessidade de manutenção, fácil operação e eficiência na remoção de patógenos. Este trabalho visou propor dois protótipos de filtros lentos para tratamento de água domiciliar em áreas rurais. Para concepção dos protótipos, realizaram-se análises experimentais a fim de avaliar o comportamento de duas colunas de filtração lenta operadas com duas taxas de filtração (2,4 m/d ou 4,8 m/d) na Etapa I e duas espessuras da camada filtrante (40 cm ou 35 cm) na Etapa II. Na Etapa I, os filtros apresentaram valores de remoção semelhantes, sendo a porcentagem de remoção máxima atingida igual a 96% para coliformes totais, 90% para *E. coli*, e 47% para turbidez. As remoções obtidas foram abaixo do encontrado na literatura, visto que o tempo de operação dos filtros foi reduzido. O FLA 1 se sobressaiu nos resultados, portanto foi escolhida a taxa de 0,1 m/h para prosseguir na Etapa II. Na Etapa II, alcançou-se 97% de remoção para turbidez e 99,9% para coliformes totais para ambos os filtros. Foi feita contagem de partículas na água a fim de avaliar a remoção de partículas de tamanho semelhante a (oo)cistos de protozoários (*Cryptosporidium* e *Giardia*), a qual mostrou resultados crescentes de remoção ao longo do tempo. A elevada obstrução do meio filtrante diminuiu as taxas de filtração dos filtros, o que influenciou os resultados. A espessura de 40 cm mostrou-se a opção mais segura a ser adotada nos protótipos. A partir da análise experimental e do estudo de modelos existentes, foram obtidos os protótipos Raicam, com capacidade de tratamento de 500 l/d, e Momui, que possui capacidade de 60 l/d. Após a montagem e os testes dos protótipos, concluiu-se que podem ser implementados mediante políticas públicas para o tratamento de água, se combinados com a desinfecção da água filtrada. Entretanto, o filtro Momui apresentou problemas no seu sistema de alimentação e precisa ser aprimorado.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVO	3
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 - ACESSO À ÁGUA E SAÚDE	4
3.1.1 - Enfermidades de Veiculação Hídrica.....	4
3.1.2 - Acesso à água tratada no Brasil.....	7
3.1.3 Soluções individuais alternativas simplificadas de tratamento de água	9
3.2 - FILTRAÇÃO LENTA	13
3.2.1 Mecanismos de remoção	14
3.2.1.1 - Mecanismos biológicos.....	14
3.2.1.2 - Mecanismos físicos.....	14
3.2.2 - Eficiência na remoção de patógenos.....	17
3.2.2.1 - Taxa de filtração.....	21
3.2.2.2 - Operação em escoamento intermitente ou contínuo.....	23
3.2.2.3 - Maturidade biológica da camada filtrante.....	24
3.2.2.4 - Profundidade da camada filtrante.....	25
3.2.3 - Limitações da filtração lenta.....	26
3.2.4 - Arranjo físico e operação de filtros domiciliares baseados na filtração lenta.....	28
4 – METODOLOGIA	33
4.1 – ESTUDO EM ESCALA PILOTO.....	33
4.1.1 – Parâmetros monitorados	34
4.1.2 - Estrutura e funcionamento do filtro lento em escala piloto	34
4.1.3 - Etapas experimentais do estudo em escala piloto	40
4.2 – DESENVOLVIMENTO DOS PROTÓTIPOS	42
4.2.1 - Concepção dos protótipos.....	42
4.2.2 - Filtro Raicam – Filtro domiciliar para abastecimento completo	43
4.2.3 - Filtro Momui – Filtro domiciliar para abastecimento básico.....	44
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1 - ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	45
5.1.1 - Etapa I: Ensaio para avaliação da taxa de filtração	45
5.1.2 - Etapa II: Ensaio para avaliação da espessura da camada filtrante.....	50

5.1.3 - Análise da camada biológica	58
5.2 - PROTÓTIPOS	59
5.2.1 - Filtro Raicam	59
5.2.1.1 - Estrutura do filtro.....	60
5.2.1.2 - Operação do filtro.....	65
5.2.1.3 - Custos, acessibilidade e arranjos alternativos.....	66
5.2.1.4 - Montagem e teste do protótipo.....	68
5.2.2 - Filtro Momui	71
5.2.2.1 - Estrutura de filtro.....	71
5.2.2.2 - Operação do filtro.....	75
5.2.2.3 - Custos, acessibilidade e arranjos alternativos.....	76
5.2.2.4 - Montagem e teste do protótipo.....	79
6 - CONCLUSÃO	83
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
APÊNDICE A - CUSTOS DO MATERIAL DO FILTRO RAICAM	94
APÊNDICE B - CUSTOS DO MATERIAL DO FILTRO MOMUI	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação ambiental de enfermidades relacionadas com água e excretas. ..	6
Tabela 3.2 - Soluções individuais alternativas propostas por diferentes instituições	10
Tabela 3.3 - Estudos sobre remoções de organismos indicadores de patógenos e patógenos com filtros que atingiram a maturidade da camada filtrante.....	19
Tabela 3.4 - Efeito da taxa de filtração na remoção de microorganismos.....	22
Tabela 3.5 - Resultados obtidos por Young-Rojanschi <i>et al.</i> (2014) na comparação da eficiência de remoção com escoamento contínuo e intermitente.....	23
Tabela 3.6 - Tempo de maturação reportados para filtros lentos de areia	24
Tabela 3.7 - Profundidade onde os microorganismos são encontrados na camada filtrante.	26
Tabela 3.8 - Qualidade da água recomendável para aplicação da filtração lenta	27
Tabela 4.1 - Valores máximos permitidos para parâmetros de qualidade da água filtrada mediante filtros lentos referentes à pós-filtração, antes da desinfecção	34
Tabela 4.2 - Taxas de filtração, espessuras da camada filtrante e tempos de detenção na camada filtrante de cada etapa do estudo em escala piloto	38
Tabela 4.3 - Métodos de determinação dos parâmetros de qualidade da água.....	39
Tabela 5.1 - Contagem de partículas menores que 6 µm em comparação com o total de partículas e eficiência de remoção (14º dia de operação para o FLA1, 1º dia de operação para o FLA 2).....	47
Tabela 5.2 - Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão dos dados de coliformes totais e E. coli. no afluente e nos efluentes dos filtros na Etapa 1 (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 3 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,2 m/h ou 4,8 m/d).	48
Tabela 5.3 - Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão dos dados de coliformes totais e E. coli. no afluente e nos efluentes dos filtros na Etapa II (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 3 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d)..	53
Tabela A.1 - Preços e quantidades dos componentes do filtro Raicam.....	94
Tabela B.1 - Preços e quantidades dos componentes do filtro Momui	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Índice de atendimento urbano por rede de água.	7
Figura 3.2 - Percentual de cobertura do abastecimento de água tratada no Brasil.	8
Figura 3.3 - Elementos básicos de um filtro lento de areia.....	13
Figura 3.4 - Estrutura do filtro da CAWST	29
Figura 3.5 - Estrutura utilizada pela organização peruana DESEA	30
Figura 3.6 - Filtro lento de areia de escoamento contínuo, sugerido por Heber.....	31
Figura 3.7 - Filtro lento doméstico com areia, vela e geotêxtil.....	32
Figura 4.1 - Esquema das etapas metodológicas do estudo em escala piloto.....	33
Figura 4.2 – Croqui da instalação piloto.....	35
Figura 4.3 – Instalação piloto.	35
Figura 4.4 - Esquema das colunas de filtração lenta com detalhe de tomadas de pressão ..	36
Figura 4.5 – Curva granulométrica da areia utilizada nos filtros lentos em escala piloto....	37
Figura 4.6 - Ponto de Captação na ETA Paranoá – Caixa de chegada de água bruta.....	39
Figura 4.7 - Esquema das fases do desenvolvimento dos protótipos	43
Figura 5.1 - Evolução da turbidez da água bruta e da água efluente dos filtros lentos de areia (FLA) na etapa I (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 3 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,2 m/h ou 4,8 m/d).....	45
Figura 5.2 - Remoção da turbidez da água bruta e da água efluente dos filtros lentos de areia (FLA) na etapa I. (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 3 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,2 m/h ou 4,8 m/d).....	46
Figura 5.3 - Remoção de Coliformes Totais na etapa I (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 3 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,2 m/h ou 4,8 m/d).	48
Figura 5.4 - Remoção de E. coli na etapa I (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 3 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,2 m/h ou 4,8 m/d).....	49
Figura 5.5 - Taxa de filtração ao longo da etapa II (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).	51

Figura 5.6 - Evolução da turbidez da água bruta e da água efluente dos filtros lentos de areia (FLA) na etapa I (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).....	52
Figura 5.7 - Remoção de Coliformes Totais na etapa II (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).....	54
Figura 5.8 - Remoção de E. coli na Etapa II (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).....	54
Figura 5.9 - Remoção de partículas de tamanho entre 4 a 6 µm, tamanho referente a oocistos de <i>Cryptosporidium</i> (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).....	56
Figura 5.10 - Remoção de partículas de tamanho entre 8 a 15 µm, tamanho referente a cistos de <i>Giardia</i> (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).....	56
Figura 5.11 - Remoção de partículas menores que 150 µm (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).....	57
Figura 5.12 - Imagens da <i>schmutzdecke</i> : (a) Grão de areia e denso biofilme de matéria amorfa encontrado na amostra da <i>schmutzdecke</i> do FLA 1. Aumento de 200 vezes. (b) Carapassa de Diatomácea (Bacillariophyta) encontrada na amostra da <i>schmutzdecke</i> do FLA 1. Aumento de 400 vezes. (c) Carapassa de um Zooplanton encontrado na amostra da <i>schmutzdecke</i> do FLA 1. Aumento de 200 vezes. (d) <i>Cosmarium</i> sp visto em amostra da <i>schmutzdecke</i> do FLA1. Aumento de 200 vezes.....	59
Figura 5.13 - Arranjo do sistema de filtração com unidade filtrante inserida dentro do reservatório de água filtrada.....	60
Figura 5.14 - Arranjo do sistema de filtração: corte vertical destacando unidade de filtração.....	61
Figura 5.15 - Corte vertical do módulo filtrante dentro de Caixa d'Água com as dimensões.....	62
Figura 5.16 - Curva granulométrica da areia utilizada na montagem dos protótipos.....	63

Figura 5.17 - Estrutura suporte do reservatório de água bruta, da caixa de nível constante, do filtro e do reservatório de água filtrada, ao lado de uma casa.....	64
Figura 5.18 - Reservatórios encontrados no mercado. (a) Bombona encontrada em site de vendas. Fonte: Mercado Livre. (b) Reservatório vendido pelo Grupo Damek. Fonte: Grupo Damek.....	66
Figura 5.19 - Alternativa de instalação para casas com desnível de terreno.....	67
Figura 5.20 - Sistema de drenagem do filtro Raicam.(a) Vista de lateral da drenagem. (b) Fundo do sistema de drenagem, com tubos furados.....	68
Figura 5.21 - Teste hidráulico do filtro Raicam para avaliar a existência de vazamentos.....	69
Figura 5.22 - Filtro Raicam montado no Laboratório de Saneamento Ambiental.....	70
Figura 5.23 - Estrutura do Filtro Momui. (a) Vista lateral. (b) Corte vertical.Figura.....	72
Figura 5.24 - Representação do filtro sobre um suporte em uma casa.....	74
Figura 5.25 - Sistema de alimentação do filtro Momui.....	75
Figura 5.26 - Filtro com reservatório de água filtrada e de água bruta separado	77
Figura 5.27 -. Sistema de drenagem: (a) Vista superior do sistema de drenagem encaixado; (b) Detalhes de parte inferior; (c) Tubos perfurados;	79
Figura 5.28 - Extravasador encaixado nos orifícios dos tubos com as flanges e borrachas de vedação	80
Figura 5.29 - Fundo do reservatório de água bruta, com adaptador soldável com flanges livres.....	81
Figura 5.30 - Filtro Momui montado e funcionando.....	82

1 - INTRODUÇÃO

A garantia da disponibilidade e manejo sustentável da água é um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pelo Programa das Nações Unidas para 2030. Entre as metas sugeridas está: "alcançar o acesso universal e equitativo à água potável e segura para todos". O reconhecimento da necessidade da universalização do abastecimento de água para consumo humano com qualidade é o primeiro passo de uma longa trajetória até a erradicação do problema.

Para alcançar a meta proposta pela Organização das Nações Unidas (ONU), é preciso buscar tecnologias que se adaptem a diferentes realidades e alcancem a eficiência necessária para evitar doenças de veiculação hídrica. Entre as diferentes tecnologias de tratamento desenvolvidas até hoje, uma das mais recomendadas para pequenas comunidades e tratamento domiciliar é a filtração lenta.

O primeiro filtro de areia usado para tratamento de água que se tem registro é de 1804, quando John Gibb utilizou a técnica para tratar e comercializar água (OMS, 1974). A prática foi aprimorada e, em 1829, James Simpson construiu a primeira instalação com filtração lenta para abastecimento público em Londres (OMS, 1974). O tratamento mostrou-se vantajoso e eficiente, sendo aplicado em diversos países nos anos seguintes.

No Brasil, a filtração lenta era utilizada até a década de 60, mas passou a ser desprezada a partir da década seguinte devido à pressão pela substituição por novas tecnologias e pela deterioração da qualidade da água nos corpos hídricos nacionais. Com o crescimento populacional e a necessidade de atender uma população maior, a filtração rápida foi amplamente adotada em centros urbanos, em detrimento da filtração lenta. Todavia, as exigências operacionais da filtração rápida fazem com que ela não se adeque a diversas situações, como em zonas rurais e pequenas comunidades.

Por ser um país de escala continental, o Brasil apresenta muitas comunidades pequenas e residências isoladas que são distantes de centros urbanos e que, geralmente, possuem poucos recursos financeiros. No caso dos domicílios rurais isolados é impraticável a ligação a uma rede de abastecimento. É preciso fornecer uma solução para esses domicílios, que acabam sem tratar sua água por falta de acesso a opções viáveis. Afirma-se, então, a importância da

retomada e aprofundamento dos estudos da filtração lenta, como uma opção de tratamento de água bem consolidada mundialmente como alternativa para o saneamento rural.

A sincronia entre a qualidade fornecida por esse tipo de tratamento e as necessidades de zonas rurais brasileiras levanta questionamentos em relação a pouca aplicação dessa técnica. Trata-se de uma tecnologia de custo compatível com a realidade rural, que se adapta a alterações na qualidade da água e não necessita de operação e manutenção muito especializada. Devido à essas qualidades, a filtração lenta tem potencial para ser amplamente utilizada como tratamento de água a nível domiciliar no Brasil.

A partir da proposição de protótipos de filtros lentos eficientes para uso domiciliar, espera-se contribuir para o acesso a água potável e segura, mesmo em comunidades ou residências isoladas. Esse trabalho é sustentado pela hipótese de que os protótipos de filtração lenta podem representar uma boa solução para o saneamento rural brasileiro. Acredita-se nessa hipótese devido: à simplicidade dos protótipos propostos, à eficiência da filtração lenta já comprovada por diversos estudos e aplicações, a não necessidade de produtos químicos no processo, à simples manutenção dos filtros, e à eficácia da aplicação de modelos semelhantes. Dessa forma, a filtração lenta pode ser uma forte aliada na busca da universalização do tratamento de água no meio rural.

2 - OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo geral propor dois protótipos de filtro lento domiciliares com meio filtrante de espessura reduzida voltados para o tratamento de água em domicílios rurais.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a eficiência da filtração lenta sob diferentes condições operacionais – taxa de filtração e espessura da camada filtrante – visando definir os parâmetros de projeto dos filtros domiciliares;
- Conceber, dimensionar, projetar, construir e testar o funcionamento hidráulico de dois protótipos de filtro lento de acordo com a taxa de filtração e espessura da camada filtrante obtidas na análise experimental e condições hidráulicas de funcionamento adequadas, visando um produto de custos reduzidos. Os dois protótipos diferenciam-se pela capacidade de produção de água filtrada, sendo um de menor dimensão voltado para tratamento de água para beber e preparar de alimentos, e outro para todos os usos da casa.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - ACESSO À ÁGUA E SAÚDE

Muitos dos grandes problemas sanitários que afligem a sociedade são relacionados a questões ambientais. Existe uma relação intrínseca entre o acesso ao saneamento básico e a saúde humana. A ausência de acesso à água potável, esgotamento sanitário adequado, drenagem urbana e disposição correta de resíduos afetam de forma nefasta a população e seu desenvolvimento (OPAS, 2011).

Atualmente milhões de pessoas seguem sendo afetadas pela falta de saneamento no mundo (OMS, 2013). Segundo a Organização Mundial de Saúde (2013), a melhoria do acesso à água, saneamento e higiene poderia evitar 9,1% das doenças e 6,3% das mortes no mundo. Estima-se que a diarreia seja responsável por 4 bilhões de casos de infecção e 1,9 milhões de mortes por ano de crianças menores que 5 anos, equivalente a 19% de todas as mortes que ocorrem em países em desenvolvimento (Boschi-Pinto *et al.*, 2008 *apud* OMS, 2013).

Dentre os problemas causados pela falta de saneamento, o acesso a água contaminada e a escassez desse recurso são desafios a nível local e global, impactando o desenvolvimento e a saúde de uma parte ainda significativa da população mundial. A OMS (2011) afirma que investimentos na universalização do acesso à água potável poderiam trazer benefícios econômicos devido à redução dos gastos com saúde da população, além de ser uma forma de redução das desigualdades sociais. A ampliação do acesso a esse recurso poderia diminuir a ocorrência de enfermidades de veiculação hídrica.

3.1.1 – Enfermidades de veiculação hídrica

As enfermidades relacionadas à água derivam basicamente da escassez e qualidade deste bem. A causa principal das doenças de veiculação hídrica é a presença de organismos patogênicos entéricos, de origem animal ou humana (Grabow, 1996). Em 2004, as doenças infecciosas parasitárias ainda eram responsáveis por 4,5% dos óbitos ocorrido no país (SVS, 2007, *apud* Taira, 2008), representando um risco, principalmente, para crianças menores de 5 anos e indivíduos imunocomprometidos. Nas últimas décadas tem-se observado uma redução considerável dos óbitos e das taxas de internação por diarreia e gastroenterite devido a melhoria do acesso aos serviços de saneamento (Mendonça *et al.*, 2005, Brasil, 2014b).

A primeira classificação ambiental das doenças relacionadas a água, feita pelo epidemiologista David Bradley em 1972 (White *et al.* 1972, apud, Mara *et al.*, 1999) ressalta as rotas de transmissão em detrimento da categoria biológica do patógeno. Dentro desse contexto, introduziu-se a classe de doenças derivadas da falta de água e consequente precariedade de higiene doméstica e pessoal (Mara *et al.*, 1999) – problema de grande relevância epidemiológica em países em desenvolvimento. Esta classificação foi modificada por Feachman (1975) que uniu as categorias de ingestão de água contaminada e insuficiência de água em uma única categoria de rota feco-oral. Essa junção deve-se ao fato de determinadas doenças contraídas por via oral serem derivadas da falta de higiene e não de acesso a água tratada potável. A Tabela 3.1 apresenta as categorias de doenças relacionadas à água.

O risco de surtos de doenças de veiculação hídrica é elevado em áreas rurais (Stukel *et al.*,1990) devido a contaminação da água por fezes, derivada da presença de animais e despejo inadequado de efluentes domésticos, enquadrando-se em sua maioria na categoria A (Tabela 3.1). A ocorrência de contaminação fecal é usualmente detectada através do uso da presença de Coliformes Totais e *E.coli* como indicadores. Estes microrganismos derivam, preponderantemente, de trato intestinal de animais de sangue quente e indicam a provável presença de outros patógenos de origem entérica. Para evitar a ingestão e o contato dérmico com patógenos de veiculação hídrica faz-se necessário a proteção dos mananciais e o tratamento da água.

Tabela 3.1- Classificação ambiental de enfermidades relacionadas com água e excretas. (Mara *et al.*, 1999, *apud* Soares *et al.*, 2002).

Categoria	Estratégias de controle	Exemplos (organismo ou doença)
A – Doenças do tipo feco-oral (transmissão hídrica ou relacionadas com a higiene)	<ul style="list-style-type: none"> • Melhora da quantidade, disponibilidade e confiabilidade do abastecimento de água), no caso das doenças relacionadas com a higiene; • Melhora da qualidade da água (tratamento de água), para as doenças de transmissão hídrica; • Educação sanitária. 	Diarreia por <i>Escherichia coli</i> enteropatogénica e rotavírus, criptosporidíase, febre tifóide, giardíase e ascaridíase, hepatite A, E e F, poliomielite, cólera, disenteria bacilar, amebíase
B – Doenças do tipo não feco-oral (relacionada com a higiene)	<ul style="list-style-type: none"> • Melhora da quantidade, disponibilidade e confiabilidade da água (abastecimento de água); • Educação sanitária. 	Doenças infecciosas da pele e dos olhos e febre transmitida por pulgas.
C – Helmintíases do solo	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamento dos excretas ou esgotos antes da aplicação no solo; • Educação sanitária. 	Ascaridíase e ancilostomose.
D – Teníases	<ul style="list-style-type: none"> • Como na categoria C, mais cozimento e inspeção da carne. 	Teníases
E – Doenças baseadas na água	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuição do contato com águas contaminadas; • Melhora de instalações hidráulicas; • Sistemas de coleta de esgotos e tratamento dos esgotos antes do lançamento ou reuso; • Educação sanitária. 	Leptospirose e esquistossomose.
F – Doenças transmitidas por inseto vetor	<ul style="list-style-type: none"> • Identificação e eliminação dos locais adequados para procriação; • Controle biológico e utilização de mosquiteiros; • Melhora da drenagem de águas pluviais. 	Malária, dengue, febre amarela, filariose e infecções transmitidas por baratas e moscas relacionadas com excretas. *
G – Doenças relacionadas com vetores roedores	<ul style="list-style-type: none"> • Controle de roedores • Educação sanitária; • Diminuição do contato com águas contaminadas. 	Leptospirose e doenças transmitidas por vetores roedores. *

* Infecções derivadas de contato com excretas compreendem todas as doenças das Categorias A, C e D e as doenças por helmintos na Categoria E.

3.1.2 - Acesso à água tratada no Brasil

Segundo dados da Organização Mundial de Saúde, em 2010, 780 milhões de pessoas não tinham acesso à água tratada. Destes, três quartos residiam em zonas rurais, onde a população tende a ser mais pobre e os custos de fornecimento de água de qualidade mais caros (OMS, 2013).

No Brasil o abastecimento de água alcança 84,5% da população (IBGE, 2014). Apesar de ser um percentual relativamente alto, esse dado demonstra a existência de aproximadamente 32 milhões de brasileiros sem acesso. Ao se avaliar de forma mais detalhada o abastecimento, percebe-se uma disparidade relevante entre as grandes regiões do Brasil e, principalmente, entre a população residente na área rural e urbana. O diagnóstico do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2014a) aponta que 91,7% da população urbana no Sudeste é abastecida por rede de abastecimento de água, contrastando com 54,1% da população no Norte. A Figura 3.1 ilustra tal disparidade.

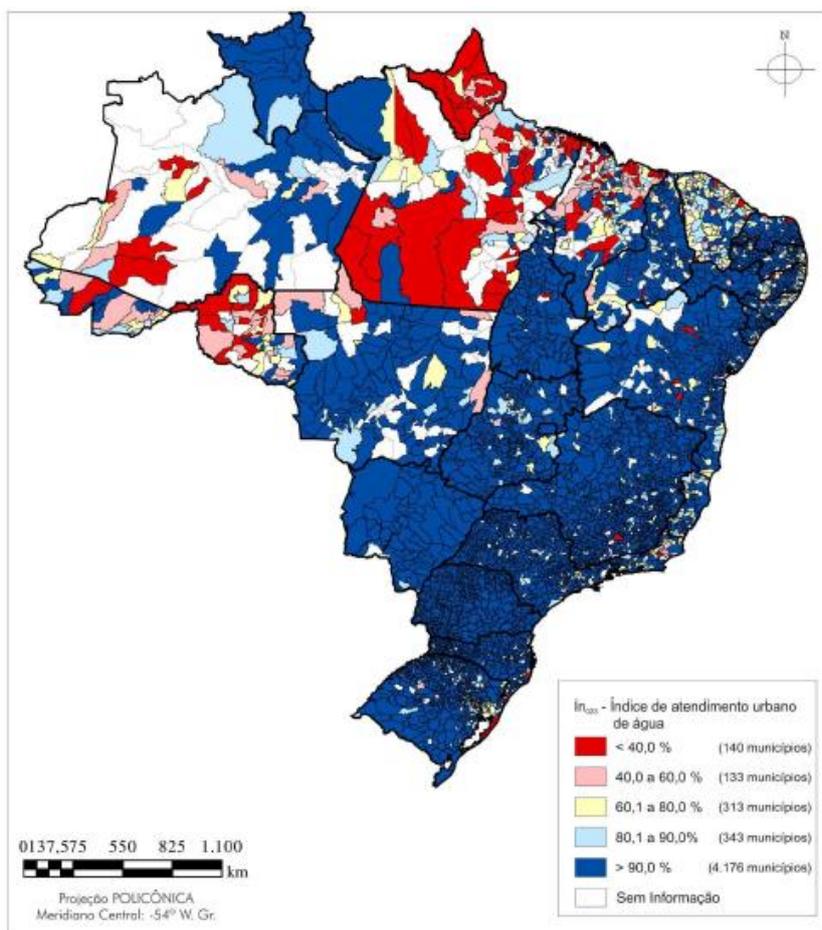


Figura 3.1- Índice de atendimento urbano por rede de água no Brasil (SNIS, 2014a).

Analisando o abastecimento na área rural, encontra-se preponderantemente a ausência de atendimento da rede de água. Este fato se deve à disposição das residências em áreas não urbanas, caracterizada pelas elevadas distâncias entre as unidades domiciliares. Isso resulta em um alto custo de instalação de uma rede de abastecimento de água. A Pesquisa Nacional de Amostras Domiciliares de 2014 (IBGE, 2014) apontou que 66,7% dos domicílios amostrados na área rural não possuíam abastecimento provindo da rede geral, utilizando fontes alternativas, coletivas ou individuais. Percebe-se pela Figura 3.2 o quanto essa realidade se diferencia do meio urbano brasileiro.

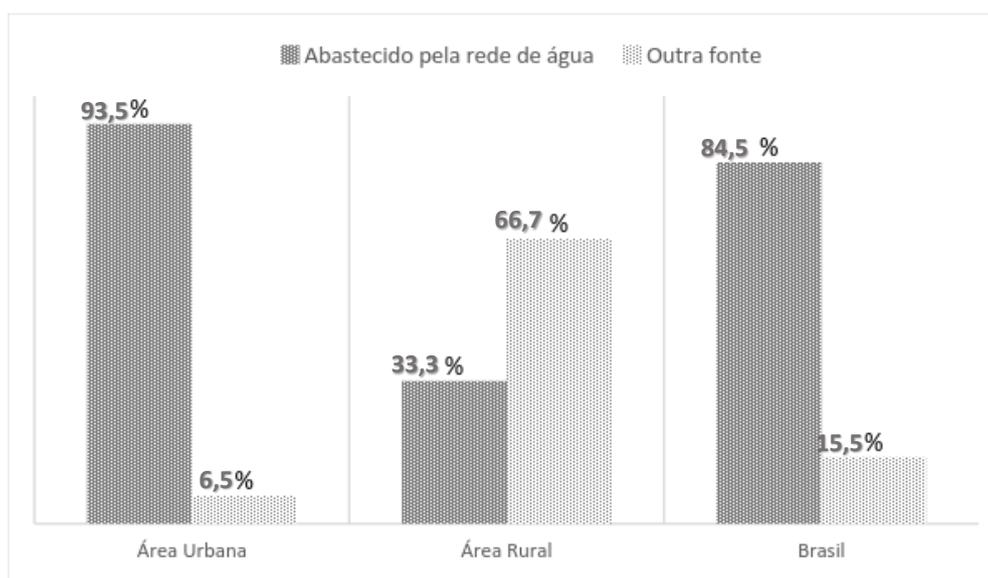


Figura 3.2 – Percentual de cobertura do abastecimento por água tratada no Brasil (IBGE, 2014)

Devido à falta de cobertura dos serviços, busca-se como solução fontes alternativas de abastecimento, como poços ou reservatórios. Todavia, estas soluções podem fornecer água com qualidade que não atenda os padrões determinados pela legislação brasileira para água de consumo humano. Um estudo realizado no estado de São Paulo (Amaral, 2003) analisou a qualidade da água de poços em propriedades rurais. Os resultados obtidos apontaram que a água coletada estava fora dos padrões microbiológicos de qualidade da água para consumo humano, tanto no período chuvoso (90%), quanto no período seco (87%). Contrariando esse fato, 100% dos proprietários rurais entrevistados avaliaram a qualidade da água como boa ou ótima.

A avaliação positiva da água pelo consumidor pode derivar da boa aparência e sabor e do uso por longos períodos sem ocorrência de problemas evidentes. Entretanto, ressalta-se o risco dessa avaliação sem uma análise técnica, que pode subestimar os problemas que uma

água contaminada pode causar, principalmente em crianças menores de 5 anos e indivíduos imunocomprometidos. Quando constatada a qualidade fora dos padrões, faz-se necessário um trabalho de educação e conscientização da comunidade para compreensão da importância da adoção de um tratamento de água. A implementação de sistemas de tratamento deve ser a mais simplificada e econômica possível, visando atingir a população com menos acesso a recursos econômicos e menor escolaridade.

Segundo estudo estatístico comissionado pelo Instituto Trata Brasil e efetuado em 2007 pela Fundação Getúlio Vargas - FGV, os aspectos que mais influenciam na mortalidade infantil são o nível educacional da mãe e o acesso a água. De acordo com a referida Fundação, a presença de filtro de água residencial diminui em 20,9% a chance de mortalidade na infância (Neri, 2007), indicando a importância do tratamento.

A legislação brasileira reconhece a importância do acesso universal ao saneamento básico (Brasil, 2007). A Lei nº 11.445 (BRASIL, 2007) estabelece entre os princípios fundamentais para o saneamento básico: a universalização do acesso; a adoção de métodos, técnicas e processos que considerem as peculiaridades locais e regionais; a utilização de tecnologias apropriadas considerando a capacidade de pagamento dos usuários e a adoção de soluções graduais e progressivas. Além disso, dita à união a obrigação de observar a seguinte diretriz:

“a garantia de meios adequados para o atendimento da população rural dispersa, inclusive mediante a utilização de soluções compatíveis com suas características econômicas e sociais peculiares.” (Brasil, 2007)

A realidade do Brasil rural distancia-se muito do que dita a legislação brasileira. Para que se alcancem os objetivos dessa Lei, é necessário desenvolver políticas públicas para população residente em áreas rurais não abastecidas pela rede pública. As políticas devem contemplar soluções alternativas individuais compatíveis com suas condições econômicas, sociais e culturais.

A seguir serão apresentadas algumas tecnologias passíveis de aplicação em áreas rurais, para, por fim, focar no filtro lento de areia, objeto deste estudo.

3.1.3 Soluções individuais alternativas simplificadas de tratamento de água

Diversos estudos sobre tecnologias simplificadas de tratamento foram elaborados tanto por ONGs como por instituições acadêmicas (CAWST, 2012; DESEA, 2014; OPAS, 2005;

Pinto *et al.*, 2006; Smet *et al.*, 1998). A Tabela 3.2 apresenta as principais soluções propostas em cartilhas elaboradas pelo International Water and Sanitation Centre (Smet *et al.*, 1988), pela Organização Pan-americana da saúde e OMS (OPAS, 2005; OMS, 2007) e no documento sobre sistemas simplificados de saneamento elaborado pela da EMBRAPA (Pinto *et al.*, 2006).

Tabela 3.2 - Soluções individuais alternativas para tratamento de água propostas por diferentes instituições (Smet, 1988; OPAS, 2005; OMS, 2007, Pinto *et al.*, 2006) (continua).

Tecnologia	Descrição	Observações
Sedimentação ¹	Deixar a água parada em um recipiente por um tempo que permita decantar as partículas sedimentáveis.	- Deve ser associada a desinfecção.
Ebulição ¹	A água deve ser fervida em um recipiente com tampa, para que não haja perda, por um tempo superior a 5 minutos.	- Pode deixar a água com sabor desagradável.
Desinfecção solar ²	Exposição da água ao sol em recipientes transparentes. Elimina e inativa os microrganismos graças ao efeito de degradação celular produzido pelo calor e efeito dos raios ultravioleta e luz solar. Pode ser efetuada com o uso de garrafas PETs ou em dispositivos específicos, como refletores solares.	- Os recipientes devem ficar expostos ao sol no mínimo 5 horas; - Ideal para tratar pequena quantidade de água que possua baixa turbidez; - Pode alcançar uma remoção de coliformes da ordem de 3 log.
Destilador Solar ³	Coletor solar que permite evaporar a água, usando a energia solar, condensando e armazenando-a.	- O evaporador deve ter uma área superficial grande em relação a vazão para ter eficiência razoável.
Sifão térmico de aquecimento de água ³	Circuito de aquecimento solar convectivo, onde o calor da radiação solar é absorvido pelos tubos negros que provocam um aumento na temperatura e um processo de pasteurização.	- Dispositivo familiar pode tratar até 15 l/dia.

Tabela 3.2 - Soluções individuais alternativas para tratamento de água propostas por diferentes instituições (Smet, 1988; OPAS, 2005; OMS, 2007, Pinto *et al.*, 2006).
(continuação)

Tecnologia		Descrição	Observações
Desinfecção com lâmpada ultravioleta ³		Exposição da água a radiação de uma lâmpada ultravioleta durante 10-20 segundos.	<ul style="list-style-type: none"> - Requer energia elétrica no local e lâmpada específica, o que aumenta seus custos operacionais e de manutenção; - Não gera subprodutos.
Desinfecção química com cloro	Hipoclorito de sódio ¹	Aplicação de algumas gotas de cloro, deixando repousar por 20-30 minutos.	- A ingestão de doses elevadas de hipoclorito de sódio representa riscos à saúde
	Vaso clorador ¹	Recipiente preenchido cloro e areia, fechado e posto na fonte de água insegura. Graças a mistura entre cloro e areia, o cloro é dissolvido lentamente.	<ul style="list-style-type: none"> - Deve ser repostado a cada 2 semanas; - Pode ter custos consideráveis; - O cloro em pó perde poder de desinfecção quando armazenado por mais de um ano; - Pode ser usado em poços. - Pode desinfetar água suficiente para 60 pessoas
	Pastilha de cloro ¹	Adição de pastilhas de cloro à água.	<ul style="list-style-type: none"> - Custo das pastilhas de cloro resulta elevado, quando o método é usado de forma prolongada - Método indicado para situações emergenciais.
	Clorador flutuante ¹	Corpo flutuante no qual é posto um tubo de plástico contendo pastilhas de cloro, disposto em reservatório de água.	<ul style="list-style-type: none"> - Mesmas restrições da pastilha de cloro - A profundidade do cano determina a quantidade de cloro liberado e deve ser definida por um especialista;
Filtros de mesa com velas filtrantes ³		Dois recipientes postos um sobre outro, onde o recipiente superior contém velas filtrantes conectadas ao recipiente inferior através de dois furos coincidentes.	<ul style="list-style-type: none"> - Muito utilizado no Brasil (filtro de barro); - Útil para água com baixa turbidez; - Pode ser combinada com filtração lenta inserindo uma camada de areia no recipiente superior.

Tabela 3.2 - Soluções individuais alternativas para tratamento de água propostas por diferentes instituições (Smet, 1988; OPAS, 2005; OMS, 2007, Pinto *et al.*, 2006).
(conclusão)

Tecnologia	Descrição	Observações
Filtro cerâmico ⁴	Vaso de cerâmica porosa encaixado sobre um recipiente que reserve a água filtrada	- Pode ser revestido com prata coloidal, gerando um efeito bactericida
Filtro lento de areia domiciliar ³	Tanque de dimensões reduzidas com camada de areia fina, onde a água é filtrada com baixa taxa de filtração.	- Sob condições de operação adequadas, a água produzida é livre de doenças geradas por organismos patógenos.

Legenda: ¹ Smet, 1988; ² Pinto *et al.*, 2006; ³ OPAS, 2005; ⁴ OMS, 2007.

Os tratamentos citados na Tabela 3.2 podem ser combinados entre si e com outras formas de pré-tratamento. Recomenda-se a desinfecção após os tratamentos, para garantir a segurança microbiológica da água, além de ser de extrema importância o cuidado no armazenamento da água tratada, para evitar a recontaminação.

Entre os vários tipos de tratamento domiciliar simplificado, a filtração lenta tem sido utilizada como uma opção adequada para pequenas comunidades rurais e como solução individual para domicílios não alcançados pela rede de abastecimento. A ONG Clear Camboja, por exemplo, instalou mais de 150 mil filtros lentos domiciliares provendo água tratada para aproximadamente 870 mil pessoas residentes em áreas rurais (Clear Cambodia, 2015). Outro exemplo de uso de filtros lento é o Haiti, onde 24,5 mil filtros foram instalados pela ong Water for Haiti, provendo o acesso a água tratada a 2% da população do país. (CWH, no data)

Estudos efetuados em diversos países comprovam que o filtro lento tem se mostrado uma solução eficiente para a melhoria da qualidade da água (Baker *et al.*, 2006; DESEA, 2014; Donison, 2003; OMS, 2013; Tiwari *et al.*). Uma análise da eficiência de 45 filtros instalados na República Dominicana foi efetuada pelo estudioso Kori Donison (Donison, 2003). A pesquisa conclui que o filtro resulta um sistema de tratamento eficaz, aconselhando, porém, a cloração após a filtração para eliminar as bactérias remanescentes. Outro estudo avaliou o desempenho de 107 unidades de filtração domiciliar no Peru, parcela dos 2000 Biofiltros de Manz instalados pela equipe de desenvolvimento da comunidade do Hospital Albert Schweitzer (Backer *et al.*, 2006). A partir das análises da qualidade da água produzida, ambas as pesquisas concluíram que estes filtros são uma opção atrativa para o tratamento de água

domiciliar em áreas rurais de países em desenvolvimento com escassos recursos económicos.

3.2 - FILTRAÇÃO LENTA

A filtração lenta é um tratamento simplificado no qual a água passa por um meio filtrante de granulometria fina, onde a purificação é feita através de mecanismos biológicos, físicos e químicos (Brikké *et al*, 2003). A estrutura dos filtros lentos é basicamente constituída por uma entrada de água bruta, um meio filtrante geralmente de areia, uma camada sobrenadante que garante que a camada biológica permaneça afogada, uma camada drenante, um sistema de drenagem com saída localizada acima do nível da areia, garantindo a lâmina de água sobrenadante. Juntamente ao filtro, é necessário um reservatório de água limpa, que pode ou não estar acoplado a estrutura dele. Geralmente o fluxo da água é descendente, feito por gravidade. Os filtros podem ter taxas fixas ou variáveis, assim como o nível de água afluyente também pode variar ou não. A Figura 3.3 ilustra os elementos básicos de um filtro lento.

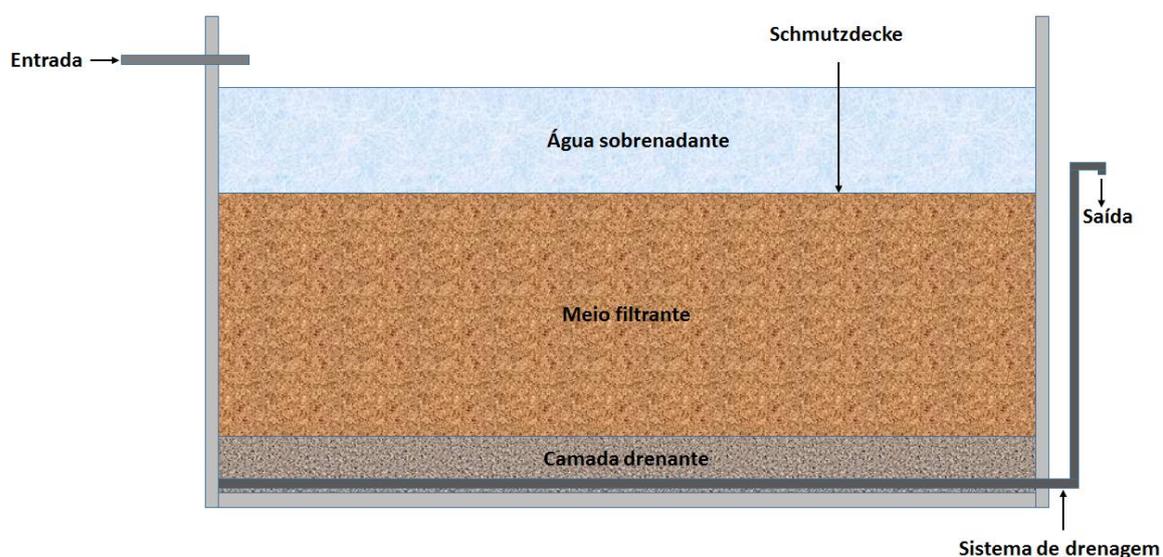


Figura 3.3 - Elementos básicos de um filtro lento de areia.

A principal característica de funcionamento da filtração lenta é a baixa taxa de filtração, que gera um elevado tempo de detenção. O tempo de contato entre a camada filtrante e a água bruta permite o desenvolvimento de organismos de diferentes espécies dentro do filtro.

A camada biológica que se cria na superfície do meio filtrante é denominada *schmutzdecke* e é a principal responsável pela remoção de partículas e microrganismos contidos na água

bruta (Haarhoff *et al.*, 1991). A presença desta biocenose produz efeitos positivos para o tratamento da água como: a produção de substâncias poliméricas extracelulares que revestem a superfície de areia com um biofilme e auxiliam a remoção mecânica de substâncias particuladas, a degradação de substâncias orgânicas dissolvidas pela população microbiana, e a predação de bactérias por protozoários e organismos maiores (Scheisfurth 1986, apud Flamming 2002). A composição e a atividade da comunidade microbiológica no filtro lento irão depender da interação entre a biota presente na água bruta, disponibilidade de substrato e operação e estrutura da unidade filtrante (Flamming, 2002).

A operação dos filtros de areia exige um período de amadurecimento da *schmutzdecke* e limpeza periódica. O tempo de amadurecimento é importante para que os mecanismos de remoção dependentes da camada biológica funcionem adequadamente. Esse período pode variar de alguns dias a dois meses, dependendo das características do filtro, da água bruta e do clima (Di Bernardo *et al.*, 1999).

Com a utilização e operação do filtro, os poros do meio filtrante tendem a ser obstruídos pelas partículas capturadas. Por isso, é importante que se faça a limpeza, que pode ser realizada de diversas formas. Alguns autores, como Di Bernardo *et al.* (1999), recomendam retirar de 1 a 2 centímetros da camada superior do meio filtrante e lavar, secar e recolocar essa areia. O tempo necessário entre as lavagens é denominado carreira de filtração.

Apesar da simplicidade e aplicabilidade desta tecnologia de tratamento, poucos são os estudos sobre os mecanismos físicos e biológicos responsáveis pela retenção de matéria e pela perda de carga no filtro (Campos *et al.*, 2002), sendo necessário o aprofundamento das pesquisas nesse campo. A seguir serão abordados os aspectos gerais destes mecanismos.

3.2.1 Mecanismos de remoção

Neste item são apresentados os mecanismos de remoção atuantes no meio filtrante com base teórica no capítulo *Biological and Physical Mechanism in Slow Sand Filtration* (Haarhoff *et al.*, 1991) do livro *Slow Sand Filtration* e no livro *Tratamento de Águas de Abastecimento por Filtração em Múltiplas Etapas* (Di Bernardo *et al.*, 1999).

3.2.1.1 - Mecanismos biológicos

A atividade biológica é principal responsável pela remoção de impurezas nos filtros lentos e depende de diversos fatores, como a quantidade de energia solar incidente, a concentração

de matéria orgânica, a densidade e diversidade de microrganismos na água bruta e a própria taxa de filtração adotada.

Os organismos que colonizam o meio filtrante são oriundos da água bruta e da própria colonização, sendo basicamente algas, invertebrados, protozoários e bactérias. Esses organismos colonizam principalmente nos primeiros centímetros do meio filtrante, na *schmutzdecke*.

A matéria orgânica depositada na superfície do meio filtrante é utilizada como substrato pelos microrganismos da camada biológica, que obtêm, assim, a energia necessária para o seu metabolismo e crescimento. Os produtos do metabolismo são carreados pela água e usados pelos microrganismos localizados em maiores profundidades no meio filtrante. Desta forma, toda a matéria orgânica presente na água bruta é gradualmente degradada e convertida em água, dióxido de carbono e sais como sulfatos, nitratos e fosfatos. O carbono inorgânico não utilizado como alimento pelas bactérias pode ser retido através da adsorção na superfície dos grãos de areia.

Segundo Haarhoff *et al.* (1991), os principais mecanismos atuantes são a predação, a varrição, o decaimento ou inativação, o colapso metabólico, o efeito bactericida do sol e o aumento da viscosidade na superfície da areia. Há evidências da ocorrência de predação de algas e diatomáceas e de bactérias por parte dos invertebrados bentônicos e protozoários, respectivamente (Haarhoff *et al.*, 1991). Nas camadas mais profundas ocorre a varrição dos detritos que penetraram o meio filtrante, por parte dos organismos que ali habitam.

Muitos microrganismos presentes na água bruta são levados ao decaimento ou a inativação devido ao ambiente hostil e/ou ao colapso metabólico. Um exemplo claro é o decréscimo da densidade de *E.coli* assim que a água bruta se mescla com a lâmina d'água sobrenadante do filtro. Outra causa de inativação é o efeito bactericida da luz solar. A desinfecção por radiação solar é favorecida pelo fato dos filtros lentos estarem geralmente expostos ao sol e descobertos, pela baixa turbidez da água, e pelo elevado tempo de detenção da água, que garante um tempo suficiente de exposição à luz solar. Os microrganismos são, assim, inativados pelo efeito dos raios ultravioleta e da elevada temperatura (Taira, 2008).

O aumento da viscosidade na superfície da areia, devido ao biofilme produzido pela atividade microbiológica, aumenta a adesão e retenção das partículas no meio filtrante. Este

fenômeno explica o aumento da retenção da turbidez inorgânica relacionado à maturidade do filtro.

A atividade biológica que ocorre no meio filtrante ainda é pouco compreendida devido a sua complexidade e variação de acordo com diferentes características da água bruta e outros fatores que influenciam na comunidade ali formada. Entretanto, sabe-se que ela é fundamental para a eficiência do filtro.

3.2.1.2 - Mecanismos físicos

O principal mecanismo físico de remoção de partículas é o peneiramento superficial. De modo geral, pode-se dizer que a superfície do meio filtrante pode capturar partículas que possuam um diâmetro superior a 15% do diâmetro dos grãos filtrantes, retendo assim as partículas maiores como algas e fragmentos vegetais. Com o acúmulo do material filtrado na superfície, a dimensão dos poros diminui, retendo partículas cada vez menores.

Os mecanismos de retenção das partículas que ocorrem no interior dos filtros lentos são considerando análogos aos que ocorrem nos filtros rápidos. Desta forma, as partículas que conseguem penetrar no meio filtrante são capturadas devido a mecanismos de transporte e adesão que levam a partícula ao contato com a superfície dos grãos e fixação nos mesmos. Os mecanismos de transporte incluem interceptação, sedimentação, difusão, inércia e hidrodinâmica, entre os quais os três primeiros prevalecem: a difusão é o principal mecanismo para as partículas menores, enquanto que interceptação e sedimentação atuam mais sobre partículas de porte maior.

Tais mecanismos ocorrem com maior frequência no filtro lento em comparação aos filtros rápido, devido à menor velocidade do escoamento da água e à menor dimensão dos grãos de areia. Com base nas equações teóricas que os descrevem, conclui-se que é possível alcançar um benefício 8 vezes maior no caso da interceptação, 200 vezes maior no caso da sedimentação e 34 vezes no caso da difusão, com o uso do filtro lento.

Diferentemente dos mecanismos de transporte, há incertezas sobre como funcionam os mecanismos de adesão nos filtros lentos. Sabe-se que nos filtros rápidos é necessária a adição de coagulantes que desestabilizem as partículas negativamente carregadas, para que estas possam aderir aos grãos de areia, que possuem carga negativa por natureza. No filtro lento não é claro qual a origem da adesão das partículas. A teoria da reversibilidade da carga da

areia devido a acumulação de partículas positivas aderidas não parece plausível, pois a maioria das partículas na água possui carga negativa quando o pH está próximo do neutro. Tendo em vista a forte presença da atividade biológica no filtro, a teoria mais plausível é de que os processos biológicos interferem na adesão das partículas. Relaciona-se a melhor adesão destas partículas no biofilme aos polímeros liberados pelas bactérias, substâncias capazes de desestabilizar bactérias e argilas.

3.2.2 - Eficiência na remoção de patógenos

O objetivo da filtração, seja ela rápida ou lenta, é a remoção de partículas, patógenos e substâncias nocivas à saúde. Logo, a medida da eficiência de um filtro corresponde a sua capacidade de remoção desses parâmetros. Busca-se com a filtração a maior eficiência de remoção possível, alcançando uma qualidade do efluente dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde.

Um dos primeiros estudos que comprovou a eficiência da filtração lenta na remoção de patógenos foi relativo à epidemia de cólera em 1892, publicado por Allen Hazen em 1913 (Hendricks *et al.*, 1991). O caso ocorreu nas cidades de Hamburgo e Altona, na Alemanha, ambas à beira do rio Elba. Hamburgo, a montante, drenava água do rio e a fornecia aos seus moradores sem tratamento, jogando seu esgoto não tratado no Elba. Altona drenava água contaminada por esgoto a jusante de Hamburgo, porém a água passava por um Filtro Lento antes de chegar a população. Observou-se os casos de cólera de ambas cidades e Altona tinha menos casos de cólera (13.39 casos) que Hamburgo (26.31 casos). Enfatiza-se que a água bruta utilizada por Altona era de pior qualidade devido ao esgoto jogado por Hamburgo a montante, porém essa água era tratada pelo filtro lento, verificando sua eficiência na remoção do patógeno que causa a doença.

Desde o fim do século XIX, diversos estudos foram realizados para a análise da eficiência dessa tecnologia de tratamento (Cleasby *et al.*, 1984; Bellamy *et al.*, 1985; Elliott *et al.*, 2011; etc.). Analisou-se o comportamento de filtros lentos para remoção de diversos parâmetros, que indicam a melhoria da qualidade da água. Os parâmetros laboratoriais geralmente avaliados para indicar a eficiência do filtro são remoção de turbidez, coliformes totais e fecais, cistos de protozoários, vírus e bactérias.

A remoção da turbidez é importante pois esta é uma medida indireta de sólidos em suspensão na água. Entre os sólidos em suspensão, podem ocorrer patógenos aglomerados e cistos de

protozoários, principalmente no meio rural, propagados por fezes de animais. A turbidez também pode ser um problema pois engloba e protege patógenos dos efeitos da desinfecção, não sendo atingidos por cloro (Di Bernardo *et al.*, 1999). Pelos possíveis problemas associados a alta turbidez, a Portaria 2.914 (Brasil, 2011) recomenda que a turbidez em águas para consumo humano tratadas por filtração lenta seja menor que 1,0 uT.

A avaliação de remoção de coliformes também é um parâmetro importante na análise de eficiência de um filtro. A presença de bactérias do grupo coliformes indica a ocorrência de contaminação da água por fezes de animais de sangue quente e, portanto, a possível presença de patógenos causadores de doenças de veiculação hídrica pela rota feco-oral. Este parâmetro é de grande importância em zonas rurais devido à frequente contaminação dos mananciais por fezes dos animais. A *E. coli* é uma das espécies de coliforme fecal cuja origem é estritamente entérica, assim que representa contaminação por fezes. A remoção destes indicadores, assim como outras bactérias heterotróficas possivelmente patogênicas, é fundamental para garantir a segurança microbiológica da água.

Outro parâmetro relevante é a análise de cistos de protozoários, como *Cryptosporidium*. O *Cryptosporidium* é um protozoário parasita de humanos e diversos animais. Pode ser transmitido por alimentos contaminados, pelo contato direto e por água contaminada por fezes de animais (Taira, 2008). Este último, principalmente, é motivo de preocupação em zonas rurais, já que animais podem contaminar a água utilizada para abastecimento. Durante o ciclo de reprodução do *Cryptosporidium* são formados os oocistos. Os oocistos são resistentes e podem sobreviver a condições adversas até ser ingerido pelo hospedeiro, causando a criptosporidiose. A *Giardia lamblia* também é um parasita com forma infectante semelhante ao *Cryptosporidium*, através de cisto de dimensão um pouco superior ao oocisto. Assim, a remoção dos cistos de Giárdia, de tamanho entre 9 a 14 μm , terá eficiência superior ou muito próxima à dos oocistos de *Cryptosporidium*, de tamanho entre 4 a 6 μm (Cerqueira, 2008; Taira, 2008).

A remoção de vírus também é avaliada como parâmetro de eficiência pela quantidade de vírus patogênicos existentes. De acordo com McConnell *et al.* (1984), esgotos domésticos podem ter uma concentração de até 10^5 unidades infecciosas de vírus patogênicos por litro. Esse esgoto, se não tratado corretamente, pode contaminar rios e causar doenças, por isso faz-se importante a busca de tecnologias de tratamento que retirem esses organismos da água antes do consumo.

Vários autores comprovam a eficiência da filtração lenta na remoção de patógenos de acordo com os parâmetros mensurados, como demonstrado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Estudos sobre remoções de organismos indicadores de patógenos e patógenos com filtros que atingiram a maturidade da camada filtrante (continua).

Microrganismo Avaliado	Autor (Ano)	Eficiência na Remoção	Operação	Taxa de Filtração	Profundidade da Camada Filtrante	Escala
Coliformes totais	Cleasby <i>et al.</i> (1984)	>99%	Fluxo Contínuo	-	-	Piloto
	Murtha e Heller (2003)	>99%	Fluxo Contínuo	0,3 a 0,1 m/h	0.75m	Piloto
	Bellamy <i>et al.</i> (1985)	>99%	Fluxo Contínuo	0,47 m/h	0.48 e 0.97m	Piloto
	Devi <i>et al.</i> (2008)	100%	Fluxo Intermitente	0,2 a 1,1 l/h*	0.4m	Real
Coliformes Fecais ou Termotolerantes	Jenking <i>et al.</i> (2011)	96%	Fluxo Intermitente	0,3 m/h	0,4m	Real
	Stauber <i>et al.</i> (2006)	93%	Fluxo Intermitente	1,7 l/h*	0,4m	Real
	Palmateer <i>et al.</i> (2009)	>99%	Fluxo Intermitente	1,04 l/h*	-	Real
	Elliott <i>et al.</i> (2008)	>98%	Fluxo Intermitente	0,5–1,1 m/h	0,4m	Real
Bactérias Heterotróficas	Hazen (1899)	>98%	Fluxo Contínuo	-	-	Real
	Jenking <i>et al.</i> (2011)	98,5%	Fluxo Intermitente	0,3 m/h	0,6m	Real
	Palmateer <i>et al.</i> (2009)	83%	Fluxo Intermitente	1,04 l/h*	-	Real

Tabela 3.3 – Estudos sobre remoções de organismos indicadores de patógenos e patógenos com filtros que atingiram a maturidade da camada filtrante. (conclusão)

Microrganismo Avaliado	Autor (Ano)	Eficiência na Remoção	Operação	Taxa de Filtração	Profundidade da Camada Filtrante	Escala
Cistos de Giárdia	Bellamy <i>et al.</i> (1985)	99%	Fluxo Contínuo	0,47 m/h	0,48 a 0,97m	Piloto
	Heller <i>et al.</i> (2004)	90-99,9%	Fluxo Contínuo	0,125 e 0,250 m/h	-	Real
	Palmateer <i>et al.</i> (2009)	100%	Fluxo Intermitente	1,04 l/h*	-	Real
Oocistos de <i>Cryptosporidium</i>	Schuler <i>et al.</i> (1991)	>99.9%	Fluxo Contínuo	0,15; 0,3 e 0,4 m/h	-	Piloto
	Taira (2008)	>99%	Fluxo Contínuo	0,13 e 0,25 m/h	0,85 m	Piloto
	Heller <i>et al.</i> (2004)	90-99,9%	Fluxo Contínuo	0,125 e 0,250 m/h	-	Real
	Palmateer <i>et al.</i> (2009)	99,98%	Fluxo Intermitente	1,04 l/h*	-	Real
Vírus	Poynter e Slade (1977)	>99%	Fluxo Contínuo	0,2 e 0,4m/h	-	Real
	Hijnen <i>et al.</i> (2004)	>95%	Fluxo Contínuo	0,3 m/h	1,5m	Piloto e Real
	Jenking <i>et al.</i> (2011)	71%	Fluxo Intermitente	0,3 m/h	0,4m	Real
	Elliott <i>et al.</i> (2011)	70 - 95%	Fluxo Intermitente	0,5–1,1 m/h	0,4m	Real

* Colocou-se a vazão pois o artigo não especificava a taxa de filtração.

A Tabela 3.3 mostra que os resultados obtidos com filtros lentos de areia podem variar. Jenkins *et al.* (2011) mostram essa abrangência nos valores de remoção mostrados na tabela. Em seu estudo, utilizou-se 18 filtros intermitentes, variando condições como a taxa de

filtração (entre 0,01 a 0,041 m/h) e a granulometria (coeficientes de desuniformidade entre 2.1 e 2.4, diâmetro efetivo entre 0,17 e 0,51). A remoção de coliformes fecais na média foi de 96%, mas chegou a 99.94% nas melhores condições e a 68.4% nas piores, reafirmando a importância das condições operacionais para filtração lenta. O mesmo aconteceu com a remoção de vírus, que chegou a 97.2% de remoção em condições ideais, mas teve uma média de 71%.

Stauber *et al.* (2006) também obteve resultados maiores que os 93% de remoção média para coliformes fecais apresentados na Tabela 3.3, chegando a 99,7% em seus estudos de campo. Os autores atribuem essas variações ao estágio de maturação da camada biológica e ao respeito às condições operacionais do filtro, que era domiciliar e intermitente, precisando de alimentação frequente de certo volume de água.

O valor encontrado por Palmateer *et al.* (2009) para remoção de bactérias foi o mais baixo entre os estudos da Tabela 3.3. Os autores justificam que esse resultado foi obtido antes da camada biológica ter atingido seu desenvolvimento completo. A remoção de Elliott *et al.* (2011) para vírus também poderia aumentar considerando as questões operacionais segundo os autores.

A remoção de cistos de protozoários mostra como a filtração lenta é uma excelente opção para águas possivelmente contaminadas com cistos. Tanto para cistos de *Giardia* como para oocistos de *Cryptosporidium*, as remoções foram sempre superiores a 90%, sendo na grande maioria das vezes superior a 99%.

Além dos parâmetros citados, diversos fatores podem influenciar na eficiência da filtração lenta, como condições climáticas, taxa de filtração, maturidade da camada filtrante, tamanho dos grãos, profundidade da camada filtrante, qualidade da água bruta e outros (Hendricks *et al.*, 1991). Nos itens que se seguem são discutidos os fatores de projeto mais influentes na eficiência do filtro.

3.2.2.1 - Taxa de filtração

Como mostrado no item de Mecanismos de Filtração (item 3.2.1), o peneiramento remove somente uma parte das partículas na filtração lenta, sendo outra parte removida por outros mecanismos relacionados com a atividade biológica da camada filtrante. Essa atividade é altamente dependente do tempo de contato entre a partícula, substância ou microrganismo a

ser removido e a comunidade biológica do filtro (OMS, 1974). A taxa de filtração baixa é a principal característica dos filtros lentos, por permitir esse tempo de contato entre a comunidade do meio filtrante e a água, permitindo o seu tratamento.

Uma alta velocidade de escoamento e, conseqüentemente, uma alta taxa de filtração, diminui a eficiência do filtro lento, pois além de diminuir o tempo de contato, pode causar o carreamento indesejado de partículas e matéria orgânica (OMS, 1974). Por outro lado, taxas de filtração excessivamente baixas podem influenciar no crescimento de algas em filtros abertos e com iluminação direta, o que pode causar gosto e odor indesejados na água devido aos produtos liberados pelo metabolismo delas (OMS, 1974).

As taxas recomendadas para filtração lenta variam entre 0,05 m/h (1,2 m/d) a 0,4 m/h (9,6 m/d) (Buzunis, 1995; OMS, 1975). Quanto menores as taxas, melhor o tratamento oferecido pelo filtro, porém isso também implica na diminuição da capacidade de produção de água, o que não é vantajoso. Deve-se, assim, buscar uma taxa que garanta a produção de uma quantidade razoável de água mantendo o nível de remoção desejado.

Bellamy *et al.* (1985) mostram em seu estudo, com colunas de 30,5 centímetros de diâmetro operadas continuamente por um ano, como as mudanças na taxa de filtração alteram as remoções de diferentes microrganismos. Os resultados são apresentados na Tabela 3.4, adaptada do estudo de Hendricks *et al.* (1991).

Tabela 3.4 - Efeito da taxa de filtração na remoção de microrganismos. (Hendricks *et al.*, 1991).

Microrganismo	Número de Análises	Concentração da Água Bruta	Remoção no Filtro 1 (0,04 m/h)	Remoção no Filtro 2 (0,12 m/h)	Remoção no Filtro 3 (0,40 m/h)
Cistos de Giárdia	222	50 - 5075 (cistos/L)	99,991	99,994	99,981
Coliformes Totais	243	0 - 29000 (cfu/100ml)	99,96	99,67	98,98
Coliformes Fecais	81	0-35000 (cfu/100ml)	99,84	98,45	98,65

Percebe-se que a taxa de filtração tem influência na remoção, porém as variações não foram muito altas. Mesmo os filtros com maiores taxas ainda apresentaram remoções elevadas, portanto, a taxa de filtração não deve ser o único fator decisivo na escolha do design no filtro, desde que esteja dentro da recomendação para filtração lenta (Hendricks *et al.*, 1991).

3.2.2.2 – Operação em escoamento intermitente ou contínuo

A remoção que ocorre nos filtros lentos acontece principalmente devido aos microrganismos presentes no meio filtrante, como falado no item 3.2.1.1, sobre mecanismos biológicos. A comunidade do meio filtrante, em sua maioria aeróbia, precisa se manter viva para que o tratamento seja efetivo, precisando do oxigênio fornecido pelo escoamento da água (Ellis *et al.*, 1985). Se o escoamento não é contínuo, é preciso que a camada sobrenadante acima do meio filtrante seja reduzida, a fim de permitir a passagem de oxigênio (Buzunis, 1995). Devido à redução no oxigênio fornecido, a eficiência com escoamento intermitente é reduzida.

Um estudo comparando a alimentação do filtro com escoamento contínuo com filtro de escoamento intermitente foi feito por Young-Rojanschi *et al.* (2014). Comparou-se 5 filtros operados com escoamento intermitente e tempo de residência de 24 horas, com 3 filtros alimentados continuamente. Os resultados obtidos, mostrados na Tabela 3.5, indicam que a eficiência de remoção foi menor no fluxo intermitente.

Tabela 3.5 - Resultados obtidos por Young-Rojanschi *et al.* (2014) na comparação da eficiência de remoção com escoamento contínuo e intermitente

Microrganismo	Remoção com Escoamento Contínuo	Remoção com Escoamento Intermitente
<i>E. Coli</i>	3,71 log	1,67 log
Vírus Bacteriófago MS2	2,25 log	0,85 log
Turbidez	96%	87%

A Tabela 3.5 mostra que o escoamento contínuo favorece a remoção de diversos microrganismos. Além dos resultados de remoção, os autores ainda relatam que nos filtros intermitentes o oxigênio dissolvido atingiu uma média de 0 mg/L nas 24 horas de tempo de residência após 60 dias de experimento, em profundidades de 5 e 10 centímetros. Isso implica no impedimento de atividade aeróbica da comunidade biológica, influenciando negativamente na sua eficiência de remoção.

Apesar da redução na eficiência, os filtros intermitentes ainda atingem elevados valores de remoção, como demonstrado na Tabela 3.3. Os valores chegam a 100% para coliformes totais (Devi *et al.*, 2008), 99% para coliformes fecais (Palmateer *et al.* 2009), 100% para

cistos de Giárdia (Palmateer *et al.* 2009) e 99,9% para oocistos de *Cryptosporidium* (Schuler *et al.*, 1991; Heller *et al.* 2004).

O fluxo intermitente é muito importante para a acessibilidade do filtro lento. Os filtros a nível domiciliar são frequentemente operados com alimentação intermitente, ao contrário dos de maior escala. A dificuldade de manter o fluxo constante faz com que a intermitência seja uma solução para famílias que não possuem meios de abastecimento contínuos. A inconstância da alimentação não significa necessariamente que a produção de água filtrada não será constante.

3.2.2.3 - Maturidade biológica da camada filtrante

Segundo Bellamy *et al.* (1985a), a maturidade biológica da camada filtrante é a característica que mais influencia na eficiência do filtro lento. A camada filtrante requer um tempo até atingir seu amadurecimento para atuar em sua eficiência máxima, com a *schmutzdecke* desenvolvida (Hendricks, 1991). Alguns resultados sobre o tempo necessário para o desenvolvimento da *schmutzdecke* e amadurecimento do filtro são mostrados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Tempo de maturação reportados para filtros lentos de areia. (Haarhoff *et al.*, 1991)

Estudo	Tempo de Maturação	Critério utilizado para definir a maturidade do filtro
Poynter e Slade (1977)	60 dias	Até atingir remoção contínua de vírus
Sundaresan and Paramasivan (1982)	35 dias	Até que <i>E. Coli</i> estivesse ausente no efluente
Bowles <i>et al.</i> (1983)	60 dias	Até que o efluente tivesse menor turbidez que o afluente
Fox <i>et al.</i> (1984)	40 dias	Até que os coliformes totais estivessem <1/100ml na média
Bellamy <i>et al.</i> (1985)	35 - 50 dias	Até que coliformes totais no efluente se estabilizasse
Bellamy <i>et al.</i> (1985)	280 dias	Até que a remoção dos cistos de Giárdia fossem de 99% para 100%
Pyper (1985)	100 dias	Até que remoções irregulares desaparecessem

Percebe-se que no resultado obtido para cistos de *Giárdia*, o tempo de maturação não interfere tanto na eficiência de remoção, que já é de 99% para filtros com meio filtrante novo devido ao tamanho dos cistos (Bellamy *et al.*, 1985b). A mesma conclusão foi obtida por Fogel *et al.* (1993), que não observaram mudanças com a maturação da *schmutzdecke*, com remoção de 99% para cistos de *Giárdia* e 48% para oocistos de *Cryptosporidium*. A baixa remoção para oocistos foi justificada pela baixa temperatura da água bruta e coeficiente de desuniformidade fora do recomendado (Fogel *et al.*, 1993).

Os tempos de maturação mostrados na Tabela 3.6 são referentes ao início da operação dos filtros, nos quais a areia está previamente limpa e sem uso. O tempo de maturação tende a diminuir a cada limpeza (Haarhoff *et al.*, 1991). Outros fatores podem influenciar na redução do tempo de maturação, como o aumento da temperatura (Poynter *et al.*, 1977), quantidade de nutrientes disponível (Bellamy, 1985a), a diminuição da taxa de filtração e fluxo descendente (Britto *et al.*, 2005).

Bellamy *et al.* (1985a) em seu experimento confirmaram a necessidade de maturação dos filtros para que se atinja máxima eficiência. A remoção de coliformes totais, por exemplo, foi maior que 99% com o filtro maduro, mas era menor que 60% quando o filtro era utilizado pela primeira vez, dados que reafirmam a necessidade do tempo de maturação.

3.2.2.4 - Profundidade da camada filtrante

Pouco se sabe sobre como a profundidade afeta a eficiência do Filtro Lento a nível domiciliar. Um dos poucos estudos sobre o efeito de alterações nesse parâmetro foi feito por Bellamy *et al.* (1985a). Nele, os autores demonstraram que variações na profundidade da camada filtrante não causam grandes alterações na remoção de coliformes. Com uma profundidade de 97 centímetros, os autores relataram eficiência de remoção de 97%. Ao se reduzir a profundidade para 48 centímetros, a eficiência caiu somente 2%, indo para 95%.

Na Tabela 3.3 é apresentado o resultado de diferentes profundidades estudadas. Entretanto, a maioria dos estudos lidos sobre Filtração Lenta não especificam o motivo da profundidade adotada, mas grande parte fica em torno de 40 a 60 centímetros. Haarhoff (1991) discute a profundidade em que diferentes patógenos ainda ocorrem na camada filtrante, citadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Profundidade onde os microrganismos são encontrados na camada filtrante. (Haarhoff, 1991).

Microrganismo	Profundidade	Observações
Alga	até 8 cm	-
Protozoários e Invertebrados	20 cm	Exceto pequenas amebas encontradas em até 30 cm
Bactérias	30 cm	Em 5cm, a remoção foi de 90% e em 20cm chegou a 95%. <i>E. Coli</i> foram encontrados até 30 cm
Vírus	35 cm	98% dos vírus já entravam na camada filtrante inativos, não se sabe o motivo disso. Dos 2% de vírus ativos, a grande maioria foi retida até 35 cm, mas encontrou-se vírus em até 107 cm.

Nota-se, da Tabela 3.7, que a maioria dos organismos patógenos não está mais presente a partir de 35 centímetros. Portanto, infere-se que uma profundidade de 40 centímetros é suficiente para a remoção, garantindo ainda 5 centímetros de segurança. Profundidades maiores que essa afetariam pouco a eficiência e impactariam os custos e a estrutura física, podendo não ser vantajoso.

3.2.3 Limitações da filtração lenta

Apesar da simplicidade, a filtração lenta possui algumas restrições para garantir uma boa remoção. Wegelin (1988) afirma que nenhum processo unitário de tratamento consegue melhorar as qualidades físicas, químicas e bacteriológicas como um filtro lento, entretanto a utilização dessa tecnologia deve seguir pré-requisitos para seu bom funcionamento.

A principal limitação da filtração lenta está relacionada a qualidade da água bruta. Filtros lentos possuem restrições quanto a turbidez, cor verdadeira e concentração de ferro e manganês, algas e coliformes da água a ser filtrada. Deve-se garantir que as características da água bruta estejam dentro do recomendado, embora não haja consenso na literatura sobre os limites aceitáveis para esses parâmetros. A Tabela 3.8 apresenta as características recomendadas por Di Bernardo *et al.* e Cleasby.

Tabela 3.8 – Qualidade da água recomendável para aplicação da filtração lenta (Di Bernardo *et al.*, 1999).

Características da Água	Valores Recomendáveis	
	Di Bernardo (1993)	Cleasby (1991)
Turbidez (uT)	10	5
Cor Verdadeira (uC)	5	-
Ferro (mg Fe/L)	1	0,3
Manganês (mg Mn/L)	0,2	0,05
Algas	250 UPA/mL	5µg clorofila-a/L
Coliformes Totais (NMP/100ml)	1000	-

Cleary (2005) ressalta a importância de não se utilizar afluente com turbidez elevada na filtração lenta, pois pode obstruir o filtro rapidamente, elevando a perda de carga e diminuindo o tempo de carreira de filtração. A cor verdadeira deve ser baixa, já que está relacionada a presença de substância dissolvidas na água, não retiradas em processos físicos (Di Bernardo *et al.*, 1999). A quantidade de algas presentes na água bruta também não pode ser elevada, já que estas causam maior impermeabilização do meio filtrante (Di Bernardo *et al.*, 1999). As recomendações quanto a quantidade de Ferro e Manganês são devido ao fato da possível precipitação destes, que podem obstruir o filtro (Cleasby, 1991).

Além da qualidade da água bruta, o material filtrante dos filtros lentos também deve possuir características específicas, devendo ser selecionado de forma a incentivar a presença dos mecanismos de remoção predominantes. Para filtros lentos de areia, a OMS (1974) define que o material deve ter coeficiente de desuniformidade menor que 2 e diâmetro efetivo entre 0,15 e 0,35 milímetros. Di Bernardo *et al.* (1999) recomenda coeficiente de desuniformidade de 2 a 5, diâmetro efetivo de 0,15 a 0,25mm e tamanho dos grãos de 0,08 a 1,0mm. Bellamy *et al.* (1985) em seus estudos observou que areias mais finas (0,29mm de diâmetro efetivo) são mais eficientes na remoção de coliformes totais que mais grossas (0,62mm). Além disso, estudos sobre o efeito do coeficiente de desuniformidade (CD) sobre a remoção de oocistos apontam que altos valores de CD podem reduzir significativamente a eficiência dos filtros (Fogel, 1993).

Os fatores limitantes da filtração lenta influenciam não só na eficiência do filtro mas no tempo de carreira necessário até a próxima limpeza. Uma rápida obstrução leva a necessidade de limpeza com maior frequência, que pode ser feita por raspagem ou retirada dos primeiros centímetros de areia, onde a maior parte das impurezas está retida¹. Uma questão problemática é a necessidade de drenagem da água para permitir a raspagem, que pode prejudicar a comunidade biológica. Letterman (1991) recomenda que a lavagem seja feita o mais rápido possível, para minimizar a alteração na camada biológica, levando no máximo 48h para a retomada da operação do filtro. O tempo de maturação para a *schmutzdecke* se desenvolver novamente ainda não é claro, dependendo de muitos fatores, mas diversos autores sugerem entre 24 e 48 horas (Visscher, 1990; Ellis, 1985; Hazen, 1913 *apud* Letterman, 1991).

As condições climáticas do local de instalação do filtro também podem influenciar na sua eficácia. Em locais com baixas temperaturas, a eficiência do filtro pode diminuir devido a inibição no metabolismo dos microrganismos do meio filtrante (Cleasby, 1991). No Brasil, tal restrição não se apresenta como problema.

Outras questões além das apresentadas devem ser analisadas para aplicação do filtro, como por exemplo, sua acessibilidade nos quesitos de custos de materiais, sua aceitabilidade pela população e a facilidade de manuseio.

3.2.4 - Arranjo físico e operação de filtros domiciliares baseados na filtração lenta

Filtros lentos de areia são utilizados como opção de tratamento de água em diversas escalas, desde tratamento para cidades a tratamentos domiciliares. Na década de 90, David Manz desenvolveu um filtro lento para tratamento de água a nível domiciliar, se tornando um dos mais distribuídos nos países em desenvolvimento (Baker *et al.*, 2006). Atualmente, ele é utilizado por diversas organizações que objetivam contribuir para o acesso universal à água limpa, como a CAWST, uma organização Canadense que visa fornecer treinamento consultorias em questões de água e saneamento para as populações de países em

¹ Para checar se a areia retirada está limpa após a lavagem, Di Bernardo *et al.* (1999) recomenda colocar um pouco de areia em uma garrafa transparente com água limpa, agitá-la e observar a turbidez da água. Outros autores recomendam a raspagem de aproximadamente 2,5 centímetros da areia (Letterman, 1991). Esse método necessita da reposição da areia após diversas limpezas. A nova areia limpa pode prejudicar a eficiência dos mecanismos biológicos, por isso recomenda-se que a areia limpa seja colocada no fundo e não no topo (Letterman, 1991).

desenvolvimento (CAWST, 2012). CAWST aperfeiçoou o filtro de Manz para uma estrutura de concreto que fosse durável. A Figura 3.4 mostra a estrutura do filtro disseminado pela CAWST.

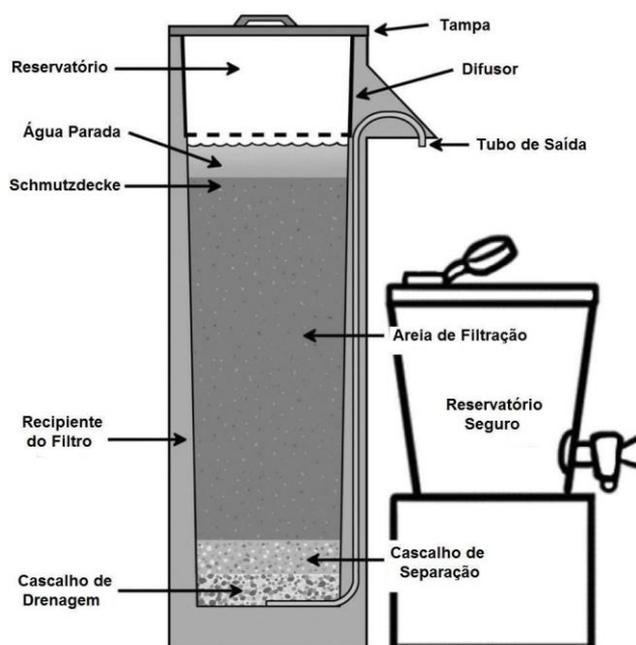


Figura 3.4- Estrutura do filtro da CAWST. Adaptada de CAWST (2012).

O filtro apresentado por CAWST é composto por estruturas frequentemente encontradas em diversos filtros lentos a nível domiciliar. O reservatório de água bruta pode suportar até 12 litros e possui uma tampa, para que a água não seja contaminada, e um difusor com orifícios distribuídos, para que a areia não seja perturbada ao se despejar a água, protegendo a biocamada. O nível de água sobre o meio filtrante deve ser de 5 centímetros para garantir a sobrevivência dos microrganismos da *schmutzdecke*, não podendo ser maior para que o oxigênio dissolvido chegue até essa camada biológica que se instalará nos 2 primeiros centímetros do meio filtrante. Logo abaixo da camada filtrante localiza-se a camada suporte, constituída de cascalho de separação, para que a areia não obstrua a tubulação de saída de água filtrada, e o cascalho de drenagem, responsável por impedir que o cascalho menor obstrua o tubo de saída. Após percorrida a camada filtrante e os cascalhos, a água passa pelo tubo de saída e é direcionada para um recipiente que garanta seu armazenamento seguro

Para o bom funcionamento do filtro, CAWST recomenda garantir que este tenha sido instalado a mais de 30 dias para obter maturidade da camada filtrante e que seja usado pelo

menos uma vez por dia, todos os dias, com água da mesma fonte. A turbidez da água bruta que alimentará o filtro não deve exceder 50 uT e a vazão de alimentação não deve ser maior que 0,4 litros por minuto para as dimensões dadas. A areia deve estar reta e nivelada e é importante checar se o filtro não está vazando e se o difusor está em bom estado.

CAWST (2012) determina a limpeza de seu filtro por movimentos circulares na areia com a mão e retirada da água suja. Segundo eles, a *schmutzdecke* atingirá o amadurecimento mais rápido se não houver retirada da areia. A lavagem deve ser feita quando o filtro estiver obstruído e a vazão for muito baixa, a ponto de atrapalhar a rotina dos moradores.

Apesar de ser uma opção durável, o filtro de CAWST possui algumas limitações, como identificado pela organização peruana DESEA (2014). Sua estrutura de concreto limitou o transporte do filtro a comunidades dos Andes, no Peru, que não possuíam estradas de acesso. A solução foi desenvolver um filtro semelhante de PVC, pesando somente 10 quilos e custando aproximadamente 50 dólares. Segundo DESEA (2014), o filtro possui pequenas alterações em suas dimensões, mas isso não afetou sua eficiência, que é igual ou superior ao filtro de CAWST, dependendo da característica avaliada. A estrutura desse filtro é apresentada na Figura 3.5.

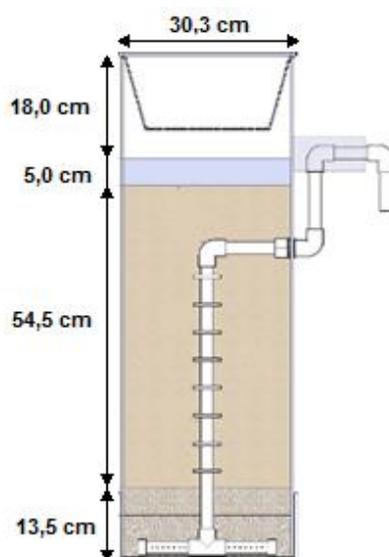


Figura 3.5 – Estrutura utilizada pela organização peruana DESEA (2014)

Outra solução proposta para tratamento de água a nível domiciliar foi apresentada por Smet *et al.* (1988). Essa alternativa utiliza bombonas como reservatórios, sendo uma para reservatório de água bruta, outra contendo o meio filtrante e uma terceira para armazenar a

água filtrada (Figura 3.6). O sistema exige desnível para que a água escoe de uma bombona para a outra. Apesar da alimentação de água no reservatório de água bruta ser intermitente, o escoamento no filtro é contínuo. Para isso, uma caixa flutuante é instalada de modo que a carga dentro dela seja constante. Assim, a vazão de água para o filtro, que depende da carga, será constante.

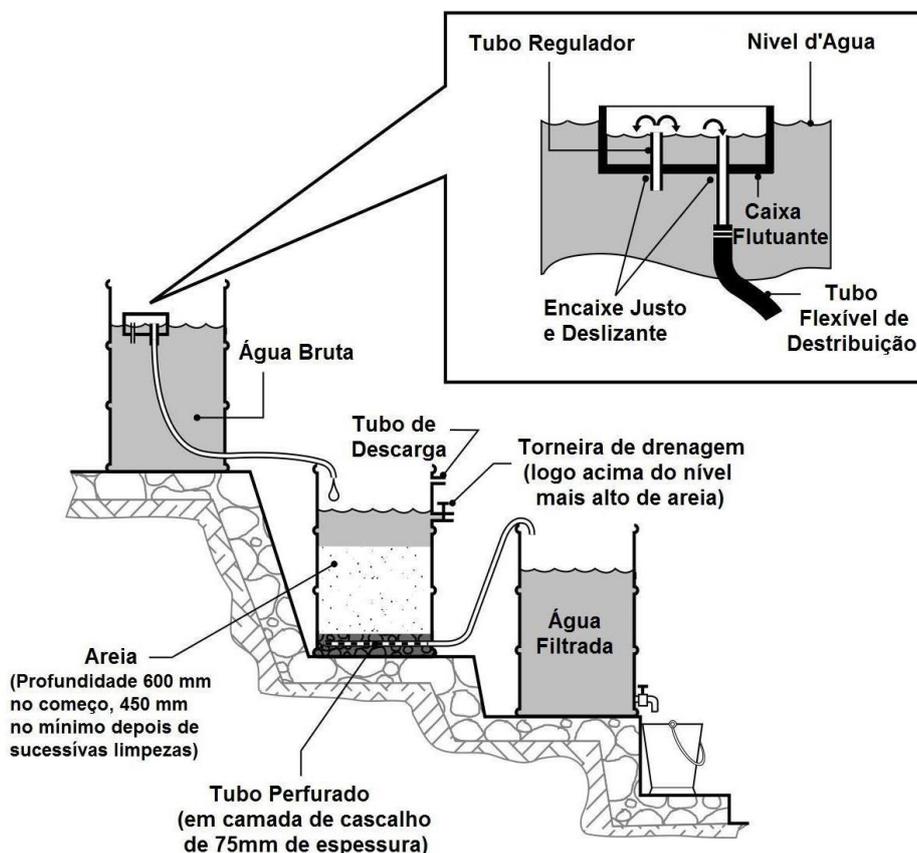


Figura 3.6 - Filtro lento de areia de escoamento contínuo, sugerido por Heber (sem data).

A combinação de areia com outros materiais na constituição do meio filtrante também é uma possibilidade de arranjo. Segundo Di Bernardo *et al.* (1999) a utilização de geotêxtil sobre a camada de areia pode diminuir a profundidade da camada filtrante. São utilizadas combinações com velas e geotêxtil, materiais porosos que retém partículas. Como vantagem, a combinação com esses materiais pode aumentar a eficiência do processo e facilitar a limpeza, mas também tendem a deixá-lo mais caro. A Organização Panamericana de Saúde (OPAS, 2005), sugere como opção de tratamento a nível domiciliar a filtração lenta combinando areia, geotêxtil e vela, conforme mostrado na Figura 3.7. Nessa estrutura, a vazão de alimentação é intermitente e o geotêxtil auxilia na não perturbação da areia ao se despejar a água.

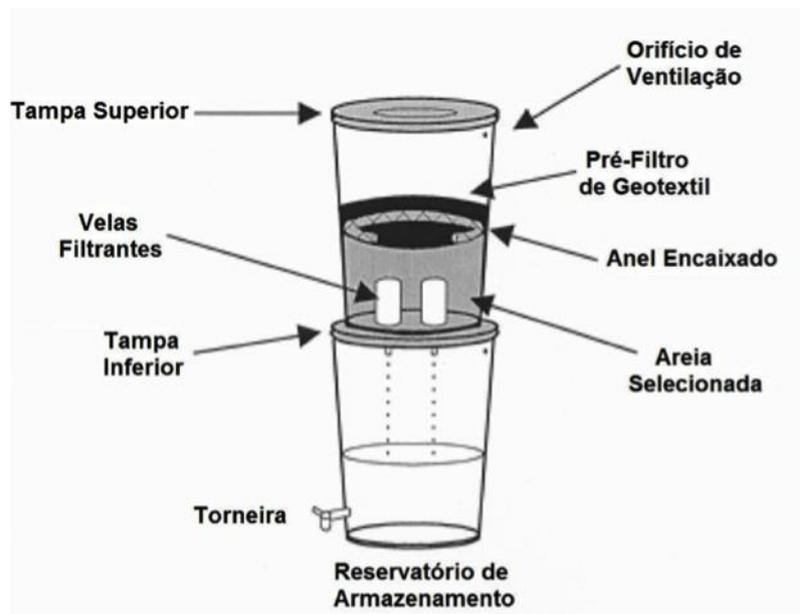


Figura 3.7 - Filtro lento doméstico com areia, vela e geotêxtil (OPAS, 2005)

Apesar dos modelos existentes representarem boas soluções, apresentam algumas características passíveis de aperfeiçoamento. Uma possível melhoria é a redução da espessura da camada filtrante, que diminuiria os custos com areia, o volume e peso da estrutura proposta, tornando o filtro mais acessível. Poucos estudos avaliam a influência desse parâmetro na qualidade da água filtrada, portanto identificou-se a necessidade de aprofundar essa questão.

Juntamente, constatou-se que a maioria das estruturas não apresentavam reservatório de água limpa acoplado. Esta característica faz com que em muitos casos sejam usados reservatórios não apropriados, gerando um risco de recontaminação da água tratada. Outra questão levantada é a quantidade de água que os filtros domiciliares conseguem tratar, geralmente restringindo-se a um volume que não atende à demanda total de água da casa. Desta forma, a proposta deste estudo é a elaboração de dois protótipos que possam trazer as melhorias visadas.

4 – METODOLOGIA

O presente trabalho visou a elaboração de dois protótipos de filtro lento para tratamento de água: um para abastecimento domiciliar para atender todas as necessidades de uso da água e outro para atender necessidades de ingestão e preparação de alimentos, ambos baseados no consumo de uma família de 6 a 7 pessoas.

Dividiu-se o trabalho na fase de estudo em escala piloto e a fase de desenvolvimento do protótipo. Na fase de estudo em escala piloto, testou-se a eficiência da camada de areia de espessura reduzida e de diferentes taxas de filtração. Na fase de desenvolvimento de protótipos, conceberam-se e montaram-se as estruturas físicas dos filtros, pensando no funcionamento hidráulico que atenda às condições desejadas.

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Saneamento Ambiental do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília - UnB.

4.1 - ESTUDO EM ESCALA PILOTO

O estudo em escala piloto foi executado em 3 etapas: Etapa Preliminar – Montagem e teste do filtro em escala piloto; Etapa I – Avaliação da taxa de filtração; Etapa II – Avaliação da espessura da camada filtrante (Figura 4.1).

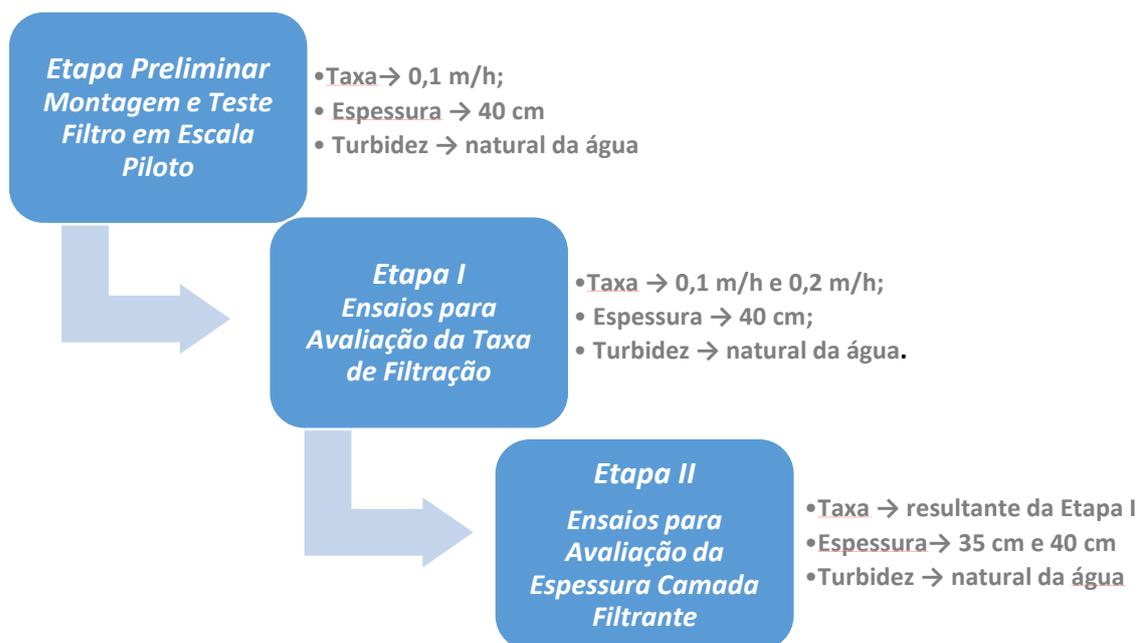


Figura 4.1 – Esquema das etapas metodológicas do estudo em escala piloto

4.1.1 – Parâmetros monitorados

Para analisar o desempenho do filtro lento, definiram-se os parâmetros de avaliação julgados mais importantes de acordo com o objetivo do trabalho. Os parâmetros de avaliação da eficiência de remoção do filtro selecionados foram: turbidez, coliformes totais, *Escherichia coli* e partículas de tamanho semelhantes a oocistos de *Cryptosporidium sp* e cistos de *Giardia lamblia*. Também foram monitorados o pH e o oxigênio dissolvido na água filtrada, para analisar possíveis instabilidades no sistema.

A legislação brasileira estabelece os padrões de potabilidade e os procedimentos de controle de qualidade de água para consumo humano por meio da Portaria n° 2914 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011). A Portaria define valores permitidos para diferentes parâmetros, entre os quais são de interesse de estudo os apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores máximos permitidos para parâmetros de qualidade da água filtrada mediante filtros lentos referentes à pós-filtração, antes da desinfecção.

Parâmetro	Valor Máximo Permitido
Turbidez	1 uT em 95% das amostras
<i>Escherichia coli</i>	Ausência em 100 mL
Coliformes totais	Apenas uma amostra, entre as amostras examinadas no mês, poderá apresentar resultado positivo*

*Valor para sistemas coletivos que atendem populações menores de 20000 habitantes.

Buscou-se um filtro que possua características físicas que garantam a sua eficiência de remoção e o bom funcionamento a um sistema compacto de tratamento domiciliar. Para alcançar tal eficiência, foram feitos experimentos que avaliaram o comportamento da remoção de *E.coli* e partículas de tamanho semelhante a oocistos de *Cryptosporidium* e cistos de *Giardia* ao se variar a espessura da camada filtrante a taxa de filtração.

4.1.2 - Estrutura e funcionamento do filtro lento em escala piloto

Os experimentos foram feitos utilizando três colunas em escala piloto com altura de 90 centímetros e diâmetro interno de 8,5 centímetros. As colunas foram chamadas de Filtro Lento de Areia (FLA) 1, 2 e 3. A adoção do diâmetro de 8,5 centímetros foi baseada nas recomendações para redução do efeito das paredes. Segundo Ives (1966a, 1966b *apud* Di Bernardo, 2003) o diâmetro da coluna deve ser pelo menos 50 vezes o diâmetro do maior

grão de areia do meio filtrante para minimizar a ocorrência de escoamentos preferenciais entre o meio e a parede da coluna. Além disso, optou-se por uma coluna com seção de área reduzida de modo a diminuir a vazão e, portanto, o volume de água a ser captado e armazenado. As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam o croqui da instalação piloto indicando todos os componentes e a instalação piloto real, respectivamente.

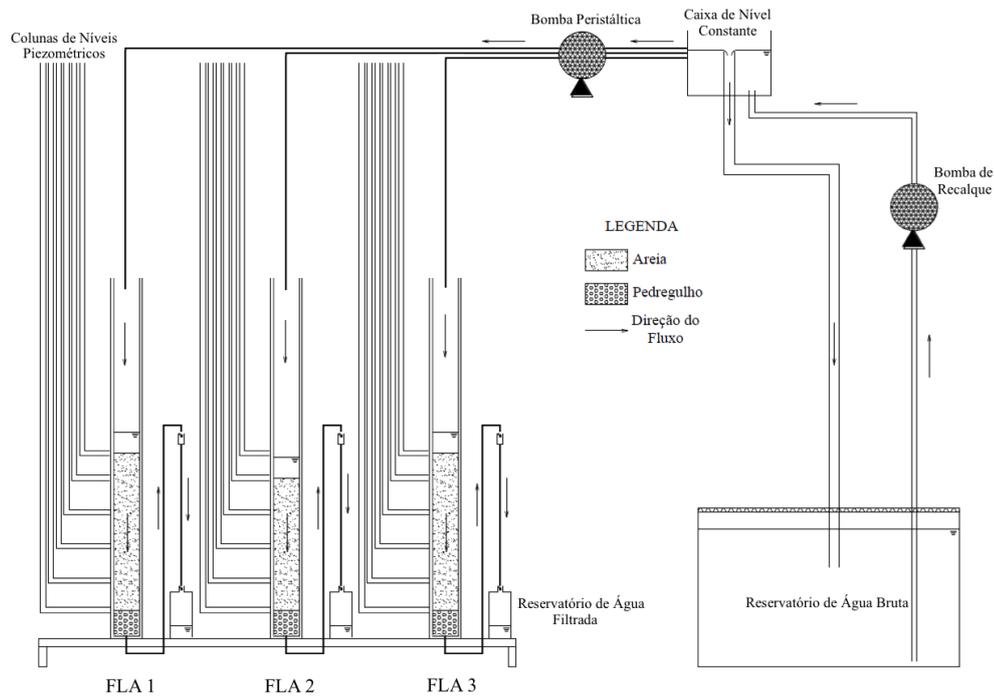


Figura 4.2 – Croqui da Instalação piloto.



Figura 4.3 – Instalação piloto.

Em cada coluna (Figura 4.3) havia uma camada de pedregulho de 6,5 centímetros de espessura no fundo, com a função de drenar e evitar que a areia obstruísse a tubulação de saída da água filtrada. Logo acima, colocou-se a camada filtrante de areia, que variou entre os valores de 35 ou 40 cm, a depender da etapa. Foram assegurados 5 centímetros de lâmina de água. As colunas foram cobertas ao longo da sua profundidade, a fim de evitar a proliferação de algas.

As colunas possuíam pontos de leitura de pressão para obtenção da perda de carga no meio filtrante. Os primeiros dois pontos para tomada de pressão estavam situados a uma profundidade de 3 e 10 centímetros a partir da superfície da camada de areia. Taira (2008) aponta a ocorrência de maior perda de carga na superfície do meio filtrante assim que os outros pontos de tomada de pressão foram situados a distâncias de 10 centímetro entre eles (Figura 4.4).

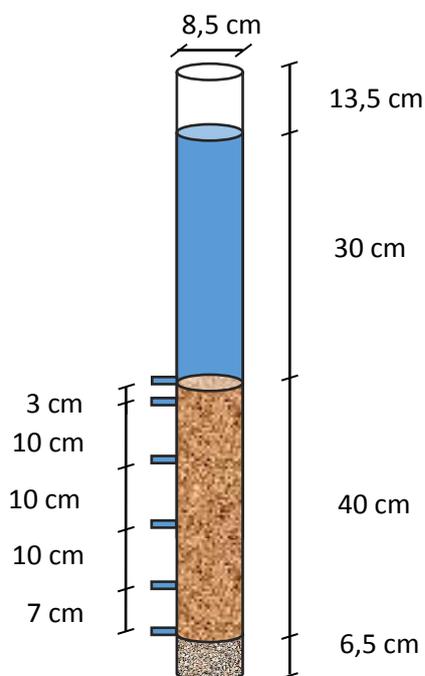


Figura 4.4 - Esquema da coluna de filtração lenta com detalhe de tomadas de pressão

A areia utilizada possuía diâmetro efetivo igual a 0,27 mm e CD igual a 1,85, de acordo com o recomendado pela OMS (1974) e outros autores. Fogel (1993) afirma que areias com coeficiente de desuniformidade (CD) altos podem reduzir significativamente a eficiência dos filtros. A curva granulométrica da areia utilizada, assim como suas principais características, é apresentada na Figura 4.5.

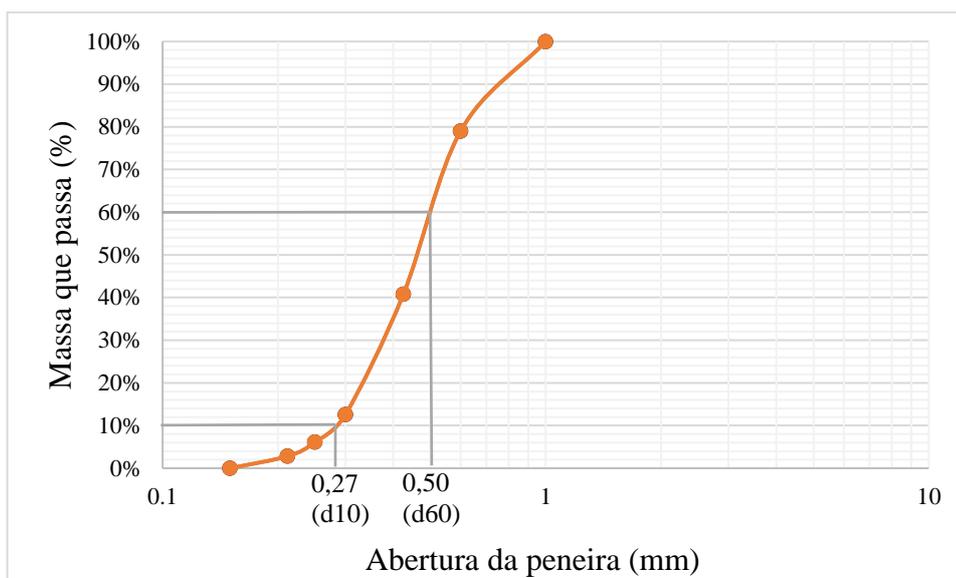


Figura 4.5 – Curva granulométrica da areia utilizada nos filtros lentos em escala piloto.

Como pode ser observado na Figura 4.2 e 4.3, as colunas filtrantes eram alimentadas paralelamente e de forma contínua com água bruta proveniente de um reservatório de volume de 250 litros. Uma bomba de recalque transferia a água do reservatório até a caixa de nível de água constante, que alimentava a bomba peristáltica, minimizando flutuações na vazão da mesma. O funcionamento da caixa permite que a água em excesso volte ao reservatório de alimentação. A bomba peristáltica, dotada de 3 cabeçotes, controlou a alimentação de modo que a vazão fosse igual para as três colunas - com exceção da etapa experimental com taxas diferentes (etapa I).

Após passar pelo filtro, a água era levada ao reservatório de água filtrada por um sistema de drenagem, que também permitiu que houvesse sempre uma coluna d'água acima do meio filtrante. Deste sistema, era coletada a água para a realização das análises de qualidade da água.

As análises de qualidade da água foram feitas, geralmente, a cada 2 dias. As amostras de água bruta e filtrada eram coletadas respeitando os tempos de detenção dos filtros. Cada taxa de filtração correspondia a uma vazão, calculada pela Equação 4.1, e cada vazão proporcionava um tempo de detenção, calculado mediante a Equação 4.2.

$$Vazão (m^3/h) = Taxa de Filtração (m/h) * Área da seção transversal (m^2) \quad (4.1)$$

$$Tempo de Detenção (h) = \frac{Volume do meio filtrante (m^3)}{Vazão (m^3/h)} \quad (4.2)$$

As espessuras e taxas distintas levam a tempos de detenção diferentes. A Tabela 4.2 mostra os tempos de detenção obtidos nas diferentes etapas de acordo com as equações 4.1 e 4.2.

Tabela 4.2 - Taxas de filtração, espessuras da camada filtrante e tempos de detenção na camada filtrante de cada etapa do estudo em escala piloto.

Etapa	Parâmetros	Filtro		
		FLA 1	FLA 2	FLA 3
Preliminar	Taxa de Filtração	0,1 m/h (2,4 m/d)	0,1 m/h (2,4 m/d)	0,1 m/h (2,4 m/d)
	Espessura da camada filtrante	40 cm	40 cm	40 cm
	Tempo de Detenção (h)	05:06	05:06	05:06
1	Taxa de Filtração	0,1 m/h (2,4 m/d)	-	0,2 m/h (4,8 m/d)
	Espessura da camada filtrante	40 cm	-	40 cm
	Tempo de Detenção (h)	05:06	-	02:33
2	Taxa de Filtração	0,1 m/h (2,4 m/d)*	0,1 m/h (2,4 m/d)*	-
	Espessura da camada filtrante	40 cm	35 cm	-
	Tempo de Detenção (h)	05:06*	04:36*	-

* As taxas de filtração, assim como os tempos de detenção, foram gradualmente modificadas ao longo do experimento, devido ao grau de obstrução do meio filtrante obtido na etapa II.

A água bruta, originada do córrego Cachoeirinha, foi coletada da Estação de Tratamento de Água do Paranoá, antes de passar pelo tratamento. As coletas foram feitas, geralmente, duas vezes por semana, na segunda e quinta-feira. Escolheu-se o córrego Cachoeirinha pois sua água possui valores de turbidez compatíveis com os recomendados para filtração lenta. Outros fatores relevantes foram a proximidade da Universidade de Brasília, onde os experimentos foram efetuados, e a facilidade de acesso ao local de coleta por se tratar de uma ETA da Companhia de Saneamento do Distrito Federal – CAESB (Figura 4.6).

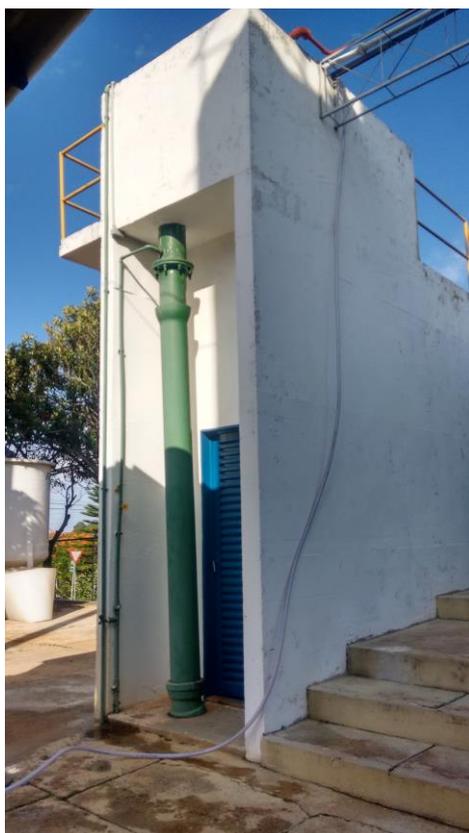


Figura 4.6 – Ponto de captação na ETA Paranoá - caixa de chegada de água bruta.

As análises da qualidade da água bruta e filtrada foram feitas seguindo as recomendações do Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (ALPHA, 2005) como demonstrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Métodos de determinação dos parâmetros de qualidade da água

Parâmetro	Método de determinação
Oxigênio dissolvido	Sensor eletroquímico
pH	Potenciométrico
Turbidez	Nefelométrico
Coliformes totais e <i>E.coli</i>	Substrato Cromogênico
Contagem de partículas	Contador de partículas

A contagem de partículas em diferentes faixas de tamanho foi utilizada como ferramenta para avaliação do potencial de remoção de oocistos de *Cryptosporidium* e cistos de *Giardia*. Devido à grande concentração de partículas da água, foi necessário diluir a amostra com

água deionizada na razão 1/10. Para cada análise eram feitas 4 medidas, sendo a primeira descartada e as demais consideradas, calculando a média dos valores de contagem obtidos. Mediram-se partículas de tamanho entre 2,5 e 150 µm, tentando focar nos tamanhos específicos dos cistos de protozoários.

4.1.3 - Etapas experimentais do estudo em escala piloto

O estudo em escala piloto foi dividido em três etapas: a Etapa Preliminar, Etapa I e Etapa II.

Etapa Preliminar – Montagem e Teste do Filtro em Escala Piloto

A Etapa Preliminar do experimento foi composta pela montagem da coluna filtrante, teste do funcionamento filtro em escala piloto e familiarização com os equipamentos, métodos de coleta e análise dos parâmetros físicos e microbiológicos.

Inicialmente, foi feita a lavagem e secagem da areia, para que pudesse ser peneirada e pesada. Selecionou-se a quantidade de areia de cada granulometria, a fim de gerar a curva granulométrica desejada. As areias de diferentes faixas granulométricas foram misturadas para que não houvesse estratificação do filtro.

Após a preparação da areia, os filtros foram montados com mesma espessura da camada filtrante, de 40 centímetros. A espessura do meio filtrante foi a mesma utilizada na etapa experimental seguinte, assim, não foi necessário alterar a espessura para a Etapa I. A areia foi colocada nas colunas cuidadosamente, a fim de evitar a retenção de ar no meio filtrante e nas colunas de nível piezométrico.

O filtro foi alimentado por fluxo ascendente sem expansão por 1 dia com água provinda da rede de abastecimento, para que bolhas de ar aprisionadas nos interstícios dos meios filtrantes fossem retiradas. A água utilizada neste procedimento era provinda da rede de abastecimento, possuindo cloro residual. Em seguida, iniciou-se a operação do filtros com a água do córrego Cachoeirinha, regulando-se a vazão da bomba para que fosse obtida a taxa de filtração desejada.

Foram feitas análises iniciais de turbidez, coliformes totais, *E. Coli*, oxigênio dissolvido e pH, a fim de conhecer os equipamentos. Após as atividades preparatórias, iniciou-se a Etapa I.

Etapa I – Ensaios para avaliação da taxa de filtração

A taxa de filtração pode influenciar diretamente na porcentagem de remoção que o filtro atingirá. Buscando-se obter porcentagem de remoção satisfatória com uma menor espessura da camada filtrante, foram testadas taxas de filtração baixas. As taxas foram escolhidas com base nas recomendações da literatura científica (Di Bernardo *et al.*, 1999; Haarhoff, 1991).

Nessa etapa foram utilizados o FLA 1 e FLA 3, operados com taxas de filtração de 0,1 e 0,2 m/h (2,4 e 4,8 m/d), respectivamente. As análises de qualidade da água afluente e efluente do filtro foram executadas 3 vezes por semana, em intervalos de 2 dias uma da outra. Os horários de coleta das amostras foram determinados de forma a respeitar os tempos de detenção de cada filtro.

Na água bruta, a variação dos parâmetros avaliados ocorreu de acordo com a variação natural da qualidade da água do córrego Cachoeirinha no ponto de captação da CAESB, aproximando a operação dos filtros das condições reais. Realizou-se análises de coliformes totais, *E. Coli* e turbidez. No final da etapa, também foi feita a análise com o contador de partículas, a fim de se familiarizar com o equipamento e medir a eficiência do filtro depois de seu início.

Etapa II – Ensaios para avaliação da espessura da camada filtrante

A avaliação da espessura da camada filtrante tem como intuito selecionar a menor profundidade possível nos protótipos, sem que haja comprometimento da qualidade da água produzida. Desse modo, simplifica-se o sistema, reduzindo os custos e tornando-o mais acessível.

A etapa II teve início no dia 29 de setembro, após a substituição dos primeiros centímetros de areia, onde a *schmutzdecke* se desenvolve, por areia limpa de mesma granulometria. O FLA 3 apresentou problemas e teve que ser desativado, restando na etapa II o FLA 1 e FLA 2, com espessura de meio filtrante igual a 40 e 35 centímetros, respectivamente. Como o FLA 2 possuía espessura diferente, recalculou-se o tempo de detenção do filtro para fazer as análises dos parâmetros de qualidade da água.

As espessuras utilizadas foram determinadas a partir da análise das profundidades onde pode se desenvolver atividade biológica. Conforme a Tabela 3.7, a maior parte dos

microrganismos pode ser encontrada em até 35 centímetros de profundidade. Assim, escolheu-se esse valor para testar sua remoção e também uma espessura de 40 cm para verificar variações na eficiência dos filtros.

Após a conclusão dos experimentos e a desativação das colunas, foi feita a análise microscópica de uma amostra da *schmutzdecke*, a fim de se reconhecer os microrganismos nela presentes. A amostra foi retirada cuidadosamente, tentando coletar somente os primeiros centímetros da camada filtrante, onde se encontra a *schmutzdecke*. O material coletado foi diluído, agitado e decantado para desprender o biofilme e os microrganismos da areia. A análise foi feita utilizando lâmina e lamínula, além da câmara de Sedgwick-Rafter. Foi utilizado aumento de 200 e 400 vezes

Os resultados obtidos na nessa etapa foram utilizados para o desenvolvimento dos protótipos.

4.2 – DESENVOLVIMENTO DOS PROTÓTIPOS

O desenvolvimento dos protótipos de filtros domiciliares baseados na filtração lenta foi feito visando unidades com custos baixos e simplicidade na estrutura. Considerou-se que essas unidades podem ser implementadas em larga escala por meio de políticas públicas, seja por meio de unidades pré-fabricadas ou montadas pela própria comunidade. O estudo tentou contemplar as diferentes realidades do meio rural, portanto, duas estruturas foram confeccionadas visando atender necessidades distintas: um para atender as necessidades mínimas de consumo domiciliar e o outro para abastecimento domiciliar de todos os usos da casa.

4.2.1 Concepção dos protótipos

A concepção do modelo de ambos filtros parte do aprofundamento da revisão bibliográfica sobre modelos de filtros lentos domiciliares existentes. Buscou-se uma definição das características básicas do filtro, como funcionamento e estrutura física, baseado no funcionamento hidráulico e no que se desejava da estrutura.

A fase seguinte teve como base os resultados obtidos na análise experimental e o estudo da fase I. Nela, elaboraram-se os croquis dos filtros propostos, especificando componentes da estrutura, materiais necessários e dimensões. Em seguida, baseando-se no projeto, os

protótipos foram construídos com os materiais especificados. A partir dos problemas enfrentados na confecção, buscou-se adaptar o projeto e fornecer alternativas.

Por fim, o funcionamento hidráulico dos protótipos foi testado, ajustando e medindo-se volumetricamente a vazão por 12 horas. Nessa fase, também foi verificada a estanqueidade da estrutura.

Um resumo do processo de desenvolvimento dos protótipos é apresentado na Figura 4.7.

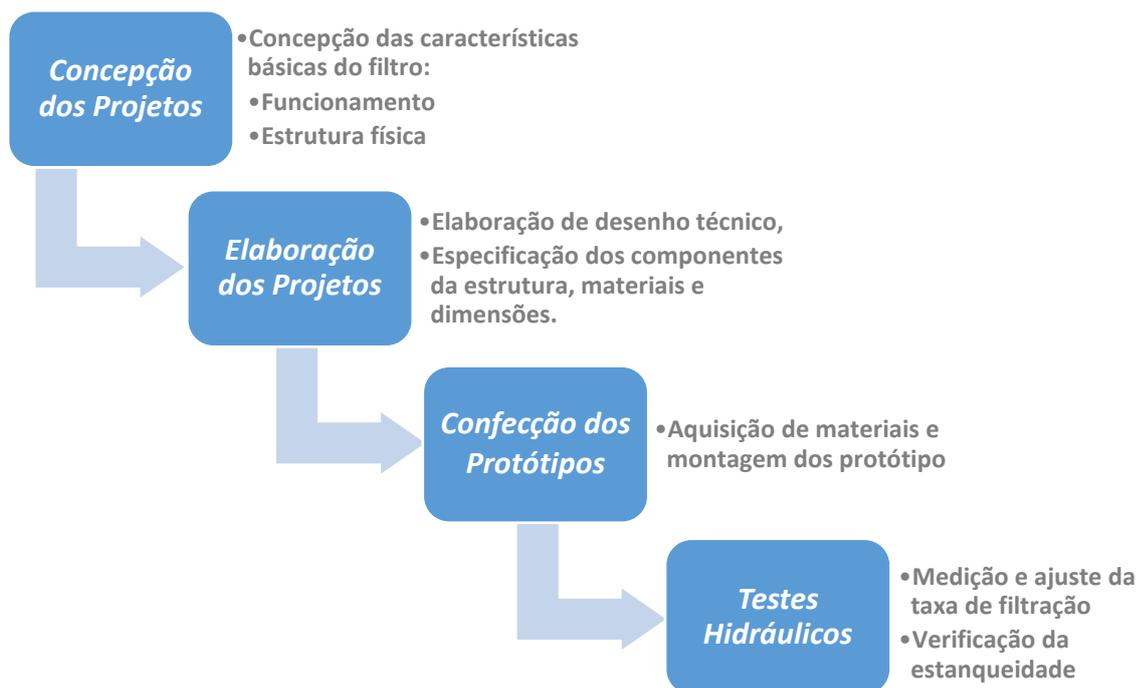


Figura 4.7 – Esquema das fases do desenvolvimento dos protótipos.

4.2.2 Filtro Raicam – Filtro domiciliar para abastecimento completo

Este protótipo visa ser um sistema de tratamento de água capaz de abastecer um domicílio, suprimindo toda a necessidade dos usos da água da casa. Desta forma, foi desenvolvido um filtro com capacidade de tratar 500 litros por dia, valor pouco abaixo do nível ótimo per capita de 100 l/dia se considerada uma família de 6 membros (Howard *et al.*, 2003; OMS, 2011). Neste caso, o per capita oferecido equivale a 79 litros por dia, e está acima do nível intermediário de abastecimento, segundo a OMS (2011).

Este filtro pode atender a população rural de forma condizente com o que dita a lei de saneamento básico (Brasil, 2007) e foi projetado visando a possibilidade de implementação

feita pelo estado ou por famílias que possuam condições de investimento para um sistema de tratamento de toda a água.

Escolheu-se a utilização de tubos de PVC pensando na facilidade de manusear e no peso da estrutura. As dimensões dos tubos utilizados foram calculadas de acordo com os resultados das etapas 1 e 2, quanto a espessura da camada filtrante e taxa de filtração.

Para avaliar a exequibilidade de montagem do filtro pela própria comunidade, o protótipo foi montado no laboratório pelas autoras deste trabalho. O modelo foi construído e testado hidráulicamente, averiguando sua eficácia e aplicabilidade. Nos resultados, apresenta-se a estrutura concebida e suas possíveis variações.

4.2.3 Filtro Momui – Filtro domiciliar para abastecimento básico

Visou-se desenvolver um filtro com menor capacidade de produção e alimentação intermitente para famílias que possuem acesso limitado à água. A Organização Mundial da Saúde (2011) define que o mínimo volume para hidratação e utilização na comida é de 7,5 litros por dia por pessoa. O objetivo, então, é tratar 60 litros diários necessários para uma família de 7 pessoas.

Novamente, optou-se por utilizar tubos de PVC para a confecção da estrutura física do filtro. Em sua concepção, objetivou-se uma estrutura que agregasse em uma única unidade todos os compartimentos do filtro: reservatório de água bruta, reservatório de água filtrada e meio filtrante. Além disso, buscou-se um modelo com simplicidade operacional.

Assim como o filtro de maior escala, esse filtro foi dimensionado de acordo com os resultados da avaliação experimental. Através da metodologia apresentada, chegou-se nos resultados apresentados a seguir.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente são apresentadas as Etapas I e II da análise experimental, ou seja, os resultados dos experimentos feitos com colunas filtrantes, denominadas FLA 1, FLA 2 e FLA 3. Em seguida, são expostos os resultados da concepção, montagem e teste dos protótipos de filtro lento.

5.1 - ANÁLISE EXPERIMENTAL

A Análise Experimental foi realizada com o objetivo de avaliar o comportamento de colunas filtrantes a partir da variação da taxa de filtração (Etapa I) e espessura da camada filtrante (Etapa II). O comportamento observado é demonstrado nos itens 5.1.1 e 5.1.2.

5.1.1 - Etapa I: avaliação da taxa de filtração

Nesta etapa foi avaliado o efeito da adoção de diferentes taxas de filtração sobre a eficiência de remoção de turbidez e coliformes. As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam respectivamente os resultados de turbidez residual e remoção de turbidez relativos ao FLA 1, operado com taxa de filtração de 0,1 m/h (2,4 m/d) e ao FLA 3, operado com taxa de 0,2 m/h (4,8 m/d), durante 14 dias.

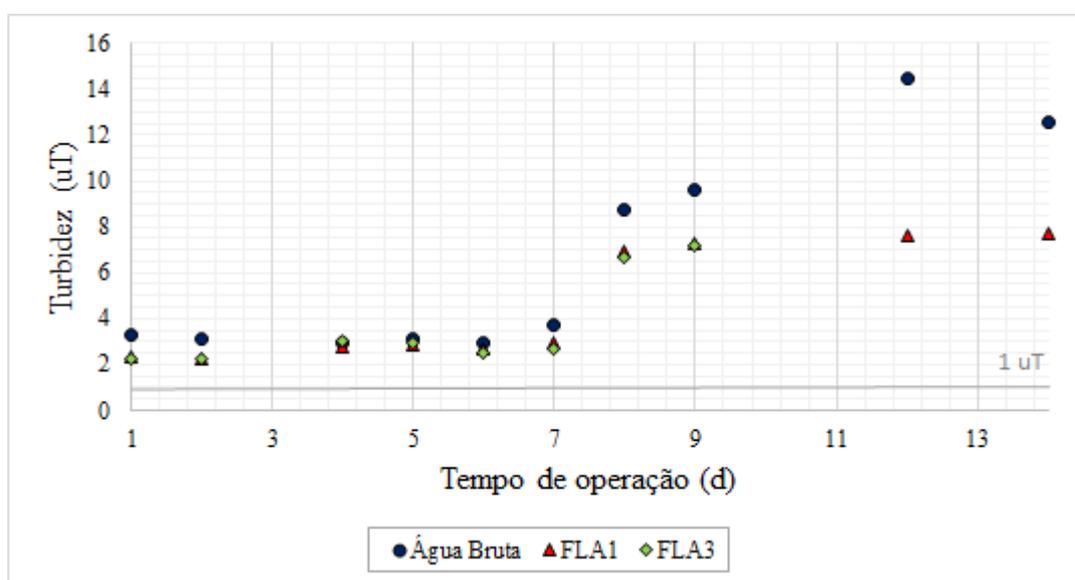


Figura 5.1 - Evolução da turbidez da água bruta e da água efluente dos filtros lentos de areia (FLA) na Etapa I (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 3 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,2 m/h ou 4,8 m/d).

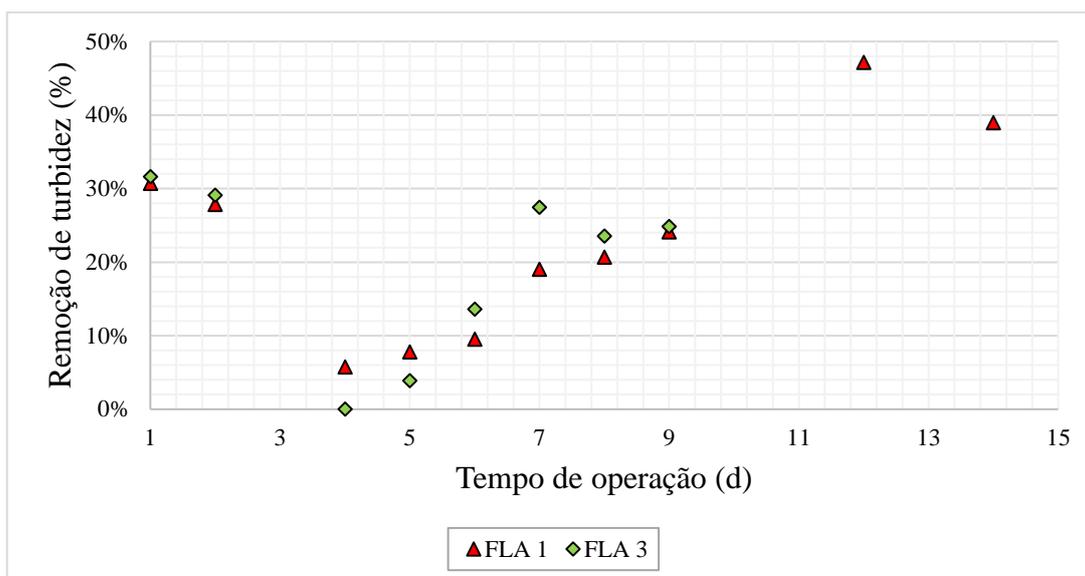


Figura 5.2 - Remoção da turbidez da água bruta e da água efluente dos filtros lentos de areia (FLA) na Etapa I. (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 3 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,2 m/h ou 4,8 m/d).

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram que a remoção de turbidez foi baixa durante o período de operação dos filtros, apresentando valores na faixa de 0 a 47,2%, com valores residuais sempre acima de 1 uT, não atendendo o valor de potabilidade determinado pela Portaria MS 2.914 (BRASIL, 2011). Após 9 dias de funcionamento, foi interrompida a operação do FLA 3 pois atingiu perda de carga máxima, indicando que para a qualidade da água bruta utilizada, a maior taxa prejudicava o funcionamento do filtro. Tal comportamento fez com que a Etapa I tivesse que ser encerrada antes que os filtros atingissem a maturidade da camada biológica. É importante ressaltar que os filtros começaram a operar com meio filtrante em condições próximas à esterilidade, havendo operado durante 1 dia na etapa preliminar com água proveniente do córrego Cachoeirinha. Esta condição do meio filtrante fez com que fosse necessário um tempo maior para o desenvolvimento da *schmutzdecke*.

A rapidez do aumento da perda de carga pode ter ocorrido devido às características da água bruta, como excesso de manganês, ferro, ou matéria orgânica, fatores que causam maior obstrução do meio filtrante (Di Bernardo *et al.*, 1999). No 12º dia de operação, avaliou-se a quantidade de ferro na água bruta para verificar se ela apresentava teores que promovessem a obstrução do meio filtrante. Encontrou-se 0,198 mg/l na água bruta e 0,111 mg/l na água bruta filtrada com membrana 45 micrômetros, valores dentro do recomendado por Di Bernardo *et al.* (1999) e Cleasby (1991), indicando que possivelmente este não foi o fator

determinante para a obstrução do filtro. Foi feita somente uma análise de ferro, portanto essa possibilidade não foi descartada por completo, embora seja pouco provável.

No nono dia, último dia de funcionamento do FLA 3, a remoção de turbidez foi de 24% para ambos os filtros, diferenciando-se apenas por casas decimais. Como o período de duração da Etapa I foi reduzido, não foi possível comparar as taxas de remoção com os filtros mais amadurecidos. Entretanto, é possível observar que com a influência do aumento da turbidez na água bruta, a partir do 8º dia de operação, houve uma tendência de melhora na eficiência de remoção de turbidez.

Bellamy *et al.* (1985a), em seu experimento com filtração lenta, encontraram remoções de turbidez de magnitude semelhante, entre 27% e 39%, para taxas de 0,96, 2,88 e 9,60 m/d, respectivamente 0,04, 0,12 e 0,4 m/h. Os autores atribuíram as baixas remoções de turbidez encontradas à presença de argila, partículas menores que 6,35 µm, na água bruta. A contagem de partículas realizada na água bruta no final dos experimentos da Etapa I, coincidindo com o dia ativação do FLA 2 em preparação para a Etapa II, apresentou os resultados demonstrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Contagem de partículas menores que 6 µm em comparação com o total de partículas e eficiência de remoção (14º dia de operação para o FLA1, 1º dia de operação para o FLA 2).

Diâmetro	Número de partículas / mL na água bruta	Remoção de partículas	
		FLA 1	FLA 2
< 150 µm	24462	84,6 %	76 %
< 6 µm	23518,7	85,4 %	77,9 %

A Tabela 5.1 mostra que 96% das partículas da água bruta eram menores que 6 µm. Apesar de ser a maior parte da amostra, as partículas menores foram removidas pelos filtros, atingindo remoções de até 85,4%. Portanto, não se pode afirmar que as partículas efetivamente influenciaram as baixas taxas de remoção de turbidez, ou se esse fato ocorreu devido à baixa maturidade da *schmutzdecke*.

Apesar da análise demonstrada na Tabela 5.1 se referir ao primeiro dia de operação do FLA 2, a porcentagem de remoção das partículas neste filtro foi bastante elevada. Este fato

demonstra que a remoção é influenciada pela maturidade, porém não depende estritamente da mesma.

Análises de coliformes totais e *Escherichia coli* dos efluentes dos filtros foram feitas a fim de avaliar esse indicador de presença de patógenos na água. Os resultados obtidos para esses parâmetros na Etapa I são apresentados na Tabela 5.2 e nas Figuras 5.2 e 5.3. Importante mencionar que a remoção de coliformes, juntamente com a turbidez, são indicadores da maturidade biológica dos filtros.

Tabela 5.2 - Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão dos dados de coliformes totais e *E. coli*. no afluente e nos efluentes dos filtros na Etapa I (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 3 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,2 m/h ou 4,8 m/d).

Parâmetro	Amostra	Máximo	Mínimo	Média*	Desvio Padrão*
Coliformes Totais (NMP/ 100 ml)	Água Bruta	>2419,6	261,3	663,0	842,9
	FLA 1	387,3	41,0	149,7	125,9
	FLA 3	435,2	28,5	136,0	147,6
<i>E. coli</i> (NMP/ 100 ml)	Água Bruta	214,2	31,3	82,9	52,7
	FLA 1	77,1	7,5	26,9	21,6
	FLA 3	79,4	9,7	29,5	23,5

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

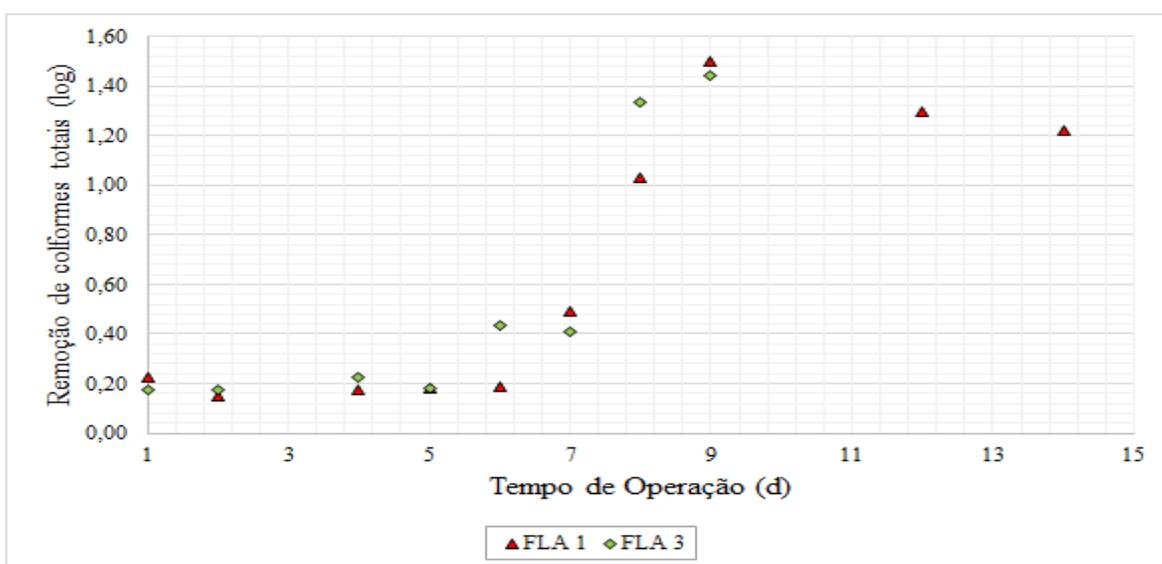


Figura 5.3 - Remoção de Coliformes Totais na Etapa I (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 3 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,2 m/h ou 4,8 m/d).

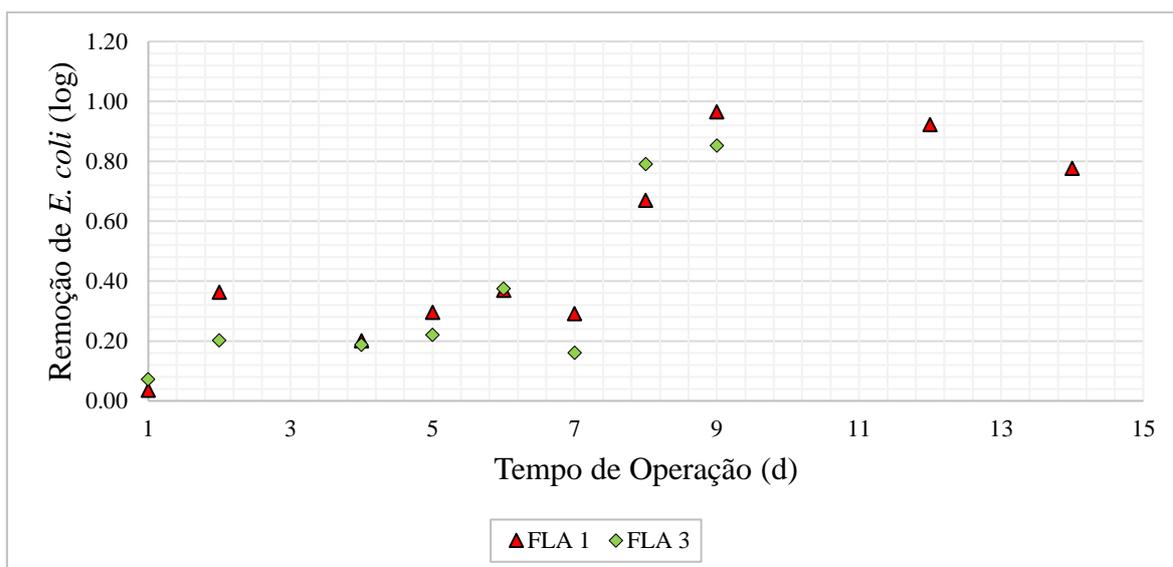


Figura 5.4 - Remoção de *E. coli* na Etapa I (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 3 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,2 m/h ou 4,8 m/d).

A Tabela 5.2 apresenta uma síntese dos valores obtidos para coliformes totais e *E. coli* no FLA 1 e FLA 2 nesta etapa. Os maiores valores obtidos foram >2419,6 NMP/100 ml, ultrapassando o valor máximo detectável pelo método. Para adequar a amostra aos limites de detecção do método, seria necessário diluir a amostra. Como a diluição não foi realizada, não foi quantificada a provável concentração de coliformes totais. Portanto, a porcentagem de remoção obtida está subestimada, já que a quantidade de coliformes na água bruta foi maior que a apresentada.

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram a relação do tempo de operação dos filtros com a remoção de coliformes. As remoções iniciais para coliformes totais (Figura 5.3) foram em torno de 0,20 log, ou seja, apenas 40%, sendo o valor mínimo atingido de 0,15 log (29,40%), para o FLA 1. Com o passar do tempo, a eficiência chegou a 1,5 log, ou 96,8%, o que representa uma melhoria de 53,8% na remoção. A remoção de *E. coli* (Figura 5.4) foi mais baixa que a de coliformes totais, ficando abaixo de 1 log durante a operação dos filtros.

A partir do oitavo dia de operação, a eficiência de remoção do filtro aumentou tanto para coliformes totais quanto para *E. coli*. Esta data coincide com o aumento da turbidez da água bruta, mostrado na Figura 5.1. Este fenômeno pode ter ocorrido devido a relação direta entre a turbidez e a presença de nutrientes, matéria orgânica e organismos na água bruta, já que a *schmutzdecke* depende da presença destes elementos na água para se desenvolver inicialmente. A "boa" qualidade da água bruta, representada pelos baixos valores de turbidez

apresentados nos primeiros dias, possivelmente retardou o amadurecimento biológico dos filtros.

Os valores de remoção de coliformes obtidos ficaram abaixo do reportado em diversas pesquisas com filtros lentos, como demonstrado na Tabela 3.3. Os autores (Bellamy *et al.*, 1985a; Cleasby *et al.*, 1984, Devi *et al.*, 2008; Murtha e Heller, 2003) relatam valores sempre maiores que 99% de remoção de coliformes totais, porém esses dados foram reportados após os filtros terem sido operados por períodos consideravelmente superiores, em que a *schmutzdecke* se apresentava mais desenvolvida.

Como o objetivo dos experimentos é testar filtros com espessura do meio filtrante reduzida, optou-se pela taxa mais baixa, adotada no FLA 1, para garantir a eficiência mesmo com espessuras menores. Além disso, descartaram-se as condições operacionais encontradas no FLA 3 (taxa de 0,2 m/h ou 4,8 m/d) por apresentar problemas de perda de carga excessiva. Concluiu-se na Etapa I que a melhor taxa para prosseguir com os experimentos era a de 0,1 m/h (2,4 m/d), pois forneceu a remoção dos parâmetros de interesse mantendo as perdas de carga em patamares mais adequados.

5.1.2 - Etapa II: Avaliação da Espessura da Camada Filtrante

Na Etapa II, foram testados de filtros FLA 1 e FLA 2 com meios filtrantes de espessura de 40 e 35 centímetros, respectivamente, operados inicialmente com taxa de filtração de 0,1 m/h (2,4 m/d).

O FLA 2 teve sua operação iniciada 3 dias antes do FLA 1, que já havia sido operado na Etapa I. Isso fez com que o FLA 1 já possuísse uma comunidade biológica ao longo da espessura do seu meio filtrante, mesmo com a retirada da *schmutzdecke* e reposição por uma areia limpa. Essa comunidade pode acelerar a colonização da nova areia, o que favoreceria o FLA 1. Portanto, o início antecipado do FLA 2 possibilitou uma colonização prévia dele, colocando os filtros em condições mais próximas de maturidade biológica. Devido a este fato, os valores do FLA 1 começam a partir do quarto dia de operação do FLA 2 nos gráficos apresentados neste item.

A maturidade atingida mais rapidamente na Etapa II pode ser atribuída pela composição da água bruta, que era provinda do córrego cachoeirinha e possuía variações na sua qualidade.

Na segunda etapa, a turbidez inicial da água bruta foi maior que no início da primeira etapa. Isso pode ter favorecido o desenvolvimento da *schmutzdecke*.

Outro aspecto que caracterizou esta etapa foi a elevada perda de carga atingida rapidamente pelos filtros. O FLA 1 atingiu a lâmina d'água máxima permitida pela coluna, de 50 centímetros, no 13º dia, enquanto o FLA 2 atingiu sua lâmina d'água máxima, de 55 centímetros devido a menor espessura de camada filtrante, no 7º dia de operação. Assim como na Etapa I, há incertezas sobre o motivo taxa elevada de aumento da perda de carga, que pode ter sido causada por diferentes características da água bruta, citadas no item 5.1.2.

Optou-se por avaliar a eficiência dos filtros pelo maior tempo de operação possível, estendendo a carreira de filtração mediante um sistema de drenagem de água excedente. Inicialmente, os filtros eram operados com taxa constante e carga variável. Conforme a obstrução do meio filtrante aumentava, e as perdas de cargas máximas eram atingidas, observava-se uma redução da vazão que passava pelos filtros, diminuindo, portanto, a taxa de filtração. A partir do 14º dia de operação do FLA 1 e do 8º dia de operação do FLA 2, os filtros foram operados com carga hidráulica constante e taxa variável. Para acompanhar a variação da taxa de filtração que efetivamente estava ocorrendo meio filtrante, mediram-se os valores de vazão efluente dos filtros. Os resultados de taxa de filtração são mostrados na Figura 5.5.

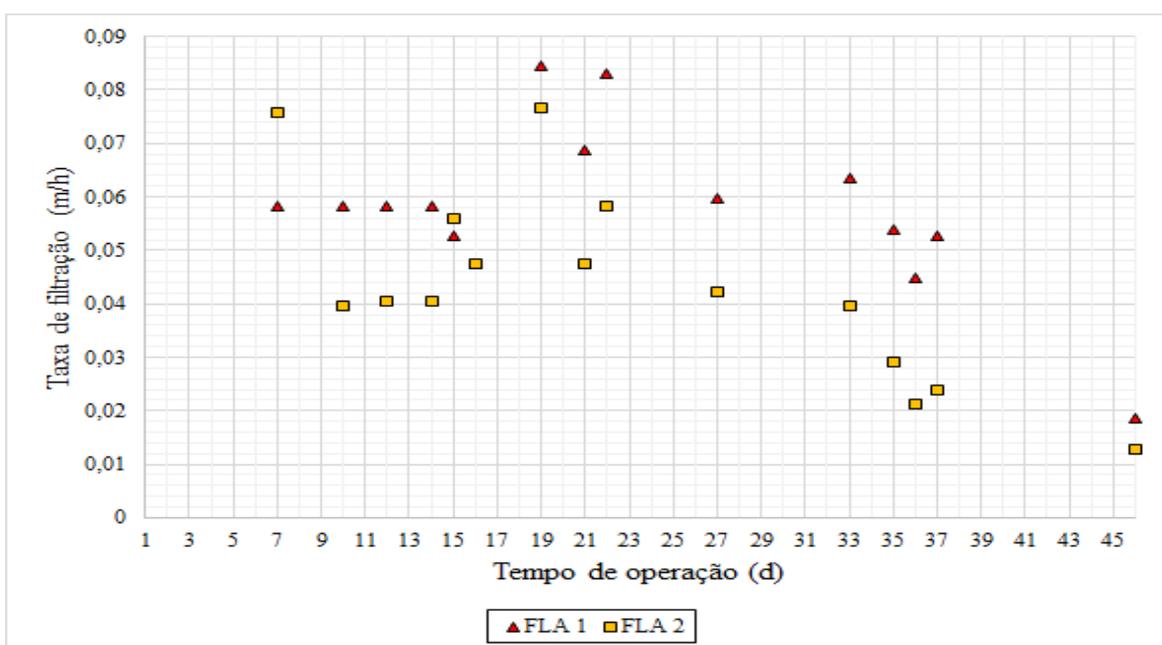


Figura 5.5 - Taxa de filtração ao longo da Etapa II (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).

A vazão de entrada do filtro, para manter a taxa de 0,1 m/h (2,4 m/d) obtida na Etapa I, foi inicialmente de 9,5 ml/min. Conforme o filtro foi sendo colmatado, identifica-se a variação na vazão do efluente dos filtros, e conseqüentemente na taxa de filtração. A Figura 5.5 mostra que mesmo após atingir cargas constantes, as taxas dos filtros variaram. A alteração das taxas ocorre devido a obstrução do meio filtrante, que depende da qualidade da água bruta e dos mecanismos de remoção.

É importante destacar que a variação da taxa interfere diretamente na eficiência dos filtros. Taxas menores tendem a promover maiores eficiências, como discutido no item 3.2.2.1. Esse fator influenciou nos resultados obtidos nessa etapa, como será demonstrado.

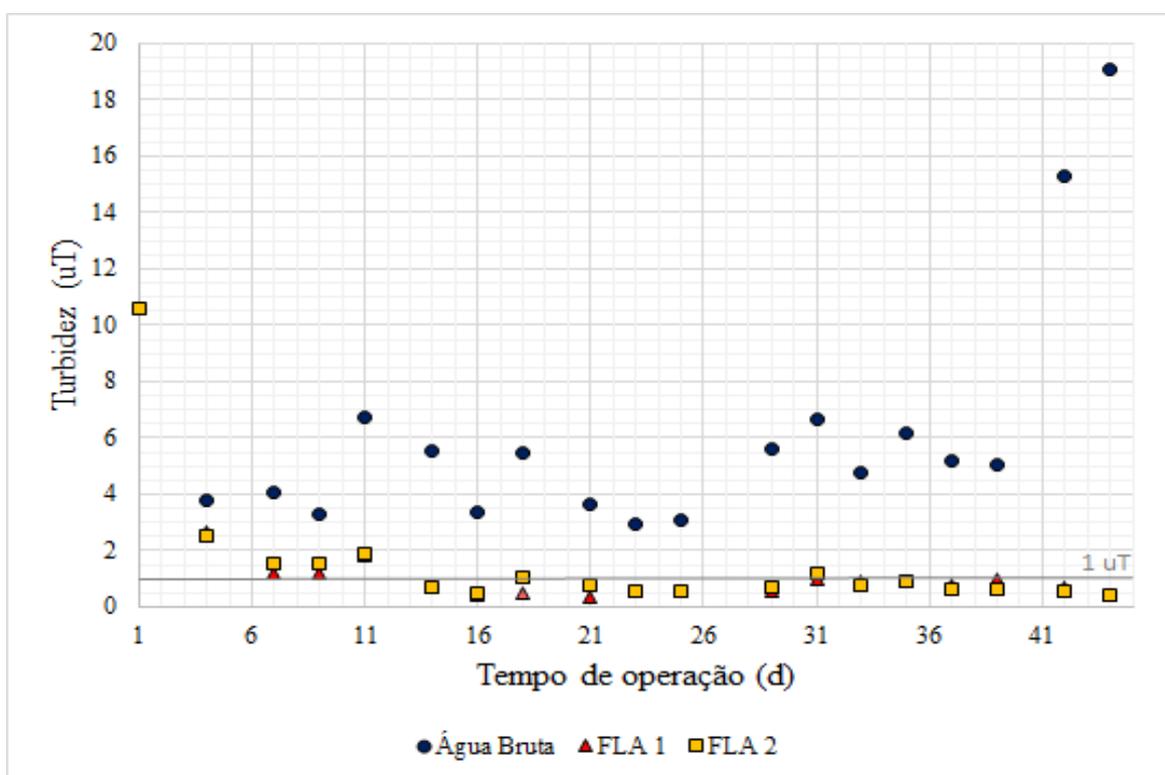


Figura 5.6 - Evolução da turbidez da água bruta e da água efluente dos filtros lentos de areia (FLA) na Etapa II (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).

A remoção de turbidez obtida na Etapa II foi superior à alcançada na Etapa I. Depois do período inicial de amadurecimento, após o 14º dia de operação os valores de turbidez da água filtrada estiveram predominantemente abaixo de 1 uT, como pode ser verificado na Figura 5.6. Após o 11º dia de operação, a água filtrada pelo FLA 1 não atingiu valores acima de 1 uT, enquanto que no FLA 2 ultrapassou esse valor apenas duas vezes, chegando a 1,04 uT no 18º dia e 1,16 uT no 31º dia.

Nota-se que nos últimos dias de filtração, a turbidez da água bruta esteve muito elevada. Esse fato ocorreu devido ao início do período de chuvas em Brasília, que causa um aumento natural na turbidez do córrego em que a água é captada. Mesmo com esses valores excessivos, os FLAs permaneceram eficientes em manter os valores de turbidez menores que 1 uT.

A porcentagem de remoção de turbidez ao longo da operação dos filtros mostrou tendência sempre crescente, se iniciando em cerca de 30%, mas chegando a atingir 97% nos dois filtros. Os valores de remoção de turbidez começaram a se estabilizar a partir do 14º dia. As maiores taxas de remoção foram alcançadas no final do período de operação, como resultado da maturidade biológica e da diminuição das taxas de filtração. Esses resultados reforçam a ideia da relação existente entre esses parâmetros.

Assim como na Etapa I, nesta etapa foram executadas análises da concentração de coliformes totais e *E. coli* na água bruta e filtrada. A Tabela 5.3 apresenta os valores máximos, mínimos e médios obtidos, além do desvio padrão para estes parâmetros.

Tabela 5.3 - Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão dos dados de coliformes totais e *E. coli*. no afluente e nos efluentes dos filtros na Etapa II (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 3 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).

Parâmetro	Amostra	Máximo	Mínimo	Média*	Desvio Padrão*
Coliformes Totais (NMP/ 100 ml)	Água bruta	>2419,6	686,7	1715,3	628,5
	FLA 1	648,8	<1	17,6	144,6
	FLA 3	260,7	<1	17,2	63,7
<i>E. coli</i> (NMP/ 100 ml)	Água bruta	260,3	55,5	125,5	49,8
	FLA 1	52,9	< 1,0	2,6	11,8
	FLA 3	25,6	<1,0	3,2	6,9

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

As concentrações máximas de coliformes totais da água bruta alcançaram valores superiores a 2419,6 NMP/100 ml, valor superior ao limite de detecção do método. Desta forma não se conhece a magnitude do valor real da concentração. Além disso, houve amostras que apresentaram valores de concentração abaixo do limite de detecção de 1 NMP/100ml.

Portanto, os valores de remoção de coliformes totais estão subestimados. Os valores de remoção obtidos para coliformes totais e *E. coli* estão apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8.

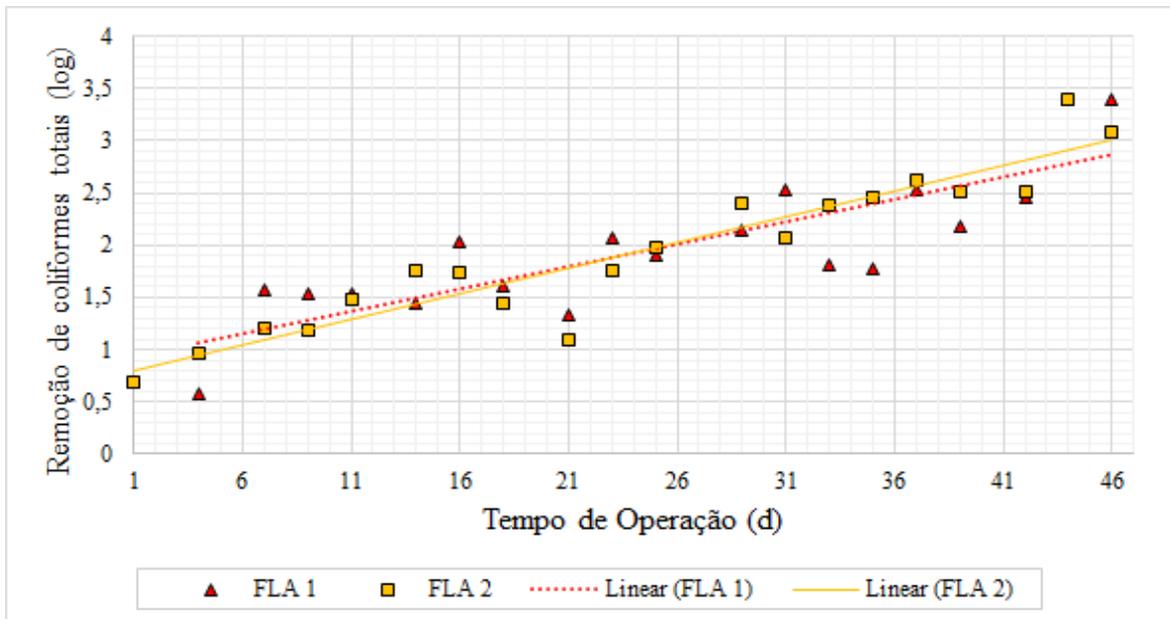


Figura 5.7 - Remoção de Coliformes Totais na Etapa II (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).

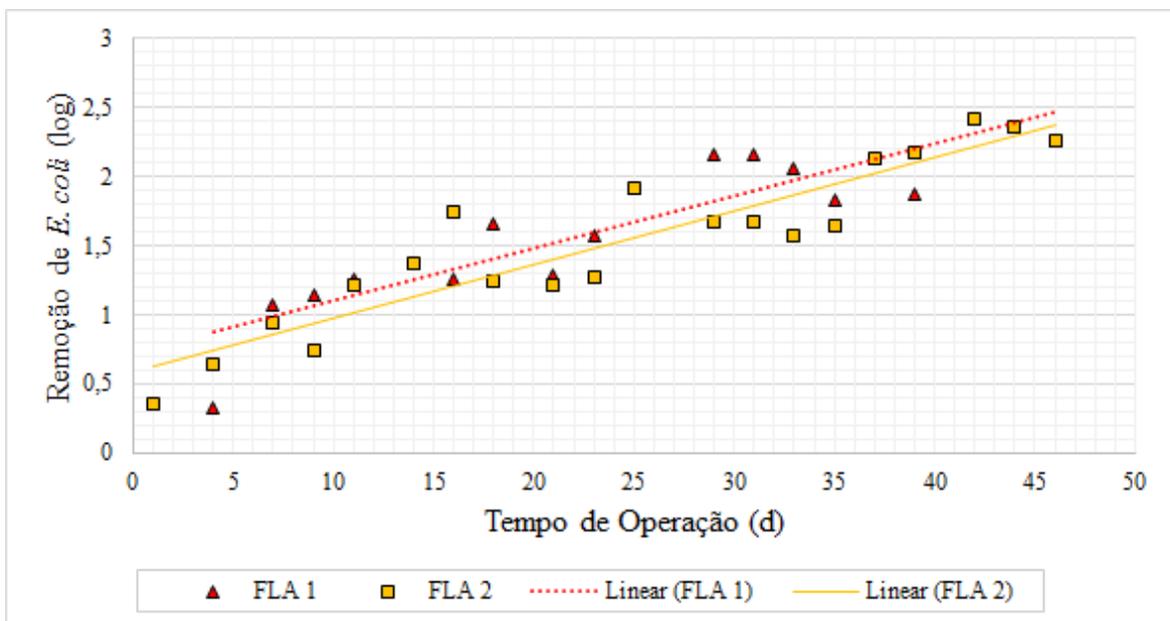


Figura 5.8 - Remoção de *E. coli* na Etapa II (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram uma tendência crescente de remoção de coliformes totais e *E. coli* com o passar do tempo de operação do filtro. A remoção de coliformes totais chegou a 3,38 log, 99,96%, tanto para o FLA 1 quanto para o FLA 2. As linhas de tendência mostradas

na Figura 5.7 indicam pequena diferença entre a remoção de coliformes totais do FLA 1 em relação ao FLA 2. Vale ressaltar que a redução da vazão, principalmente do FLA 2, também pode ter influenciado na remoção desse parâmetro, aumentando-a.

A remoção de *E.coli* atingiu 2,42 log, 99,62% para ambos os filtros, mantendo a tendência crescente como nos coliformes totais. Por permitir maior tempo para o amadurecimento da camada biológica, os filtros se mostraram ainda mais eficientes nessa etapa. Os resultados obtidos na Etapa II aproximam-se do encontrado na literatura (Tabela 3.3), ao contrário da etapa anterior, que atingiu resultados baixos de remoção. Esses resultados evidenciam a importância da maturidade do meio filtrante para a remoção de coliformes totais e *E. coli*.

Em geral, o FLA 1 mostrou-se mais eficiente na remoção de *E.coli* do que o FLA 2, enquanto o FLA 2 apresentou melhor desempenho quanto a remoção de coliformes totais, embora os valores atingidos sejam próximos, como demonstrado pelo ajuste linear do gráfico. Com a redução considerável da vazão do FLA 2, esperava-se que as remoções desse filtro fossem significativamente maiores, já que esse fator interfere na eficiência. Todavia, os resultados encontrados foram semelhantes para ambos filtros. Tal dado reforça a influência da espessura da camada filtrante na remoção dessas bactérias indicadoras de contaminação fecal.

Além de turbidez e coliformes, avaliou-se a remoção de partículas com o objetivo de verificar remoção de partículas do mesmo tamanho de oocistos de *Cryptosporidium* (4 a 6 μm) e de cistos de *Giardia* (8 a 12 μm), além de partículas menores que 150 μm . As remoções de partículas obtidas são apresentadas nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11

Devido à alta concentração de partículas, principalmente na água bruta, fez-se necessária a diluição da amostra na razão de 1/10, sendo uma parte de amostra e nove partes de água deionizada. A partir do vigésimo sexto dia, iniciou-se a análise do branco também, para observar a quantidade de partículas que não pertencem à amostra. Esse dado mostrou que havia uma quantidade considerável de partículas que estavam na própria água deionizada e nos frascos utilizados, alcançando um valor superior à metade da quantidade das partículas encontradas nos resultados finais. Essa contaminação pode ter ocorrido pela higienização deficiente da vidraria ou por falhas no equipamento de deionização da água. Desta forma, optou-se por subtrair o valor de partículas encontrado no branco aos valores de partículas obtidos nas amostras de água bruta, do FLA 1 e do FLA 2 de modo a minimizar o erro.

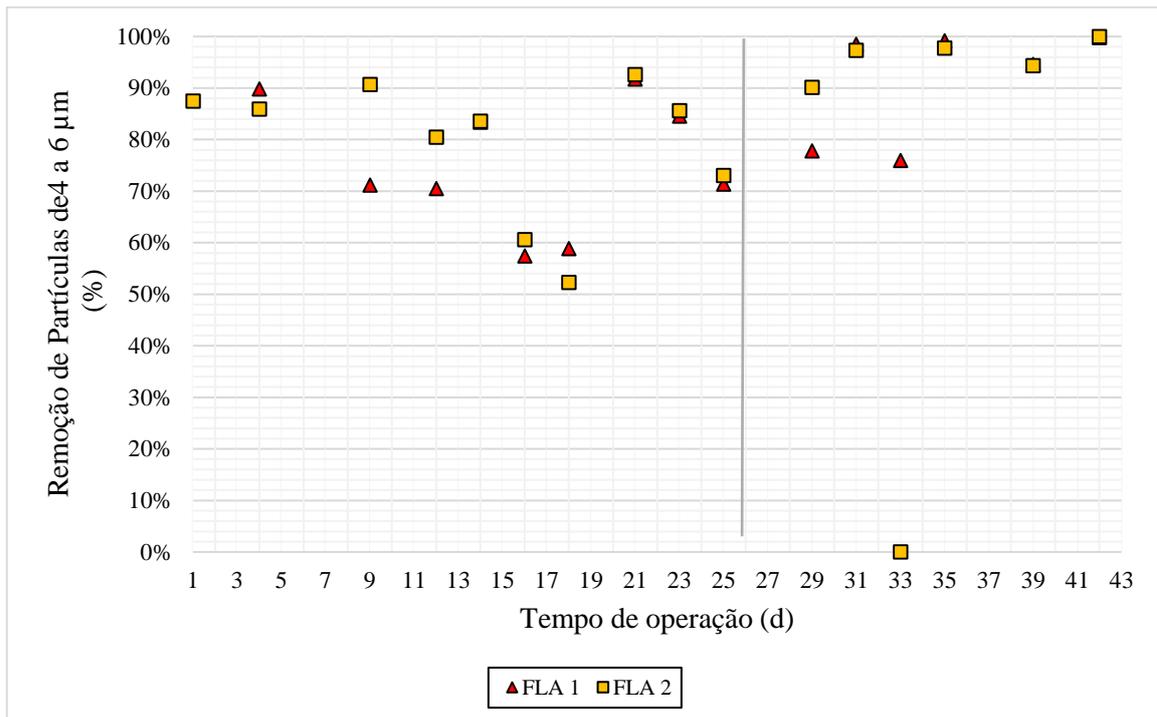


Figura 5.9 - Remoção de partículas de tamanho entre 4 a 6 μm, tamanho referente a oocistos de *Cryptosporidium* (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).

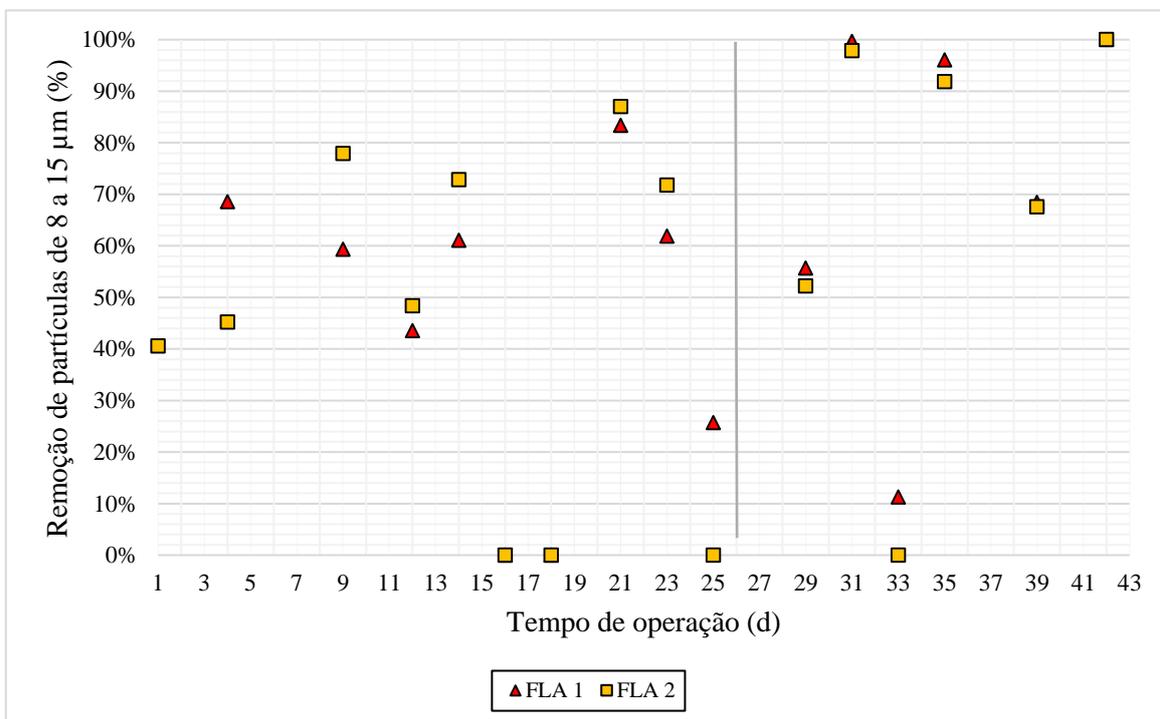


Figura 5.10 - Remoção de partículas de tamanho entre 8 a 15 μm, tamanho referente a cistos de *Giardia* (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).

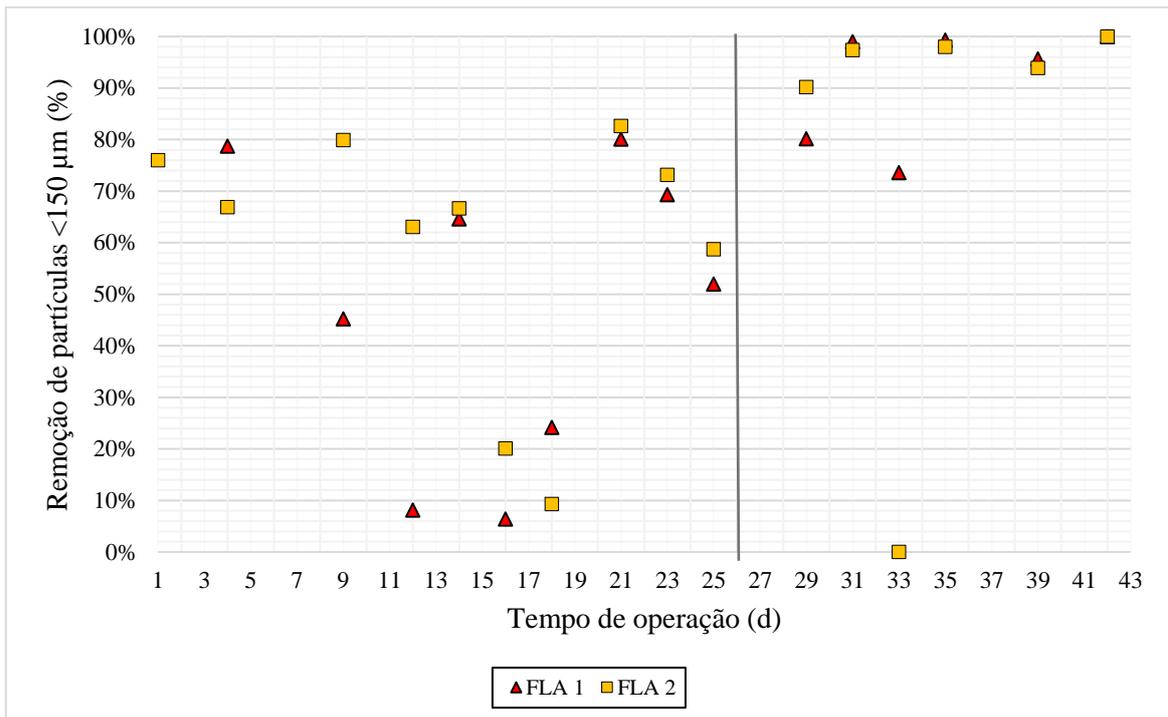


Figura 5.11 - Remoção de partículas menores que 150 µm (FLA 1 - espessura da camada filtrante: 40 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d; FLA 2 - espessura da camada filtrante: 35 cm, taxa de filtração: 0,1 m/h ou 2,4 m/d).

Outro fator que demonstra a inconsistência dos dados obtidos é a existência de remoções negativas (que foram substituídas pelo valor 0%) e remoções acima de 100% (que foram substituídas pelo valor 100% no gráfico) (Figura 5.9, 5.10 e 5.11). Esse dado indica que os resultados coletados podem não representar fielmente a remoção de partículas. Além disso, os valores de remoção de partícula não foram tão elevados quanto os de remoção de turbidez. Os valores de turbidez dos efluentes estiveram constantemente abaixo de 1 uT a partir do 14º dia de operação, independentemente do aumento dos valores de turbidez da água bruta. Já os resultados de remoção de partículas na água oscilaram nesse mesmo período, não demonstrando a mesma eficiência que a remoção de turbidez, apesar de ambas apresentarem tendências crescentes de remoção.

Tanto para as partículas menores que 150 µm, quanto para as partículas de 4 a 6 µm, o FLA 1 se sobressaiu em seu desempenho no final do experimento (Figura 5.9 e 5.11). Nota-se que a partir do dia em que o valor do branco é levado em conta para o cálculo da eficiência, as remoções de partícula aumentam consideravelmente. O valor de remoção chegou a atingir 100% para ambos os filtros nos últimos dias dos experimentos, indicando a eficiência da filtração lenta para remoção de oocistos de *Cryptosporidium*. Esse dado corrobora com o encontrado na literatura, apresentado na Tabela 3.3. Não foi possível encontrar coerência na

evolução da eficiência de remoção de partículas do tamanho de cistos de *Giardia* (de 8 a 15 μm). Os valores obtidos oscilaram consideravelmente, indicando possíveis problemas na análise.

Os resultados dos parâmetros analisados na Etapa II apontam a maior eficiência dos filtros em relação a Etapa I. Como a Etapa II teve maior duração, conseguiu-se atingir maior maturidade da *schmutzdecke*, o que refletiu nos resultados obtidos. Os resultados da Etapa II foram semelhantes para o FLA 1 e FLA 2 em relação à maioria dos parâmetros, exceto para coliformes, onde o FLA 1 se sobressaiu. Entretanto, mesmo com resultados próximos, deve-se ter cautela ao comparar os filtros, já que o FLA 2 apresentou vazão de saída menor que o FLA 1, o que pode ter contribuído com sua eficiência. Se ambos tivessem a mesma vazão de saída, o FLA 2 possivelmente apresentaria eficiência menor que o FLA 1. Devido a esse fator, e a perda de carga atingida mais lentamente, optou-se pela espessura maior, de 40 centímetros, para a elaboração dos protótipos, a fim de manter uma faixa de segurança.

5.1.3 - Análise da Camada Biológica

A fim de identificar os microrganismos que colonizaram o filtro, foi feita a análise microscópica de uma amostra retirada da *schmutzdecke*, coletada ao final da Etapa II. A análise demonstrou a ocorrência de um denso biofilme de matéria amorfa, composto principalmente por bactérias e matéria orgânica. Além disso, foram observadas algas e zôoplancton na amostra coletada. Alguns microrganismos registrados são apresentados na Figuras 5.12.

Entre os microrganismos encontrados, considera-se a presença de diatomáceas na amostra (Figura 5.12b) como um dado relevante, visto que esses organismos podem colmatar filtros lentos. A obstrução pode ocorrer devido a presença de sílica em sua estrutura, material que não se decompõe (Taira, 2008). Esse fato pode ter contribuído para o rápido crescimento da perda de carga atingida, diminuindo o tempo de carreira dos filtros.

Encontrou-se algumas carapaças de organismos que não estavam mais vivos (Figura 5.12b e 5.12c), sugerindo que o tempo em que o filtro parou de ser operado antes da coleta da amostra (3 dias) pode ter alterado os resultados e diminuído a quantidade de microrganismos encontrados. Isso indica que a interrupção da operação dos filtros por longos períodos pode diminuir a eficiência deste, já que a *schmutzdecke* começa a perecer.

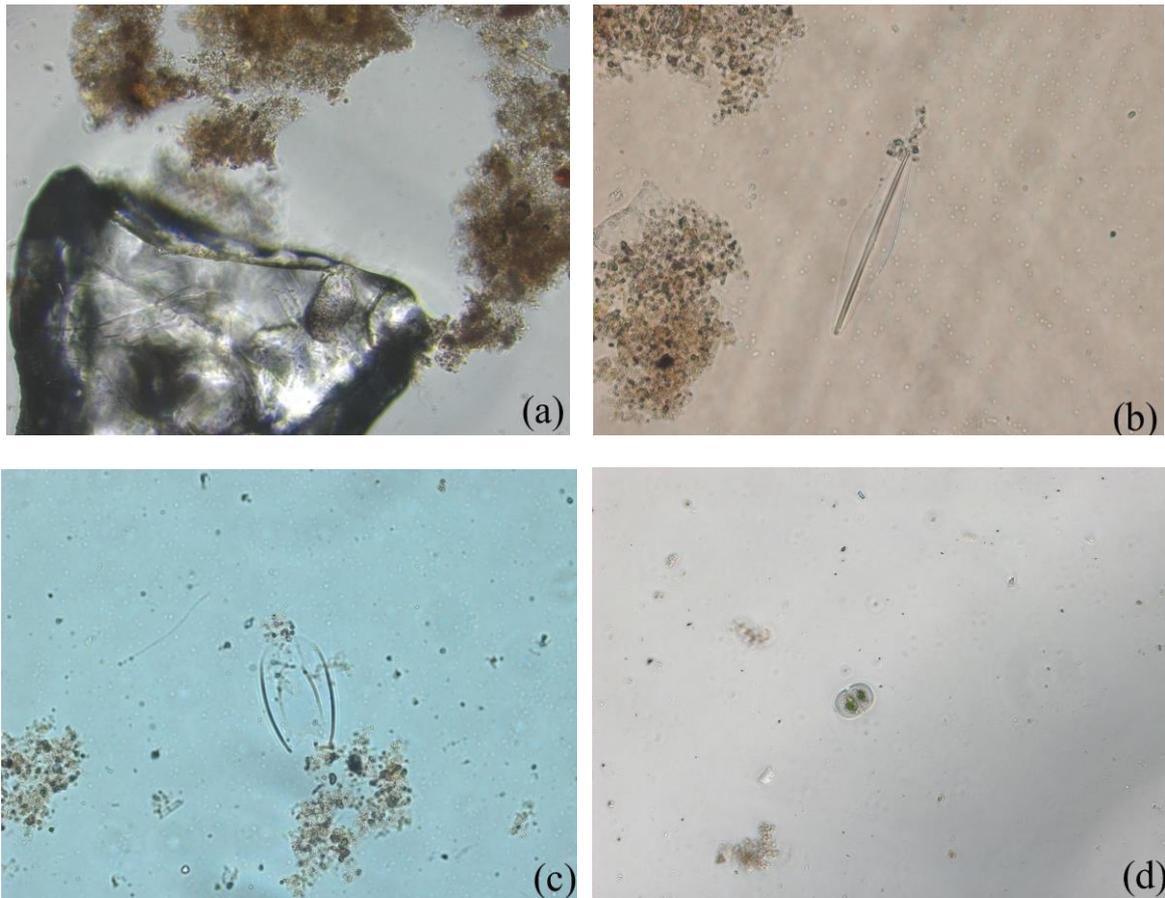


Figura 5.12 - Imagens da *schmutzdecke*: (a) Grão de areia e denso biofilme de matéria amorfa encontrado na amostra da *schmutzdecke* do FLA 1. Aumento de 200 vezes. (b) Frústula de Diatomácea (Bacillariophyta) encontrada na amostra da *schmutzdecke* do FLA 1. Aumento de 400 vezes. (c) Carapaça de um Zôoplanctons encontrado na amostra da *schmutzdecke* do FLA 1. Aumento de 200 vezes. (d) *Cosmarium* sp visto em amostra da *schmutzdecke* do FLA1. Aumento de 200 vezes.

5.2 - PROTÓTIPOS

O objetivo geral do trabalho foi propor dois protótipos filtros lentos de escalas diferentes para atender as necessidades de tratamento de água para uso domiciliar do meio rural. A partir dos resultados obtidos na análise experimental, e após análise dos filtros existentes e da diversidade de realidades vivenciadas nos domicílios rurais, chegou-se a proposta apresentada, com os filtros Raicam, de maior escala e Momui, de menor escala.

5.2.1 - Filtro Raicam

O filtro Raicam foi pensado para tratar, diariamente, o volume de água capaz de suprir toda a demanda domiciliar (água para beber, cozinhar, higiene pessoal, lavagem de louças, limpeza básica do domicílio), que é o cenário almejado. Visou-se construir um modelo que fosse aplicável a realidade rural e eficiente no tratamento da água. Para isso, foi desenvolvido

este sistema de filtração onde a unidade filtrante, composta por um módulo cilíndrico, é integrado ao reservatório de água filtrada, minimizando os riscos de contaminação dessa água. A concepção proposta pode ser vista na Figura 5.13

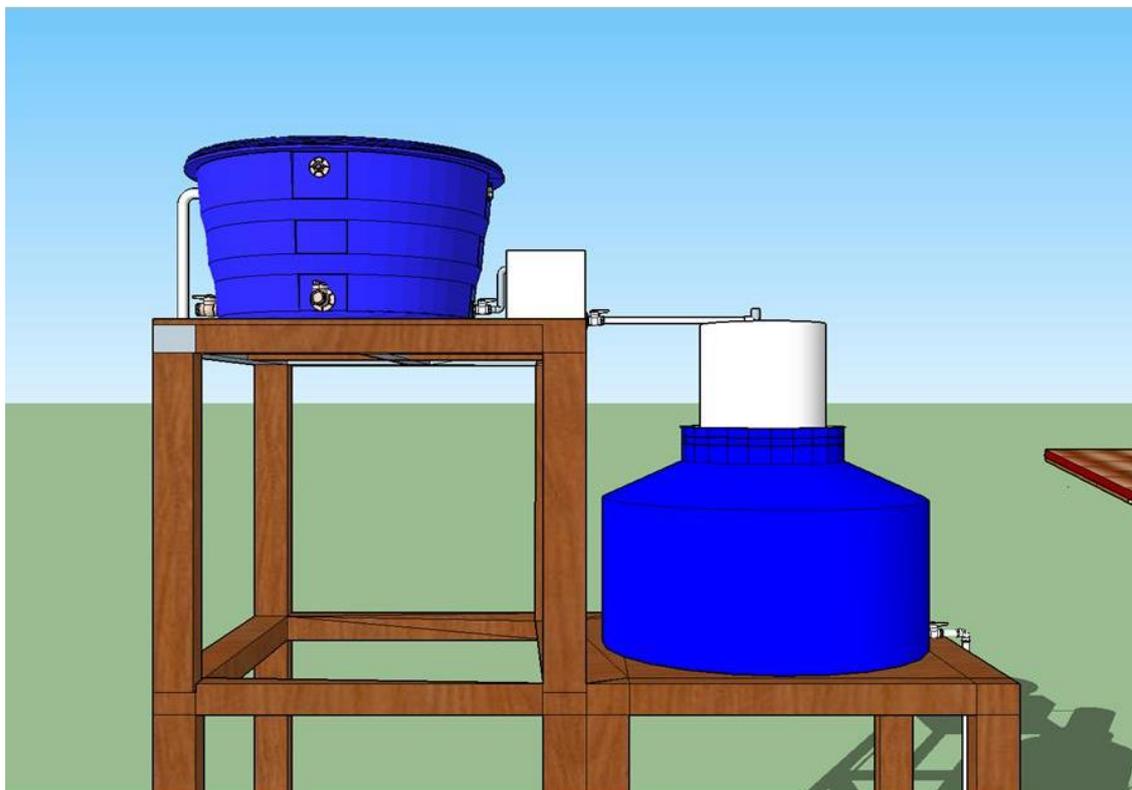


Figura 5.13 - Arranjo do sistema de filtração com unidade filtrante inserida dentro do reservatório de água filtrada.

Apesar da configuração proposta na Figura 5.13 ser considerada a melhor forma de uso da unidade filtrante, é possível utilizar a estrutura como um módulo separado do reservatório de água filtrada ou até mesmo em paralelo com outras unidades para atingir uma produção maior de água. A unidade foi desenvolvida para tratar aproximadamente 500 litros por dia, produzindo 79 litros per capita, considerando uma família de 6 pessoas. O sistema proposto é apresentado nos itens que se seguem.

5.2.1.1 - Estrutura do filtro

O filtro Raicam é um sistema composto por um reservatório de água bruta (a), uma caixa de nível constante (b), a unidade filtrante (c) e o reservatório de água filtrada (d), devidamente sinalizados na figura 5.14. Os componentes utilizados e suas quantidades estão detalhados no Apêndice A.

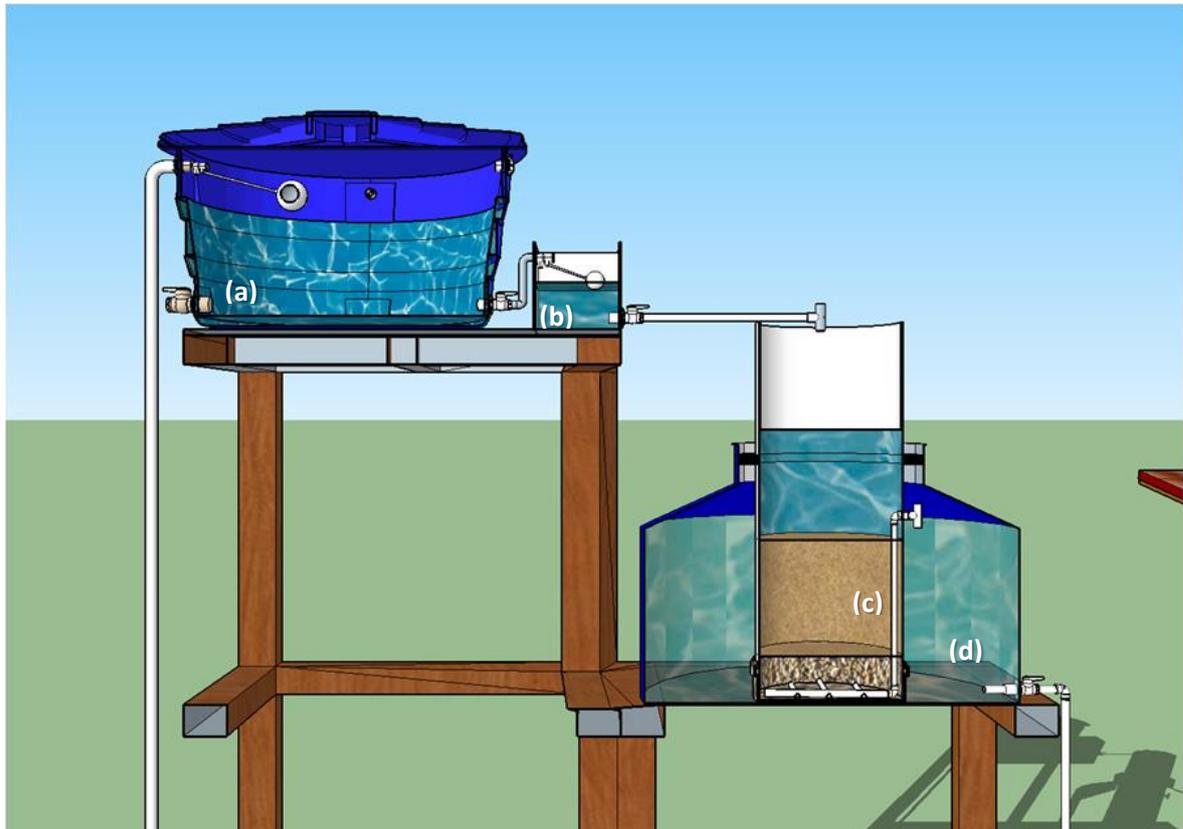


Figura 5.14 - Arranjo do sistema de filtração: corte vertical destacando unidade de filtração.

A água bruta é recalçada do manancial, uma vez por dia, para o reservatório de água bruta que alimenta a caixa de nível constante. A manutenção do nível constante na caixa (variação mínima) com o auxílio de uma boia, permite alimentar o filtro com vazão constante (taxa de filtração constante) por meio do ajuste de um registro na saída da caixa. Desta forma apesar da alimentação do reservatório de água bruta ser efetuada de forma intermitente, torna-se possível a alimentação contínua da unidade filtrante. O filtro opera com taxa constante de 0,1 m/h (2,4 m/d), solucionada na Etapa I da Análise Experimental. A taxa de filtração constante aumenta a eficiência do filtro, como visto no item 3.2.2.1.

Após passar pela caixa de nível constante, a água segue para a unidade filtrante em descarga livre. A unidade de filtração apresenta-se acoplada ao reservatório de água filtrada de modo a formar uma estrutura única. A Figura 5.15 apresenta detalhes da unidade de filtração proposta.

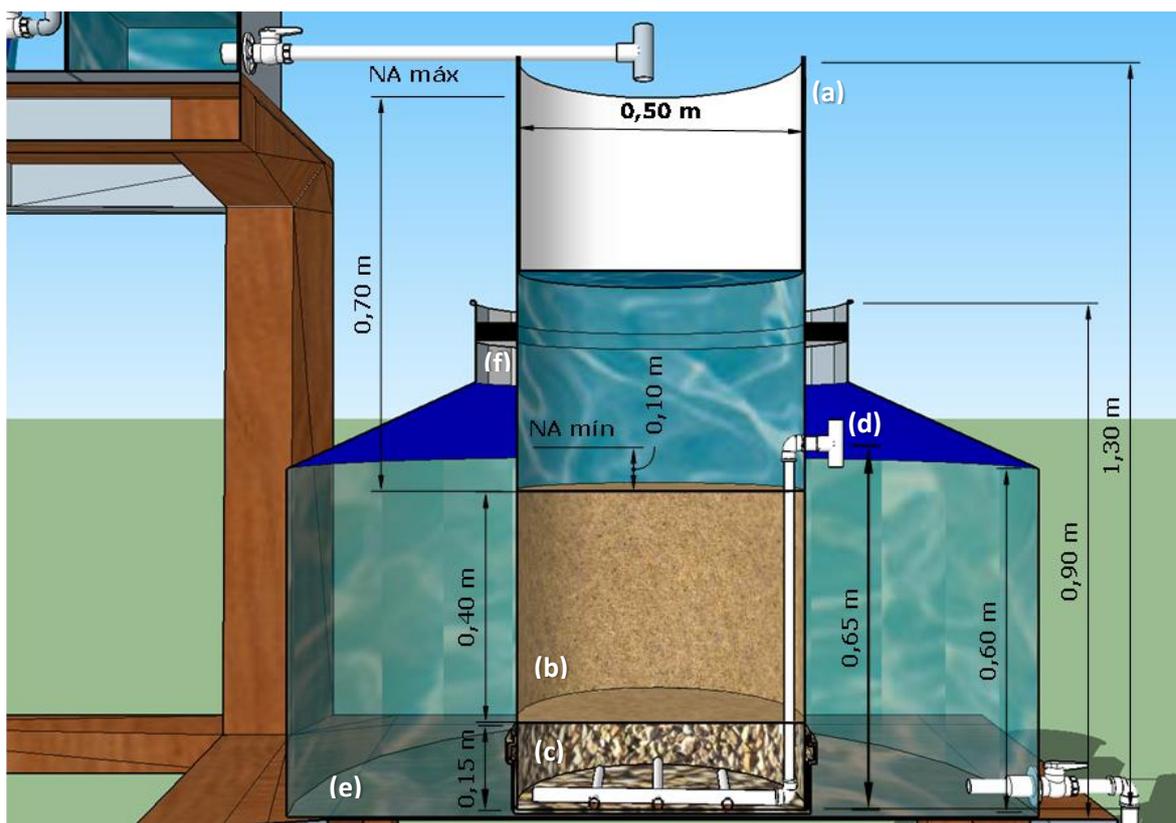


Figura 5.15 - Corte vertical da unidade filtrante dentro de Caixa d'Água com a especificação das dimensões: (a) unidade filtrante; (b) Camada de areia; (c) Camada de pedregulho; (d) Sistema de drenagem; (e) Caixa d'água; (f) Anel vedante.

O conjunto é composto pelos seguintes elementos:

- Unidade filtrante
 - Unidade cilíndrica confeccionada com tubo de PVC de 1,3 metros de comprimento e diâmetro de 500mm e cap de 500 mm (Figura 5.15.a);
 - Camada de areia de 40 centímetros (determinada na Etapa II da Análise Experimental) (Figura 5.15.b);
 - Camada suporte de pedregulho de 15 centímetros (Figura 5.15.c);
 - Sistema de drenagem (tubo de PVC de 20 milímetros de diâmetro e conexões) (Figura 5.15.d);
 - Sistema extravasor.
- Reservatório de água filtrada
 - Caixa d'água de 1000 litros com tampa rosqueável (Figura 5.15.e);
 - Anel vedante (Figura 5.15.f).

Os materiais e componentes utilizados foram escolhidos buscando otimizar a facilidade de acesso, a resistência, o custo e até mesmo o peso. O tubo de PVC é um elemento que

apresenta boa resistência, peso reduzido, fácil manipulação e montagem e custo relativamente baixo. Todavia o diâmetro utilizado não é facilmente obtido no varejo, o que em algumas localidades torna necessária a encomenda e o custeio do frete. Desta forma, pode não representar a melhor opção no caso da confecção de apenas uma unidade ou um número muito restrito de unidades de filtração. Outros elementos cilíndricos são encontrados no mercado, podendo se constituir em alternativas ao PVC. Unidade e arranjos alternativos são apresentados no item 5.2.1.3.

As dimensões da unidade de filtração foram definidas com base em fatores operacionais. A partir da taxa de filtração adotada, 0,1 m/h (2,4 m/d) e do valor de vazão almejado, 500 l/dia, calculou-se a área da seção do filtro necessária, equivalente a 0,208 m². O diâmetro necessário para gerar essa área, 515 mm, não corresponde a um diâmetro comercial de modo que se adotou o diâmetro um pouco inferior, equivalente a 500 mm. Esse diâmetro proporciona a produção de 470 litros por dia.

A altura do tubo de PVC de 500 mm, 1,3 metros, foi determinada de modo a possibilitar uma variação de carga de 62 cm de carga hidráulica para operação. A saída do sistema de drenagem foi posicionada a uma altura de 68 cm, 13 cm acima do meio filtrante, para garantir a presença de uma lâmina d'água acima da areia e assegurar que a comunidade biológica esteja sempre submersa. O meio filtrante é composto por 120 quilos de areia com granulometria apresentada na Figura 5.16, semelhante a utilizada nos experimentos, fornecida por empresa especializada na produção de areia para filtros.

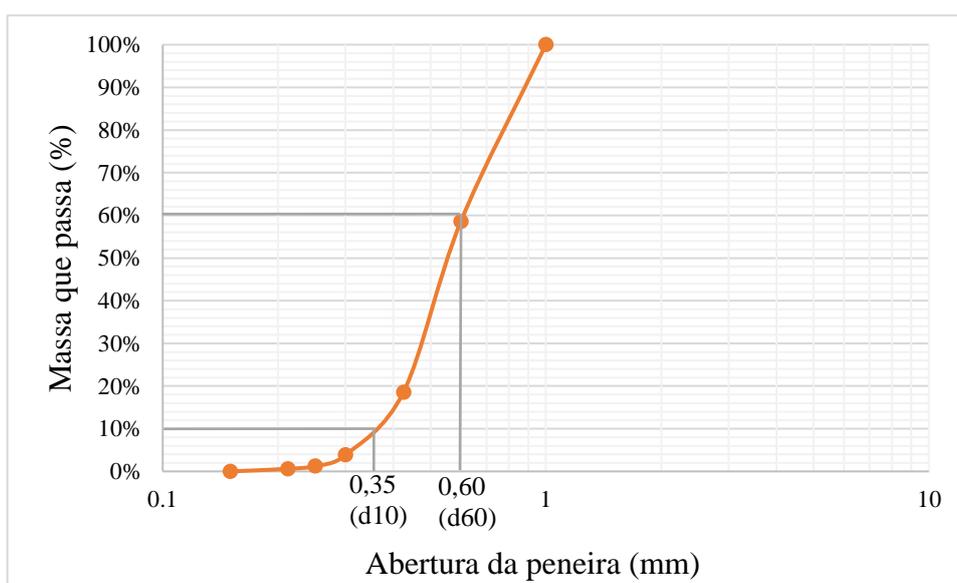


Figura 5.16 - Curva granulométrica da areia utilizada na montagem dos protótipos.

A água filtrada é transportada por meio do sistema de drenagem para o reservatório de água filtrada, onde é armazenada. O reservatório de água filtrada é composto por uma caixa d'água comercial de 1000 litros com tampa rosqueável na parte superior, como mostrado na Figura 5.15. A conexão entre a unidade filtrante e o reservatório de água filtrada ocorre dentro do próprio reservatório, para evitar a possibilidade de recontaminação na passagem entre as duas unidades. Além da função de manter a água tratada sem contaminação, o reservatório de água filtrada possui a importante função de acumular a água enquanto ela não é utilizada.

Idealmente o sistema de filtração está disposto em uma estrutura elevada, que pode ser de madeira ou outros materiais. Essa estrutura tem como função fornecer a carga hidráulica necessária para que a água chegue até os pontos de uso na casa por gravidade. Ela também é útil para causar o desnível entre o reservatório da água bruta e o filtro, exigido para promover o escoamento da água. Estruturas semelhantes são encontradas para suporte de caixas d'água no meio rural. A Figura 5.17 ilustra tal suporte.

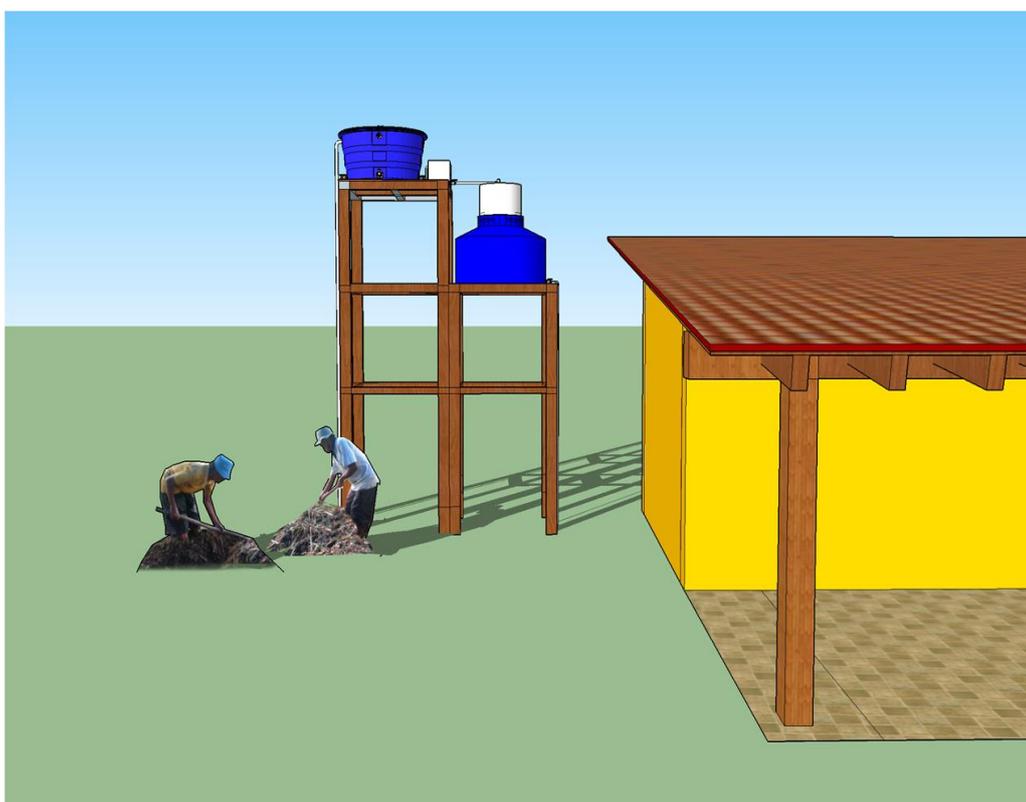


Figura 5.17 - Estrutura suporte do reservatório de água bruta, da caixa de nível constante, do filtro e do reservatório de água filtrada, ao lado de uma casa.

A estrutura apresentada não é obrigatória para o funcionamento do filtro, apesar de facilitar seu funcionamento hidráulico. Outras alternativas que garantem o desnível necessário para que o sistema funcione são apresentadas no item 5.2.1.3.

5.2.1.2 - Operação do filtro

A operação do filtro nas condições descritas depende da sua taxa de filtração. Para regular a taxa de filtração, devem ser feitos testes para adequar a vazão. A vazão de saída da caixa de nível constante deve ser de 19,6 l/h, ou 326 ml/min. Para ajustar a vazão, deve ser utilizado um recipiente com volume conhecido e um cronômetro.

A produção de água e a duração do tempo de carreira do filtro dependem da boa operação do mesmo, além da qualidade da água bruta. Quando o meio filtrante estiver colmatado, ou seja, o atingir a carga hidráulica máxima disponível para operação, faz-se necessária a limpeza do filtro. Para que o usuário saiba reconhecer quando é o momento de limpar o meio filtrante, a unidade de filtração possui um extravasor - posicionado a 70 cm da superfície da areia, que drena a água quando esta alcança seu nível máximo.

A limpeza do filtro pode ser feita com um rastelo para se revolver os primeiros centímetros de areia, onde se encontra a *schmutzdecke* e se concentra a obstrução. Esse procedimento deverá permitir que a perda de carga no meio filtrante diminua. Quando a carreira de filtração for reduzida, indicando que o crescimento da carga está acelerado, faz-se necessário a retirada os primeiros centímetros de areia, seguida de lavagem e reposição no filtro.

A retirada da areia pode ser feita através de uma mangueira por sifonamento. A lavagem pode ser feita em baldes com água, revolvendo a areia. Este procedimento deve ser repetido até que a água de lavagem saia razoavelmente limpa. Ao se retirar essa camada superior de areia, o nível de água irá diminuir, o que irá facilitar a reposição dessa areia. É importante que ao ser reposicionada, tente-se manter a camada de areia nivelada. Ao ser iniciada a operação deve-se ter o mesmo cuidado com a camada, já que a água cairá diretamente sobre a areia, podendo criar "morros" ou "vales".

A eficiência de remoção das impurezas ao se iniciar a operação do filtro é reduzida. Para garantir que o filtro opere com maior desempenho de seus mecanismos físico e biológicos, recomenda-se esperar no mínimo uma semana antes que a água filtrada seja consumida.

É importante que se utilize a água do reservatório, já que a produção do filtro é constante. O não esvaziamento do reservatório de água filtrada pode causar contrapressão, diminuindo a capacidade de produção e interferindo com o funcionamento hidráulico da estrutura.

5.2.1.3 - Custos, acessibilidade e arranjos alternativos

O filtro apresentado apresenta custos relativamente elevados, por ter sido feito com materiais específicos. Os custos finais do filtro ficaram em torno de R\$ 1.627,23, e os valores detalhados são apresentados no Apêndice A. O custo total está superestimado devido ao fato de que todos os materiais foram adquiridos no varejo, já que se montou somente uma unidade de filtro. Sendo assim, o valor final poderia diminuir caso fosse adotada uma produção em maior escala.

Outro fato que pode ter influenciado nos custos dos materiais utilizados foi o tempo reduzido disponibilizado para a montagem do protótipo. Muitos materiais foram encomendados em São Paulo e o prazo restrito para a entrega em Brasília exigiu utilização de fretes especiais com entrega rápida, portanto de maiores custos.

O material de custo mais elevado da unidade de filtração foi o tubo de PVC de 500 mm de diâmetro e seu cap. Ambos não são encontrados comercialmente no varejo em Brasília e tiveram que ser encomendados de uma empresa situada em São Paulo. Visando tornar o arranjo mais barato, podem ser adotados recipientes existentes no mercado. A Figura 5.18 apresenta duas alternativas de bombonas com dimensões compatíveis com a concepção proposta para a unidade de filtração.



Figura 5.18 - Reservatórios encontrados no mercado. (a) Bombona encontrada em site de vendas. Fonte: Mercado Livre. (b) Reservatório vendido pelo Grupo Damek. Fonte: Grupo Damek.

Essas bombonas possuem diâmetro semelhante ao proposto. A bombona da Figura 5.18a possui 60 centímetros de diâmetro, 10 a mais do que o proposto no Raicam. Isso pode ser vantajoso por permitir uma maior produção diária de água filtrada, porém necessita de maior volume de areia para uma camada de 40 centímetros de espessura, aumentando o investimento no material filtrante e camada suporte, além do aumento do peso da unidade. A bombona possui 1,1 metros de altura, o que diminui a lâmina d'água permitida, reduzindo

o tempo de carreira do filtro. Mesmo com essas questões, é possível adaptar o filtro à bombona, que custa 350 reais, sendo mais acessível que o tubo de PVC e o cap de 500 mm, além de ser facilmente encontrada.

O reservatório apresentado na Figura 5.18b custa 319,90 reais. Esse modelo pode ser encontrado de diversos tamanhos, e o modelo mais próximo do filtro é o de capacidade de 250 litros. O reservatório possui 520 mm de diâmetro, levemente maior que o proposto, e 1,35m de altura, o que permite maior lâmina d'água do filtro. Segundo o fabricante, a estrutura também possui proteção UV, podendo ficar exposta ao sol sem provocar danos, além de ser feita de material atóxico. Outra vantagem dessa alternativa é que o recipiente já é dotado de saída de água, necessitando somente ser adaptada.

Diversas estruturas semelhantes são encontradas no mercado, podendo ser adaptadas para a construção do filtro. Uma alternativa também é confeccionar a estrutura em fibra de vidro, embora possa resultar mais cara que as demais.

O suporte que serve para dar a carga necessária para que a água filtrada escoe para o domicílio também pode ser substituído. Uma opção para locais que possuem terreno com declive favorável é apresentada na Figura 5.19.

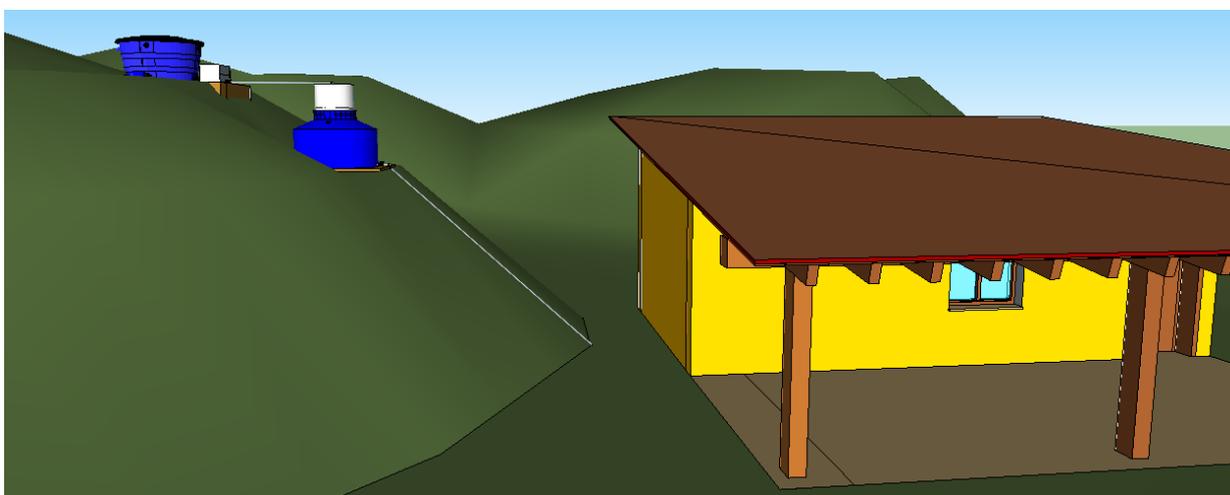


Figura 5.19 - Alternativa de instalação para casas com desnível de terreno

O arranjo remove a necessidade do suporte. Isso facilita o acesso a unidade e a limpeza do filtro, podendo reduzir os custos totais de instalação. Entretanto, como o filtro pode ficar localizado um pouco afastado da casa, essa disposição precisa de monitoramento para que se perceba o momento em que filtro começará a verter pelo extravasor, indicando que o filtro precisa ser limpo.

A proposta apresentada neste trabalho foi concebida como solução a ser implantada através de políticas públicas, pois é responsabilidade do estado fornecer água potável para a população. Desta forma, o preço pode ser reduzido caso a produção das unidades seja feita em larga escala. Uma opção é a disponibilização do material dos filtros pelo estado, cabendo a comunidade a mão-de-obra para a sua confecção. Outra alternativa para que o usuário não tenha que custear o filtro seria a distribuição por ONGs, como acontece com o CAWST (2012) e DESEA (2014).

5.2.1.4 - Montagem e Teste do Protótipo

Para garantir o funcionamento do filtro proposto, foi realizada a sua montagem e teste. Neste item, apresenta-se resumidamente os passos seguidos e resultados obtidos nesses processos. Para a montagem do filtro, iniciou-se pelo sistema de drenagem. Este sistema é formado por tubos e conexões (tês e joelhos) de 20 mm de diâmetro, um adaptador soldável curto com bolsa e rosca para registro e um adaptador com anel para caixa d'água, todos de pvc soldável. Após cortar os tubos nas dimensões adequadas, perfurou-se as peças posicionadas na base do sistema a fim de permitir a entrada da água filtrada. Os orifícios foram efetuados com furadeira munida de broca de 3 mm e posicionados em duas fileiras, em um ângulo aproximado de 60°, com uma distância de 1,5 cm entre eles (Figura 5.20a). O resultado obtido após o acoplamento das peças está apresentado na Figura 5.20b.

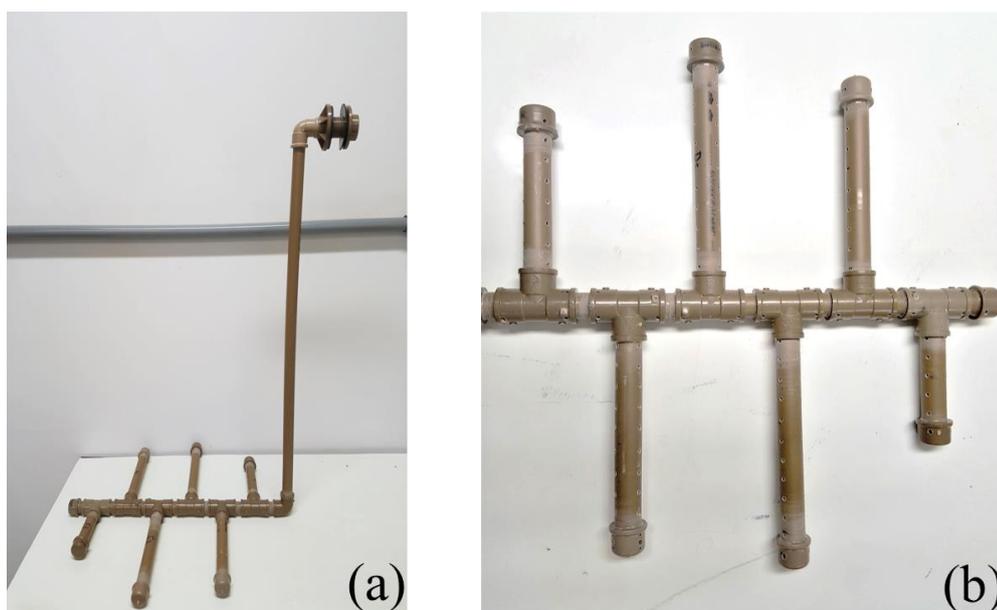


Figura 5.20 - Sistema de drenagem do filtro Raicam.(a) Vista de lateral da drenagem. (b) Fundo do sistema de drenagem, com tubos furados.

Para colar o cap no tubo de PVC, foi necessária uma atenção especial no processo de lixagem e colagem, devido à sua dimensão elevada. No caso do cap deste protótipo, o seu encaixe no tubo apresentou resistência devido ao fato de ser manufaturado. Mostrou-se necessário o uso de uma lixadeira elétrica para diminuir a espessura da parede do tubo para possibilitar a colagem. Para completar a vedação do tubo, fez-se necessário passar adesivo plástico para PVC na borda entre o cap e o tubo, na parte externa quanto na parte interna. Antes de prosseguir para o próximo passo da montagem testou-se a estanqueidade da estrutura montada. O tubo de PVC foi preenchido com água para que se observasse a possível ocorrência de vazamentos (Figura 5.21). Caso haja vazamentos, pode-se reforçar a vedação aplicando resina Epoxi (Araldite). A pintura desta estrutura é opcional, pois tem função estética.



Figura 5.21 - Teste hidráulico do filtro Raicam para avaliar a existência de vazamentos.

A unidade filtrante deve ser inserida dentro de uma caixa d'água com tampa rosqueável, mantendo cuidado para não danificar o sistema de drenagem. É importante que se utilize uma borracha de vedação entre o tubo e a borda da abertura superior da caixa, para que a recontaminação seja evitada. Pode ser utilizado um vedante de silicone para colar a borracha, já que este permite a troca desta sem danificar as demais estruturas. Esta etapa não foi realizada na montagem do protótipo, pois visou-se apenas o teste hidráulico da unidade filtrante.

Após inserida na caixa d'água, preenche-se a unidade filtrante com o pedregulho e a areia. A camada suporte era composta de pedregulho de granulometria decrescente a partir do

fundo, portanto, inicialmente foi colocado o pedregulho mais grosso, de 10 mm. Essa etapa deve ser feita já no local onde o filtro será situado, tendo em vista que o peso da estrutura após inserir o meio filtrante será muito elevado, tornando difícil sua realocação. Inseriu-se o pedregulho de maior diâmetro primeiro, diminuindo gradualmente o seu tamanho ao longo dos 15 centímetros da camada. Em seguida, a camada de areia de 40 centímetros foi inserida, buscando manter a uniformidade do meio filtrante e evitando a estratificação. Para isso, é importante que a areia seja bem misturada antes de colocá-la no filtro.

A caixa de nível constante é formada por uma caixa em material plástico, uma torneira boia e um adaptador para caixa d'água com registro. Para a montagem da caixa, furou-se a caixa com uma serra copo e encaixou-se os componentes. Após este passo, os elementos do sistema filtrante foram posicionados na estrutura responsável pelo desnível necessário para o funcionamento. Para finalizar a montagem é necessário fazer a conexão entre o reservatório de água bruta, a caixa de nível constante, a unidade filtrante (esta última em descarga livre), o reservatório de água tratada e a residência. A estrutura obtida, montada no LSA para efeito de teste hidráulico, está apresentada na Figura 5.22.



Figura 5.22 - Filtro Raicam montado no Laboratório de Saneamento Ambiental.

Executou-se a avaliação hidráulica do filtro por meio da sua operação durante 24 horas. Para se obter a taxa de filtração desejada, deve-se ajustar a abertura da torneira baseados em testes volumétricos da vazão. Verificou-se que, com o auxílio da caixa niveladora, a vazão se manteve constante durante o teste, o que auxilia os mecanismos de remoção do filtro.

A água utilizada para teste possuía valores elevados de ferro, causados pela deterioração da tubulação por onde a água passava. Embora não tenham sido feitas análises quantitativas do ferro na água, a remoção da substância foi nítida, visto que a água bruta do filtro possuía cor amarelada, enquanto o efluente do filtro era transparente. A remoção ocorreu mesmo sem que o filtro apresentasse amadurecimento biológico, já que a unidade não foi submetida a tempo ou qualidade da água bruta necessários para que microrganismos se desenvolvessem na camada filtrante. Isso indica que, além das remoções biológicas, ocorre no filtro o tratamento da água por mecanismos físicos.

Outro fator avaliado nos testes foi a estanqueidade. O filtro não apresentou vazamentos em sua estrutura. Após os testes, concluiu-se que a unidade montada apresentou as características esperadas na sua concepção.

5.2.2 - Filtro Momui

Todas as pessoas deveriam ter acesso à água tratada em quantidade suficiente para suprir a demanda domiciliar, mas nem sempre essa realidade é possível no meio rural brasileiro, por questões logísticas, econômicas e sociais. O filtro Momui foi pensado para atender famílias que precisam de uma solução mais acessível, já que a obtenção de água é limitada. Buscou-se uma unidade que pudesse tratar uma quantidade de água suficiente para os usos básicos de uma família de 6 a 7 pessoas, fornecendo uma média de aproximadamente 8,5 litros per capita por dia, um litro a mais que o recomendado pela OMS.

5.2.2.1 - Estrutura do Filtro

O filtro é composto de um reservatório de água bruta, uma unidade filtrante e um reservatório de água filtrada (Figura 5.23). A água passa do reservatório de água bruta para a unidade filtrante por meio de um sistema de alimentação. Na unidade de filtração, a água é filtrada através do meio filtrante de areia, seguindo para a camada suporte, onde é drenada e alimenta o reservatório de água filtrada. Os componentes do filtro, assim como suas quantidades, estão detalhados no Apêndice B.

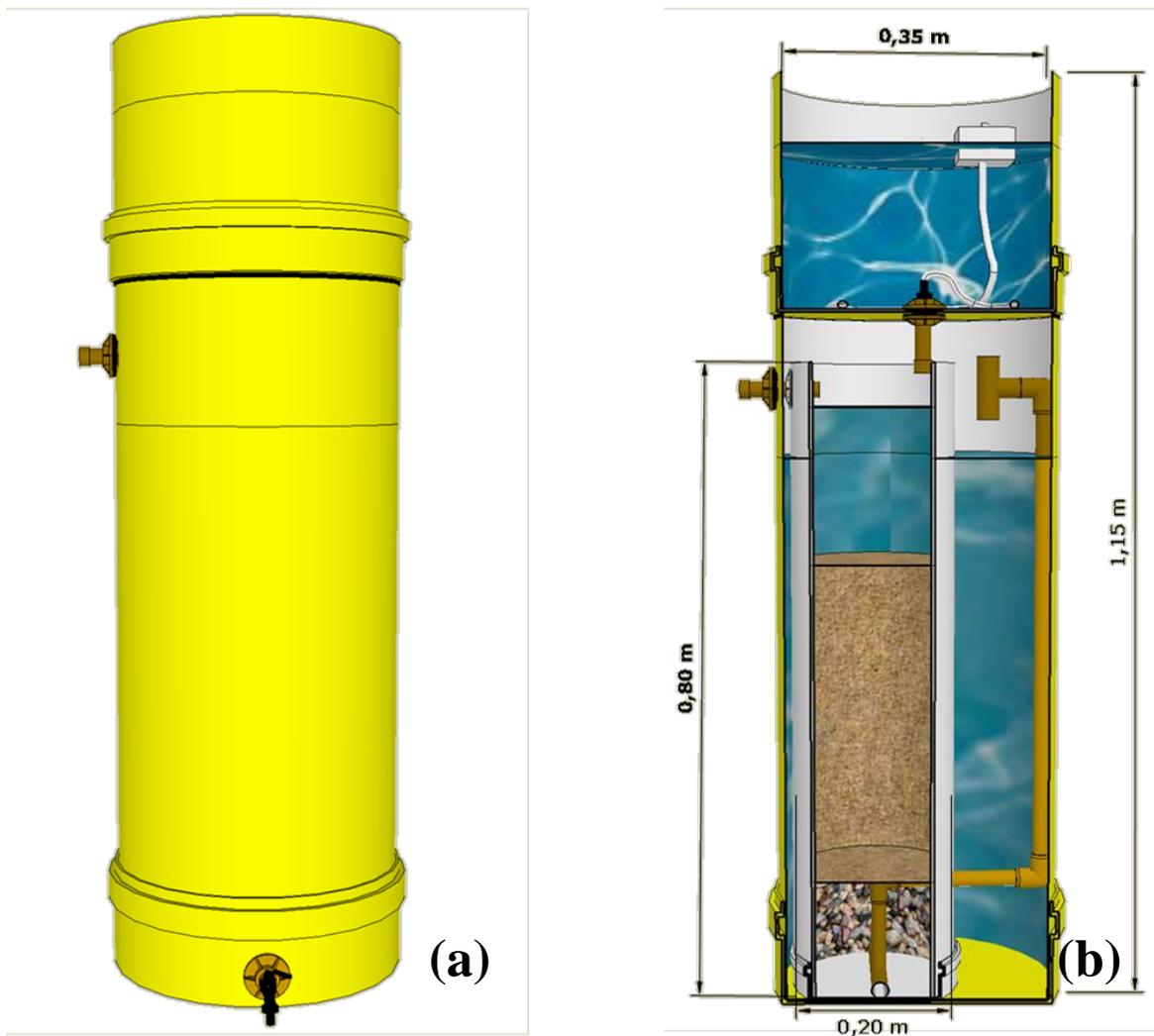


Figura 5.23 - Estrutura do Filtro Momui. (a) Vista lateral. (b) Corte vertical.

A estrutura é composta da seguinte forma:

- Unidade filtrante
 - Tubo de PVC de 200 mm de diâmetro e 0,8 metros de altura, com extremidade fechada por cap de PVC de 200 mm;
 - Camada suporte de pedregulho de 15 cm;
 - Camada de areia de 40 cm;
 - Sistema de drenagem (tubo de PVC de 20 mm de diâmetro e conexões);
 - Sistema extravasor para excesso de água bruta (adaptador com flange livre).
- Reservatório água bruta
 - Tubo de PVC de 350 mm 0,3 metros de altura com extremidade fechado por cap de PVC de 350 mm;
 - Sistema de alimentação do filtro.

- Reservatório água filtrada
 - Tubo de PVC de 350 mm e 0,85 metros de altura com extremidade fechada por cap de PVC de 350 mm;
 - Sistema de saída da água tratada.

A escolha dos materiais foi feita sob a mesma lógica adotada no filtro Raicam, visando sua aplicação, resistência e peso, além de possíveis adaptações. Da mesma forma, no filtro Momui utiliza-se tubo com diâmetro não encontrado comercialmente, de 350 mm. Apesar de não ser encontrado facilmente, o material se adaptou às dimensões desejadas, portanto foi escolhido para essa finalidade. O tubo pode ser produzido em larga escala para implementação por políticas públicas, assim como o Raicam. Alternativas para esse material serão apresentadas no item 5.2.2.3.

A unidade filtrante é composta por meio filtrante, camada suporte, sistema de drenagem e extravasor de água bruta. A sua altura, 80 cm, foi determinada pensando-se na estabilidade da estrutura, além de suportar uma lâmina d'água de 25 cm. A taxa de filtração adotada, de 0,1 m/h (2,4m/d) e a vazão almejado, de 60 l/d, resultaram na necessidade de 0,025 m² de área para realizar o tratamento desejado. O diâmetro do tubo foi determinado a partir da área requerida, sendo necessário um valor igual a 178 mm. Desta forma, adotou-se o diâmetro comercial de 200 mm, permitindo tratar até 68 litros, valor maior que os 60 litros propostos.

A produção diária de 68 litros de água só é atingida se o filtro operar 24 horas por dia, o que é provável que não ocorra já que o reservatório de água bruta é abastecido manualmente e tem um limite de armazenamento de 20 litros. Considerando a intermitência do abastecimento, adotou-se um diâmetro maior que permite a produção do volume desejado com uma margem de segurança, de forma que não seja obrigatória a operação contínua do filtro. O Momui também pode ser operado com uma taxa constante de 0,09 m/h (2,1 m/d), o que aumentaria sua eficiência e ainda proporcionaria os 60 litros de água por dia. Entretanto, essa taxa torna necessário o funcionamento contínuo do filtro para atingir a quantidade de água desejada, fazendo com que o reservatório de água bruta tenha que ser enchido com certa frequência.

O meio filtrante é constituído de aproximadamente 20 quilos de areia com a mesma granulometria adotada no Raicam, e possui espessura de 40 cm, determinada a partir dos resultados da Etapa I. Abaixo da camada filtrante, situa-se a camada suporte e o sistema de drenagem. O sistema de drenagem da unidade filtrante tem a saída localizada a uma altura

de 72 cm a partir da base do filtro, garantindo uma coluna d'água acima do meio filtrante, essencial para manter a *schmutzdecke*. Esta saída está abaixo do extravasor e maximiza o espaço útil do reservatório de água filtrada. Com o intuito de minimizar as possibilidades de recontaminação da água tratada, assim como no filtro Raicam, a unidade filtrante encontra-se no interior do reservatório de água filtrada. O extravasor atravessa os tubos da unidade filtrante e do reservatório de água filtrada, para que a água bruta não transborde e contamine a água limpa do reservatório exterior.

O reservatório de água bruta está localizado na parte superior do sistema filtrante, possuindo também a função de tampa dos componentes da parte inferior. Devido a sua posição, o reservatório possui um sistema em sua parte inferior, voltado a encaixar-se no tubo abaixo. Além disso, este reservatório possui uma estrutura para a alimentação da unidade filtrante.

A torneira de saída da água filtrada é localizada na borda inferior do reservatório externo para aproveitar ao máximo a água produzida. Esse local foi escolhido por facilitar o esvaziamento do reservatório, já que toda água abaixo da torneira não conseguiria ser drenada. Devido a esse fator, o filtro deve ser disposto em um suporte para facilitar a remoção da água. Caso contrário, a torneira ficará muito próxima do chão, impossibilitando a retirada da água em recipientes como copos, garrafas e panelas. O suporte pode ser feito de tijolos, concreto, madeira ou outros materiais facilmente encontrados. A Figura 5.24 mostra uma ilustração do filtro Momui instalado com um suporte.



Figura 5.24 - Representação do filtro Momui sobre um suporte em uma casa.

5.2.2.2 - Operação do Filtro

Os filtros lentos intermitentes possuem eficiência comprovada, entretanto menor se comparado aos filtros com taxa de filtração constante (Young-Rojanschi *et al.*, 2014). Visando maximizar a eficiência do filtro Momui, buscou-se uma estrutura de alimentação que permitisse manter a taxa de filtração constante enquanto o filtro estivesse operando. O filtro busca agregar a praticidade e acessibilidade de uma unidade intermitente, que elimina a utilização de bombas e pode ser alimentada por balde, com a remoção obtida pelos filtros com taxa de filtração constante. Para isso, adotou-se um sistema de alimentação com boia, que faz com que a carga acima do orifício por onde a água bruta é coletada seja sempre a mesma (Figura 5.25).

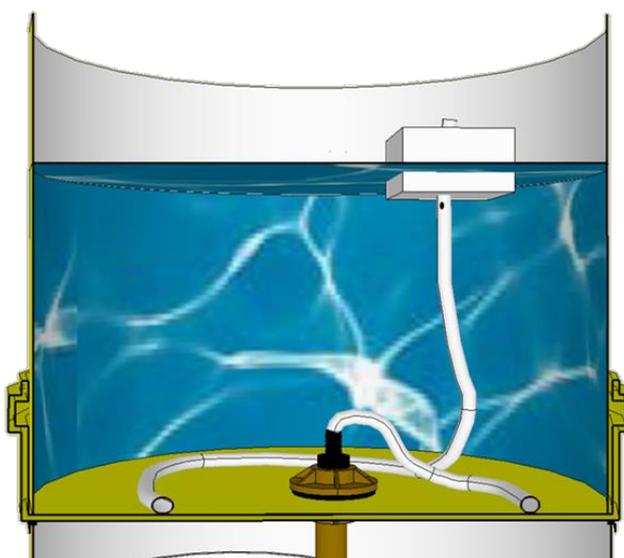


Figura 5.25 - Sistema de alimentação do filtro Momui

A localização do reservatório de água bruta permite que a água escoe por gravidade. Ele deve ser enchido três vezes ao dia para que sejam filtrados os 60 litros propostos. O reservatório possui um volume morto de 5,5 litros, causado pela altura da entrada do sistema de drenagem. Devido a qualidade da água bruta e ao volume morto, o fundo do reservatório pode agregar impurezas, que devem ser retiradas após o acúmulo excessivo. O reservatório deve ser coberto, a fim de evitar a proliferação de vetores. Uma tampa pode ser confeccionada com uma placa de PVC ou pode ser utilizada uma tampa de balde já existente. Outra opção é cobrir o reservatório com uma tela tipo mosquiteiro.

O reservatório de água filtrada localiza-se ao redor do tubo do meio filtrante. É importante destacar que as dimensões deste reservatório permitem que ele reserve 40 litros, mas o filtro

pode filtrar até 68 litros se for operado por 24 horas. Isso exige que o reservatório seja esvaziado com certa frequência, não devendo ficar em desuso. Caso a carga se eleve devido ao excesso de água no reservatório de água filtrada, é possível que ocorra contrapressão, diminuindo a produção do filtro. Não é esperado que isso aconteça, já que os moradores estarão utilizando a água diariamente, portanto o filtro será sempre esvaziado. Ainda assim, é essencial que os usuários do filtro estejam cientes da relevância desse fator.

Assim como no filtro Raicam, deve-se limpar o Momui quando a água escoar pelo extravasor, devido à baixa vazão causada pela obstrução do meio filtrante e a água. A limpeza pode ser feita da mesma forma que o Raicam, detalhada no item 5.2.1.2.

5.2.2.3 - Custos, acessibilidade e arranjos alternativos

O filtro Momui apresenta menor custo se comparado com o Raicam, já que se utiliza um volume menor de areia e tubos de menor diâmetro e comprimento. O custo final do filtro totalizou 780 reais, valor detalhado no Apêndice B. Ainda que o valor seja menor que o do filtro de maior escala, sabe-se que esse custo ainda é elevado para a realidade econômica de muitas famílias do meio rural brasileiro.

O principal fator responsável pela elevação do valor do filtro é a utilização do tubo de PVC de 350 mm de diâmetro. A proposta original do filtro Momui unificou todas as partes do filtro em uma estrutura única visando diminuir o espaço ocupado pelo filtro, já que muitas casas não possuem tanto espaço disponível, além de facilitar a operação e evitar recontaminação da água. Todavia, o tubo de PVC de 350 mm e seu cap, utilizados para fazer o reservatório acoplado, encarecem o processo por se tratar de componentes muito específicos e pouco convencionais. Caso o usuário queira montar seu próprio filtro e não possa arcar com a estrutura proposta, existem arranjos mais econômicas que também são eficientes.

Uma versão alternativa pode ser adotada para tratar menor quantidade de água. A opção substituiria o tubo central (de 200 mm de diâmetro) por um de 150 mm e o externo (de 350 mm de diâmetro) por um de 300 mm. Essa versão é capaz de tratar 40 litros de água por dia com a mesma taxa de filtração, e diminuiria os custos totais em 350 reais, baseado nos preços comerciais de Brasília. Um fator que deve ser avaliado é a estabilidade dessa estrutura, já que a relação comprimento/área da base é maior. Além disso, o filtro necessita de suporte e caso se opte por acoplar o reservatório de água bruta na mesma unidade, faz-se necessário

umentar a altura total do filtro em 10 centímetros, acentuando possíveis problemas de estabilidade. Uma solução é desagregar o reservatório de alimentação do filtro.

Outras estruturas podem ser utilizadas como reservatório de água filtrada, substituindo o tubo de 350 mm sem substituir o tubo de 200 mm da unidade filtrante. Uma possibilidade é a utilização de bombonas como as apresentadas no item 5.2.1.2, mas de dimensões menores. A mesma empresa que fornece a bombona da Figura 5.18b também fornece reservatório semelhante com diâmetro de 440 mm e altura de 85 centímetros. Essa estrutura pode exercer o papel de reservatório de água limpa, aumentando sua capacidade de armazenamento. A bombona é encontrada pelo valor de aproximadamente 200 reais.

Uma alternativa que diminui o custo do arranjo é desacoplar a estrutura original, de modo que o reservatório de água filtrada venha a ser alocado ao lado da unidade filtrante (Figura 5.26). O reservatório de água filtrada pode ser constituído por um tubo de PVC, de 200mm ou 300mm de diâmetro, ou outro recipiente plástico.

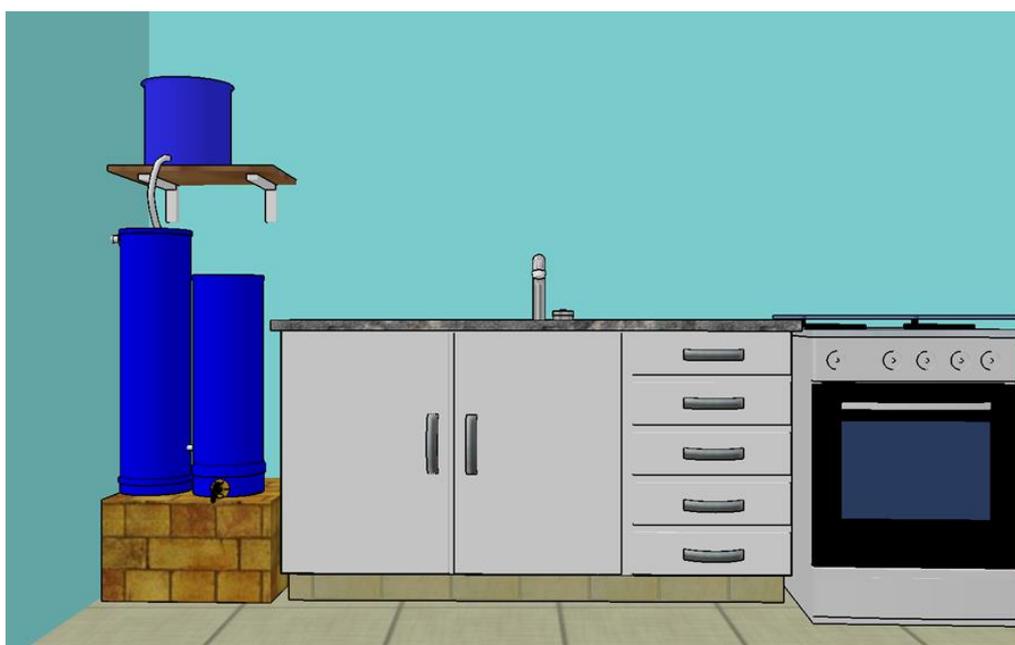


Figura 5.26 - Filtro com reservatório de água filtrada e de água bruta separado.

Essa estrutura em muito se assemelha com propostas filtro lento elaboradas por ONGs (CAWST, 2012; DESEA, 2014), diferenciando-se pela taxa de filtração constante e espessura da camada filtrante. Além do tubo de PVC, podem ser utilizadas outras estruturas para armazenar água filtrada, sempre mantendo cuidado para evitar a recontaminação.

Ao se desacoplar o reservatório de água filtrada da unidade filtrante, o reservatório de água bruta não consegue ser encaixado acima da estrutura do filtro. O mesmo acontece quando são utilizadas bombonas. A Figura 5.26 mostra a opção de separar o reservatório de água bruta do restante da estrutura, utilizando um recipiente posicionado em um nível superior ao filtro. Portanto, uma prateleira pode alocar o reservatório de água bruta e causar o desnível necessário para que a água escoe por gravidade. As alternativas apresentadas devem ser testadas e avaliadas para que possam ser aplicadas às diferentes realidades encontradas no meio rural, a fim de expandir o acesso ao tratamento de água.

O filtro Momui apresentou valor total de 780 reais e é capaz de produzir 60 litros de água filtrada por dia, enquanto o filtro Raicam apresentou valor total de 1627 reais e é capaz de produzir 470 litros por dia. Avaliando-se os custos de investimento por capacidade de produção diária de água dos filtros, o filtro Raicam apresentou um custo de 3,46 R\$/L, enquanto o custo do Momui foi de 12,3 R\$/L. Ressalta-se que este custo refere-se ao investimento na confecção das unidades e não considera a vida útil dos filtros. Assim, esse valor não é relativo à produção da água ao longo da vida útil dos filtros. O valor é amortecido ao longo do tempo de uso da unidade, visto que não há custos adicionais além de possíveis pequenas manutenções.

Estima-se que os filtros possuem vida útil de, no mínimo, 5 anos. Considerando tal vida útil, um cálculo simplificado indica que o metro cúbico de água produzida do Raicam custaria cerca de 1,90 reais, enquanto o metro cúbico do Momui custaria em torno de 7,10 reais. Tais valores podem ser menores se os filtros forem produzidos em larga escala ou se for considerada uma vida útil maior.

A diferença entre os custos de investimento por capacidade de produção diária e do metro cúbico de água produzida obtidos indica que o filtro Momui deve ser aplicado em casos específicos, já que ele possui custos relativos elevados. No entanto, o filtro é uma alternativa para situações nas quais não é possível transferência da água da fonte de água para alimentação do filtro Raicam, seja por não haver condições de bombeamento ou desnível natural, ou haja limitações da quantidade de água disponível. Considerando a implementação por políticas públicas, deverá ser dada sempre preferência à implantação do Raicam, não apenas pelo seu menor custo relativo, mas principalmente pelo fato de esta unidade fornecer água de beber de melhor qualidade e promover hábitos de higiene pessoal e salubridade no domicílio.

5.2.2.4 - Montagem e teste do protótipo

A fim de avaliar a proposta em relação a sua dificuldade de confecção e garantia de funcionamento hidráulico, foi realizada a montagem e teste hidráulico do filtro Momui. Iniciou-se a montagem do filtro pelo sistema de drenagem. A tubulação usada para drenagem, assim como os caps, joelhos e tês, são de 20 mm de diâmetro. Uma vez acopladas as peças do sistema, foram feitos orifícios nos tubos da drenagem para permitir a entrada da água filtrada. O sistema de drenagem está apresentado na Figuras 5.27.

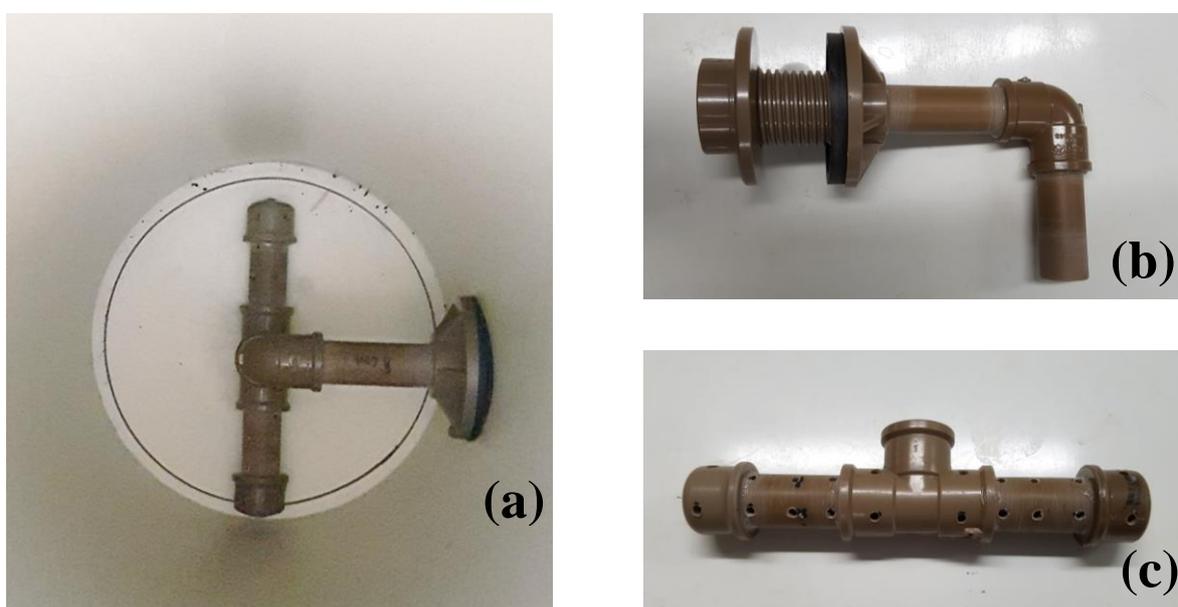


Figura 5.27 -. Sistema de drenagem: (a) Vista superior do sistema de drenagem encaixado; (b) Detalhes de parte inferior; (c) Tubos perfurados;

O tubo de 200 mm de diâmetro e 80 centímetros de altura foi perfurado com uma serra copo na altura de 13 centímetros, para permitir o encaixe do sistema de drenagem. Esta altura foi definida atentando-se para que a entrada do sistema de drenagem não impedisse o encaixe do cap do tubo da unidade filtrante. A fixação da estrutura foi executada utilizando um adaptador com anel para caixa d'água, com a função de vedar o orifício de passagem da tubulação

Após encaixe do sistema de drenagem, o cap de 200 mm pôde ser acoplado. O cap adquirido possuía uma cavidade em sua borda, sendo necessária a aquisição de uma borracha para que ocorresse a vedação necessária. Após esta etapa prosseguiu-se com a montagem do tubo de 350 mm, reservatório externo. O cap de 350 mm foi lixado e vedado com adesivo plástico

para PVC. Assim como na montagem do filtro Raicam, o cap apresentou resistência no processo de encaixe. Com o cap instalado, fez-se o orifício na parte inferior para inserir a torneira do reservatório de água filtrada. Para garantir que as estruturas estivessem corretamente vedadas, foi necessário realizar testes de estanqueidade, enchendo ambas de água a fim de observar possíveis vazamentos.

Uma vez instalada a drenagem do tubo de 200mm, colocados os caps e feito o teste hidráulico do reservatório de água filtrada e da unidade filtrante, foi montado o extravasor mostrado na Figura 5.28.



Figura 5.28 - Extravasor encaixado nos orifícios dos tubos com as flanges e borrachas de vedação

Os orifícios, feitos com uma serra copo, devem estar alinhados para que a estrutura possa atravessar os dois tubos. Para isso, perfura-se primeiro o tubo externo, a uma altura de 78 cm, em seguida perfura-se o tubo da unidade filtrante, posicionada no seu interior.

Assim que os tubos são perfurados, o extravasor pode ser instalado. O extravasor é composto por um adaptador soldável com flanges livres para caixa d'água e anéis de borracha, a fim de vedar os orifícios por onde o extravasor passa. Essa vedação é essencial, pois garante que a água bruta da unidade filtrante não contamine a água limpa do reservatório de água filtrada. Dois dos flanges utilizados foram confeccionados, dado que eram muito grandes e não vedariam o orifício do tubo de menor diâmetro.

Ao finalizar o extravasor foi executado o teste de estanqueidade do extravasor, a fim de checar se há vazamentos em algum dos orifícios. Após esta etapa foi colocada uma borracha

na borda do reservatório de água filtrada e passou-se para a confecção do reservatório de água bruta.

O reservatório de água bruta é constituído por um tubo de PVC de 350 mm de diâmetro com 30 centímetros de altura e seu cap. O encaixe e a vedação do cap devem ser executados da mesma forma que no reservatório de água filtrada. No fundo do cap, foi perfurado um orifício e acoplado um adaptador soldável com flanges livres para caixa d'água, com borrachhas para vedação (Figura 5.29).



Figura 5.29 - Fundo do reservatório de água bruta, com adaptador soldável com flanges livres.

Neste adaptador, na parte interna ao cap, colocou-se um adaptador para mangueira e acoplou-se uma mangueira flexível, fixada a um flutuante em sua extremidade, mostrado na Figura 5.25. O orifício de alimentação, de 2 milímetros, foi projetado para admitir carga hidráulica de cerca de 1 cm, garantida com o auxílio da boia. É importante que a extremidade da mangueira não esteja posicionada dentro d'água, para que a água adentre somente pelo orifício.

Depois de finalizar as estruturas do filtro, este pode ser instalado, inserindo a camada suporte e o meio filtrante. Primeiramente, devem-se introduzir uma camada de 15 centímetros de pedregulho. Para auxiliar no processo, podem ser feitas marcas nas paredes internas do tubo antes de adicionar o material, indicando onde irá se situar o topo da camada. Acima do pedregulho, coloca-se uma camada de 40 centímetros de areia homogeneizada. Após

inserido o meio filtrante, a estrutura do filtro está finalizada, bastando encaixar o reservatório de água bruta acima do reservatório de água filtrada. A pintura do filtro é um elemento estético e, portanto opcional. No entanto, é importante ressaltar que a pintura pode influenciar no grau de aceitação do objeto por parte da população. A estrutura montada é apresentada na Figura 5.30.



Figura 5.30 - Filtro Momui montado e funcionando

Na montagem do reservatório de água bruta, encontrou-se dificuldades para o ajuste da taxa de filtração constante. Os problemas técnicos apresentados fizeram com que o teste hidráulico fosse efetuado utilizando a caixa de nível constante do filtro Raicam, regulando a vazão através do registro da mesma. Atingido a taxa constante necessária, procedeu-se com o teste, averiguando que o filtro possui estanqueidade.

Através do estudo feito, verificou-se que a unidade pode ser aplicada em diversas disposições, podendo ser adaptada a diferentes materiais e condições econômicas e logísticas. O sistema de alimentação do filtro ainda deve ser aprimorado para que o Momui possa operar como planejado.

6 - CONCLUSÃO

Uma grande parcela da população brasileira ainda não possui acesso à água potável, um direito humano fundamental que deveria ser garantido pelo Estado. A ampliação do acesso à água tratada no Brasil atuaria como política de saúde pública preventiva e aumentaria a qualidade de vida da população. Os investimentos na busca da universalização do acesso à água de qualidade devem assegurar que as opções de abastecimento e tratamento se adequem às diferentes realidades brasileiras, alcançando a parcela da população normalmente excluída. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta duas alternativas de sistemas de tratamento de água por filtração lenta voltados para domicílios rurais, que podem ser implementados como política pública. Os filtros Raicam e Momui foram resultado da análise experimental, do estudo de unidades existentes, e da efetiva elaboração e montagem dos protótipos.

Da avaliação experimental da taxa de filtração, constatou-se que a taxa mais eficiente entre as avaliadas para a remoção de turbidez, coliformes totais e *E. coli* foi de 0,1 m/h (2,4 m/d). Os filtros apresentaram eficiência máxima de 96% na remoção de coliformes totais nessa etapa, e se mantiveram abaixo de 90% na remoção de *E.coli* após 14 dias de operação. As remoções de turbidez encontradas ficaram abaixo do apresentado pela literatura, não ultrapassando 47%. Nessa etapa da análise experimental os filtros operaram por um tempo reduzido, de apenas 14 dias, o que influenciou os resultados obtidos.

Também foi analisada a eficiência de filtração adotando diferentes espessuras de camada filtrante, com os filtros operando com taxa de filtração de 0,1 m/h (2,4 m/d). Dentre as espessuras testadas (35 e 40 cm), destacou-se o meio filtrante mais espesso. Nessa etapa, os filtros piloto FLA 1 e FLA 2 operaram por 43 e 46 dias, respectivamente, permitindo maior amadurecimento da comunidade biológica do meio filtrante. Após 14 dias de operação, os filtros conseguiram atingir remoções que garantiram que a turbidez residual ficasse sempre abaixo de 1 uT, limite estabelecido pela Portaria 2.914 para filtração lenta. Para coliformes totais, a remoção foi de 99,9% para ambos os filtros, apresentando valores coerentes com os encontrados na literatura. Percebeu-se que o tempo de maturação dos filtros influenciou positivamente nos resultados de remoção de turbidez, coliformes totais, *E. coli* e partículas do tamanho de (oo)cistos de *Cryptosporidium* e *Giárdia*. O uso da camada reduzida de 40 centímetros resultou em elevados percentuais de remoção, indicando a possibilidade de sua aplicação no projeto dos filtros domiciliares. Entretanto, devem ser efetuados mais estudos

já que, em função da elevada perda de carga, os filtros foram operados parte do tempo com taxa de filtração declinante.

A partir dos resultados obtidos no trabalho experimental foram propostos os protótipos de filtro denominados Raicam, para produção de 470 L/dia, e Momui, para produção de 60 L/dia. Os protótipos foram montados com tubos e peças de PVC disponíveis no mercado, e foram submetidos a testes preliminares, apresentando estanqueidade e correto funcionamento hidráulico. O sistema de alimentação do filtro Raicam foi capaz de garantir a operação do filtro com taxa de filtração constante, de 0,1 m/h (2,4 m/d). Entretanto, no filtro Momui o sistema de alimentação deve ser melhorado pois não foi possível manter a vazão de alimentação constante.

Os custos finais de investimento totalizaram em R\$ 1.627 para o Raicam e R\$ 780 para o Momui. Esses valores poderiam ser reduzidos caso os filtros fossem produzidos em larga escala. Também podem ser utilizados outros materiais para diminuir os custos e facilitar a montagem na produção em pequena escala.

Os custos de investimento relativos à capacidade de produção de água do Raicam totalizaram em 3,46 reais por litro, enquanto para o Momui foram de 12,3 reais por litro. Isso mostra que o filtro Momui possui custos de implantação elevados, mas é uma solução para situações específicas, como locais com limitações na quantidade de água disponível.

Visando a implementação de opções de tratamento de água por políticas públicas, o Raicam se apresentou como opção mais adequada, já que amplia a quantidade de água fornecida, melhorando as questões de higiene e saúde da população atendida. Entretanto, mais testes são necessários antes que ele seja implantado em larga escala.

No geral, a filtração lenta com meio filtrante de espessura reduzida (40 cm) mostrou-se uma opção viável e eficiente para o tratamento de água a nível domiciliar, mas pode ser aprimorada. Nesse sentido, recomenda-se:

- Operar os filtros Raicam e Momui de forma contínua a fim de confirmar os seus desempenhos tanto na qualidade da água produzida como na evolução da perda de carga e duração da carreira dos filtros.
- A aplicação dos protótipos elaborados neste estudo em domicílios rurais visando a avaliação da aceitação dos modelos e a operação dos filtros pelos usuários.

- O aprimoramento do sistema de alimentação do filtro Momui, objetivando alcançar um sistema que forneça vazão constante, permitindo que o filtro opere com taxa de filtração constante.
- O estudo mais aprofundado da perda de carga em filtros lentos e de seus mecanismos biológicos de remoção a partir da variação das características da qualidade da água bruta.
- Avaliar o uso de mantas (geossintéticos) sobre o meio filtrante com objetivo de facilitar a limpeza dos filtros.
- A avaliação de meios filtrantes compostos por materiais alternativos e com diferentes granulometrias.
- A adequação dos sistemas apresentados para que seja acoplada uma etapa de cloração da água, dada a importância da desinfecção para obtenção de água segura.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21ª Ed. APHA, AWWA, WE, Washington.
- Amaral, L. A. Nader A. F., Rossi, O.D.J., Ferreira, F.L. A., Barros, L.S. S. (2003). “Água de consumo humano como fator de risco à saúde em propriedades rurais”. *Revista Saúde Pública*, São Paulo, **37**(4), 510-514. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-89102003000400017>. Acessado em: 24 maio 2016.
- Baker, D., Duke, W. (2006). *Intermittent Slow Sand Filters for Household Use. A Field Study in Haiti*. University of Victoria, Canada. 4p.
- Bellamy, W.D.; Hendricks, D.W. (1991). “Microorganism removals by slow filtration”. In: Logsdon, G.S. (ed.) *Slow Sand Filtration*. ASCE, New York, E.U.A. 100-121.
- Bellamy, W.D., Silverman, G.P., Hendricks, D.W. e Logsdon, G.S. (1985a). “Removing Giardia Cysts with Slow Sand Filtration”. *Journal of American Water Works Association*, **77**(2), 52-60.
- Bellamy, W.D., Hendricks, D.W. e Logsdon, G.S. (1985b). “Slow Sand Filtration: Influences of Selected Process Variables”. *Journal of American Water Works Association*, **77**,(12), 62-66.
- Brasil. (2007). Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. *Diário Oficial da União*. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm. Acessado em: 24 maio de 2016.
- SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, (2014a). *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2014*. Brasília, Ministério das Cidades. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-água-e-esgotos/diagnostico-ae-2014>. Acessado em: 18 maio 2016.
- Brasil, Ministério das Cidades. (2014b). *Relatório de avaliação anual do plano nacional de saneamento básico – ano 2014*. Brasília. Disponível em: http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/PlanSaB/relatorio_anual_avaliacao_plansab_2014_15122015.pdf. Acessado em: 28 maio 2016.

- Brasil. Portaria 2.914. (2011). Ministério da Saúde-MS. Norma de qualidade da água para consumo humano. *Portaria nº 2.914*, D.O.U. de 14/12/11, República Federativa do Brasil.
- Britto, L.L.A., Cardoso, A.B., Salvador, D.P., Heller, L. (2005). 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*, **10**(4), 307-317. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/v10n4/a07v10n4.pdf>. Acessado em: 10 de maio 2016.
- Buzunis, B. J. (1995), *Intermittently operates slow sand filtration: a new water treatment process*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Calgary. Calgary. 220p. Disponível em: https://ia800703.us.archive.org/17/items/biosand_Intermittently_Opperated_Slow_Sand_Filter_Thesis/Intermittently_Opperated_Slow_Sand_Filter_Thesis.pdf . Acessado em: 10 de novembro 2016.
- Campos, L.C., Su, M.F.J., Graham, N.J.D., Smith S.R. (2002). “Biomass development in slow sand filters”. *Water Research*, **36**, 4543–4551.
- CAWST (2012). *Biosand Filter Construction Manual*.e Centre for Affordable Water and Sanitation Technology. Calgary. 110p Disponível em:http://www.cwscambodia.org/wp-content/uploads/2014/09/BSF-PI_Construction-Manual_2012-08_en.pdf . Acessado em: 10 de maio 2016.
- Cerqueira, D. A. (2008). *Remoção de oocistos de Cryptosporidium parvum E de indicadores no tratamento de água por ciclo completo, filtração direta descendente e dupla filtração, em escala piloto*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio ambiente e Recursos hídricos Belo Horizonte, 194p. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ENGD-7LTQEB/155d.pdf?sequence=1>. Acessado em: 10 de maio 2016.
- Clear Cambodia (2015). *Clear cambodia*. Disponível em: <http://www.clearcambodia.org/>. Acessado em: 13 novembro 2016.

- Cleary, S. A. (2005) *Sustainable drinking water treatment for small communities using multistage slow sand filtration*. Dissertação de Mestrado de Ciências Aplicadas a Engenharia Civil. University Of Waterloo, Ontario. 288p. Disponível em: <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/926>. Acessado em: 13 novembro 2016.
- Cleasby J.L. (1991). “Source water quality and pretreatment options for slow filters”. In: Logsdon, G.S. (ed.) *Slow Sand Filtration*. ASCE, New York, E.U.A., 69-100.
- CWH (no data). *Filter Project*. Disponível em: <http://cleanwaterforhaiti.org/programs/filter-program/>. Acessado em: 13 novembro 2016.
- DESEA (Org.). (2014) *Desea peru pvc biosand water filter construction and installation manual*. Sandy Hart, Perú, 18p.
- Devi, R., Alemayehu, E., Singh, V., Kumar, A., & Mengistie, E. (2008). “Removal of fluoride, arsenic and coliform bacteria by modified homemade filter media from drinking water”. *Bioresource technology*, **99**(7), 2269-2274.
- Di Bernardo, L.; Brandão, C.C.S., Heller, L. (1999). *Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas*. PROSAB, Rio de Janeiro, 114p.
- Di Bernardo, L. (Coord.) (2003). *Tratamento de água para abastecimento por filtração direta*. Rima, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/DiBernardo.pdf>. Acessado em: 10 maio 2016
- Donison, K. S. (2004). *Household scale slow sand filtration in the Dominican Republic*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Massachusetts institute of technology. 96p.
- Elliott, M. A., DiGiano, F. A., Sobsey, M. D. (2011). “Virus attenuation by microbial mechanisms during the idle time of a household slow sand filter”. *Water research*, **45**(14), 4092-4102.
- Elliott, M. A., Stauber, C. E., Koksal, F., DiGiano, F. A., & Sobsey, M. D. (2008). “Reductions of E. coli, echovirus type 12 and bacteriophages in an intermittently operated household-scale slow sand filter”. *Water research*, **42**(10), 2662-2670.
- Ellis, K. V., Wood, W. E. (1985). “Slow sand filtration”. *Critical Reviews in Environmental Control*, **15**(4), 315-354. Disponível em: <http://www.tandfonline.com.sci->

hub.io/doi/pdf/10.1080/10643388509381736?needAccess=true. Acessado em: 10 novembro 2016

- Emelko, M. B. (2003). "Removal of viable and inactivated *Cryptosporidium* by dual- and tri-media filtration". *Water Research*, **37**(12), 2998-3008.
- Flamming, H. (2002). "Biofilms in Biofiltration". In: H.-J. Rehm and G. Reed, A. Piihler, P. Stadler (ed.) *Biotechnology*, **11**, WILEY-VCH, Verlag GmbH, 446-455. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783527620968.ch21/summary>. Acessado em: 10 novembro 2016
- Fogel D., Isaac-Renton, J., Guasparini, R., Moorehead, W., Ongerth, J. (1993). "Removing *Giardia* and *Cryptosporidium* by slow sand filtration." *Journal of the American Water Works Association*. **85**(11), 77-84.
- Grabow W. (1996). Waterborne diseases: update on water quality assessment and control. *Water S.A.* **22**(2). 193-202. Disponível em: <http://journals.co.za/docserver/fulltext/waters/22/2/1885.pdf?expires=1479211754&id=id&accname=guest&checksum=C5B8249D2301826212CA279BA52C42F9>. Acessado em: 10 novembro 2016
- Haarhoff, J., Cleasby, J.L. (1991). "Biological and physical mechanisms in slow sand filtration". In: Logsdon, G.S. (ed.) *Slow Sand Filtration*. ASCE, New York, E.U.A., 19-68.
- Heber, J. "Household water treatment 2". *Technical brief No.59*. WEDC, Loughborough, UK, 105-108. Disponível em: <http://www.lboro.ac.uk/well/resources/technical-briefs/59-household-water-treatment-2.pdf> . Acessado em: 15 maio 2016.
- Hendricks, W.D., ASCE, Bellamy, M. (1991). "Microorganism Removals by Slow Sand Filtration". In: Logsdon, G.S. (ed.) *Slow Sand Filtration*. ASCE, Nova Iorque, E.U.A., 101-121.
- Hijnen, W. A. M., Schijven, J. F., Bonne, P., Visser, A., & Medema, G. J. (2004). "Elimination of viruses, bacteria and protozoan oocysts by slow sand filtration". *Water Science & Technology*, **50**(1), 147-154.

- Howard, G., Battram, J. (2003). *Domestic Water Quantity, Service Level and Health*. WHO. 39p.
Disponível em: http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/WSH03.02.pdf?ua=1
Acessado em: 2 maio 2016
- IBGE, (2014). “Moradores em domicílios particulares permanentes, por classes de rendimento mensal domiciliar, segundo a situação do domicílio e algumas características do domicílio - Brasil – 2014”. *Pesquisa nacional por amostra de domicílios*. IBGE, Rio de Janeiro.
Disponível em:
http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2014/brasil_defaultxls_brasil.shtm. Acessado em: 20 de maio de 2016.
- Jenkins, M. W., Tiwari, S. K., & Darby, J. (2011). “Bacterial, viral and turbidity removal by intermittent slow sand filtration for household use in developing countries: Experimental investigation and modeling”. *Water research*, **45**(18), 6227-6239.
- Letterman, R.D. (1991). “Operation and Maintenance”. In: Logsdon, G.S. (ed.) *Slow Sand Filtration*. ASCE, Nova Iorque, E.U.A. 149-164.
- Mara, D. D.; Feachem, R. G. A. (1999). “Water- and excreta-related diseases: Unitary environmental classification”. *Journal of Environmental Engineering*, **125**, 334-339.
Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd46/unitary.pdf>. Acessado em: 22 maio 2016
- McConnell, L.K., Sims, R. C. Barnett, B. B. (1984). Reovirus Removal and Inactivation by Slow-Rate Sand Filtration. *Applied and environmental microbiology*. **48**(4). 818-825.
- Mendonça, M.J.C, Motta, R. S. (2005) *Saúde e saneamento no brasil*. IPEA. Rio de Janeiro. 14p.
Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1081.pdf.
Acessado em: 15 maio 2016
- Murtha, N. A., Heller, L. (2003). “Avaliação da influência de parâmetros de projeto e das características da água bruta no comportamento de filtros lentos de areia”. *Engenharia sanitária e ambiental*, **8**(4), 257-267.
- Neri, M. C. (coord.) (2007). *Trata Brasil: saneamento e saúde*. FGV/IBRE, CPS. Rio de Janeiro. 163p.

- OMS (1974). *Slow sand filtration*. Organização mundial de Saude, Geneva. 122p
- OMS (2007). *Lucha contra las enfermedades transmitidas por el agua en los hogares*, OMS. 35p.
Disponível em: http://www.who.int/household_water/advocacy/combating_disease_es.pdf .
Acessado em: 12 novembro 2016
- OMS (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality*. WHO. 564p. Disponível em:
http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf. Acessado em: 2
maio 2016
- OMS (2013). *Household water treatment and safe storage: manual for the participant*. WHO
Western Pacific Regional. 131p. Disponível em:
http://www.wpro.who.int/environmental_health/documents/docs/Household_Water_Treatment_Safe_Storage_PARTICIPANT.pdf. Acessado em: 2 maio 2016
- OPAS (2001). *Água e Saúde*. Brasil. OPAS. 8p. Disponível em:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd57/água.pdf>. Acessado em: 20 maio 2016.
- OPAS (2005). *Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero*. OPAS, Lima.
59p. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/tecapro/documentos/água/167mejor-mejor.caliágua.pdf>. Acessado em: 25 maio 2016.
- OPAS (2011). *Agua y Saneamiento: Evidencias para políticas públicas con enfoque en derechos humanos y resultados en salud pública*. Washington, D. C.. 68p. Disponível em:
http://new.paho.org/tierra/images/pdf/agua_y_saneamiento_web.pdf. Acessado em: 10
novembro 2016.
- Palmateer, G., Manz, D., Jurkovic, A., McInnis, R., Unger, S., Kwan, K.K. and Dutka, B.J. (1999).
“Toxicant and parasite challenge of Manz intermittent slow sand filter”. *Environ. Toxicol.*,
14, 217–225.
- Pinto, N. O.; Hermes, L.C. (2006). *Sistema simplificado para melhoria da qualidade da água consumida nas comunidades rurais do semi-árido do Brasil*. Embrapa Meio Ambiente,
Jáguariúna. 47p. Disponível em:
http://www.cnpma.embrapa.br/download/documentos_53.pdf. Acessado em: 10 maio 2016.

- Poynter, S. F. B., & Slade, J. S. (1977). "The removal of viruses by slow sand filtration". *Progress in water technology*, 9(1), 75-88.
- Pyper, G. R., & Logsdon, G. S. (1985). "Slow sand filter and package treatment plant evaluation operating costs and removal of bacteria, Giardia and trihalomethanes". In *Slow sand filter and package treatment plant evaluation operating costs and removal of bacteria, Giardia and trihalomethanes*. EPA, Cincinnati, E.U.A. 197p.
- Pyper G.R., Logsdon, R.G (1991). "Slow Sand Filter Design". In: Logsdon, G.S. (ed.) *Slow Sand Filtration*. ASCE, Nova Iorque, E.U.A. 122-148.
- Sá, J. C. (2006). *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*. Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 173p. Disponível em: http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/3167/1/2006_Jazielli%20Carvalho%20S%C3%A1.pdf. Acessado em: 6 maio 2016.
- Santos, L.A.C,(1994). "Um Século de Cólera: Itinerário do Medo". *PHYSIS Revista de Saúde Coletiva*, 4(1) ,79-110.
- Smet, J.E.M Visscher, J.T.; Ginhoven, D.C.V; Ankersmit, W. (1988). *Community self-improvement in water supply and sanitation: a training and reference manual for community health workers, community development workers and other community-based workers*. IRC. Hague,. Disponível em: <http://www.ircwash.org/sites/default/files/201-88CO-5093.pdf>. Acessado em: 15 maio 2016.
- Soares, S.R.A., Bernardes, R.S., Cordeiro, N.O.M. (2002). Relações entre saneamento, saúde pública e meio ambiente: elementos para formulação de um modelo de planejamento em saneamento. *Caderno Saúde Pública*, 18(6), 1713-1724. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-311X2002000600026&lng=en. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-311X2002000600026>. Acessado em: 15 maio 2016.
- Stauber, C. E., Elliott, M. A., Koksal, F., Ortiz, G. M., DiGiano, F. A., & Sobsey, M. D. (2006). "Characterisation of the biosand filter for E. coli reductions from household drinking water

under controlled laboratory and field use conditions”. *Water Science & Technology*, **54**(3), 1-7.

Stukel, T.A., Greenberg, E.R., Dain, B.J., Reed, F.C., Jacobs, N.J. (1990). A longitudinal study of rainfall and coliform contamination in small community drinking water supplies. *Environ Sci Technol.* **24**. 571-575. Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es00074a610>. Acessado em: 15 maio 2016.

Taira, R. (2008). *Remoção de oocistos de Cryptosporidium na filtração lenta, precedida ou não de filtração ascendente em pedregulho*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 170p. Disponível em: http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/7220/1/2008_RaquelTaira.pdf Acessado em: 6 maio 2016.

Tiwari, S. K; Schmidt, W. P.; Darby1, J.; Kariuki, Z. G.; Jenkins, M. W. (2009). “Intermittent slow sand filtration for preventing diarrhoea among children in Kenyan households using unimproved water sources: randomized controlled trial”. *Tropical Medicine and International Health.* **14**(11), 1374–1382.

Wegelin, M. (1988). “Roughing gravel filters for suspended solids removal.” In: Graham, N. (ed.) *Slow Sand Filtration: Recent Developments in Water Treatment Technology*. Ellis Horwood Ltd, Inglaterra.

Young-Rojanschi, C., Madramootoo, C. (2014). “Intermittent versus continuous operation of biosand filters”. *Water research*, **49**, 1-10.

APÊNDICE A - CUSTOS DO MATERIAL DO FILTRO RAICAM

A.1 - Filtro Raicam

A tabela a seguir (tabela A.1) apresenta os preços dos componentes utilizados para a construção do filtro Raicam. Os preços apresentados estão aproximados e não estão incluídos os valores dos fretes, que aumentaram significativamente o preço final. O valor também aumentou pois construiu-se apenas uma unidade do filtro, podendo diminuir se for adotada uma maior escala de produção. É importante observar que os preços podem variar segundo a região e marcas adotadas.

Tabela A.1 - Preços e quantidades dos componentes do filtro Raicam

FILTRO RAICAM				
Material	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)	Observação
Tubo de PVC - 500 mm	1,30 metros	R\$ 176,30	R\$ 352,6	Mínimo vendido é 1 metro Pedido de São Paulo - Empresa Inbra Plásticos
Cap de PVC - 500 mm	1	R\$ 253	R\$ 253	Pedido de São Paulo - Empresa Inbra Plásticos
Tubo de PVC - 20 mm	2 metros	R\$ 1,51	R\$ 3,02	-
Cap de PVC - 20 mm	7	R\$ 0,78	R\$ 5,46	-
Adaptador soldável curto com bolsa e rosca para registro (20mm)	2	R\$ 0,36	R\$ 0,72	-
Adaptador soldavel com anel para caixa d'água (20 x ½")	2	R\$ 6,52	R\$ 13,04	-
Vedante de borrachas flexíveis e engates para água - 3 mm de	6	R\$ 10,50	R\$ 10,50	Valor do kit de

espessura.				borrachas
Adaptadores com flanges livres para caixa (25 x ¾")	1	R\$ 8,91	R\$ 8,91	-
Joelhos 90° (20 mm)	2	R\$ 0,29	R\$ 0,58	-
Tes (20mm)	7	R\$ 0,51	R\$ 0,51	-
Torneira boia	1	R\$ 22	R\$ 22	-
Caixa D'água	1	R\$ 50	R\$ 500	-
Areia de Granulometria entre 0,150 mm e 1 mm	110 quilos	R\$ 3,50	R\$ 385	Pedido de São Paulo - Empresa Petranova A quantidade de areia depende da densidade da areia utilizada.
Cola para PVC	175g	R\$ 8,99	R\$ 8,99	-
Tinta Esmalte	1litro	R\$ 30,00	R\$ 30,00	Possui apenas importância estética, sendo opcional.
TOTAL:		R\$ 1.627,23		

APÊNDICE B - CUSTOS DO MATERIAL DO FILTRO MOMUI

B.1 - Filtro Momui

A tabela a seguir (tabela B.1) apresenta os preços dos componentes utilizados para a construção do filtro Momui. Os preços apresentados estão aproximados e não estão incluídos os valores dos fretes, que aumentaram significativamente o preço final. O valor também aumentou pois construiu-se apenas uma unidade do filtro, podendo diminuir se for adotada uma maior escala de produção. É importante observar que os preços podem variar segundo a região e marcas adotadas.

Tabela B.1 - Preços e quantidades dos componentes do filtro Momui

FILTRO MOMUI				
Material	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total	Observação
Tubo de PVC - 350 mm	1,5 metros	R\$ 94,00	R\$ 188,00	Pedido de São Paulo - Empresa Inbra Plásticos
Cap de PVC - 350 mm	2	R\$ 142,80	R\$ 285,60	Pedido de São Paulo - Empresa Inbra Plásticos
Tubo de PVC - 200 mm	0,8 metros	R\$ 41,05	R\$ 41,05	Mínimo vendido é 1 metro
Cap de PVC - 200 mm	1	R\$ 98,51	R\$ 98,51	-
Borracha para Cap - 200 mm	1	R\$ 15,43	R\$ 15,43	-
Tubo de PVC - 20 mm	0,94 metros	R\$ 1,51	R\$ 1,51	Mínimo vendido é 1 metro
Cap de PVC - 20 mm	2	R\$ 0,78	R\$ 1,56	-
Adaptadores com anel para caixa (20 x 1/2")	2	R\$ 6,52	R\$ 13,04	-
Adaptador soldável curto com bolsa e rosca para registro (20 mm)	1	R\$ 0,36	R\$ 0,36	-

Vedante de borracha flexíveis e engates para água - 3 mm de espessura	6	R\$ 10,90	R\$ 10,90	-
Adaptadores com flanges livres para caixa (25 x ¾")	2	R\$ 8,91	R\$ 17,82	-
Flanges sextavado	2	R\$ 1,11	R\$ 2,22	-
Borracha para janela	1,2 metros	R\$ 4,20	R\$ 5,04	-
Joelhos 90° (20 mm)	3	R\$ 0,29	R\$ 0,87	-
Tes (20 mm)	2	R\$ 0,51	R\$ 1,02	-
Torneira	1	R\$ 2,17	R\$ 2,17	-
Cola para PVC	175g	R\$ 8,99	R\$ 8,99	-
Tinta Esmalte	1litro	R\$ 30,00	R\$ 30,00	Possui apenas importância estética, sendo opcional
Areia de Granulometria entre 0,150 mm e 1 mm	16 quilos	R\$ 3,50	R\$ 56,00	Pedido de São Paulo - Empresa Petranova A quantidade de areia depende da densidade da areia utilizada.
TOTAL:		R\$ 775,05		