



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO CEARÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E
GESTÃO AMBIENTAL**

**COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO ENTRE
SISTEMAS DE DUPLA FILTRAÇÃO CONVENCIONAL E DUPLA
FILTRAÇÃO DESCENDENTE PRESSURIZADA**

**Fortaleza
2018**

THIAGO DE NOROES ALBUQUERQUE

**COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO ENTRE
SISTEMAS DE DUPLA FILTRAÇÃO CONVENCIONAL E DUPLA
FILTRAÇÃO DESCENDENTE PRESSURIZADA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Tecnologia em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Professor. Dr. Francisco Maurício de Sá Barreto.

**Fortaleza
2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A345c Albuquerque, Thiago de Norões.
 COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO ENTRE SISTEMAS DE DUPLA FILTRAÇÃO
 CONVENCIONAL E DUPLA FILTRAÇÃO DESCENDENTE PRESSURIZADA / Thiago de Norões
 Albuquerque. - 2018.
 90 f.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental,
 Campus Fortaleza, 2018.
 Orientação: Prof. Dr. Francisco Mauricio de Sá Barreto.
1. Filtração modificada. 2. Tratamento de água. I. Título.

CDD 628

THIAGO DE NORÕES ALBUQUERQUE

COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO ENTRE SISTEMA DE
DUPLAFILTRAÇÃO CONVENCIONAL E DUPLAFILTRAÇÃO DESCENDENTE
PRESSURIZADA

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de
Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental
do Instituto Federal de Ceará como requisito para a
obtenção do título de Mestre em Tecnologia e
Gestão Ambiental.

Aprovada em 27/02/18

BANCA EXAMINADORA



Presidente Prof. Dr. Francisco Mauricio de Sá Barreto - Instituto Federal do Ceará



Membro Profa. Dra. Adriana Guimarães Costa - Instituto Federal do Ceará



Membro Profa. Dra. Ana Bárbara de Araújo Nunes - Universidade Federal do Ceará

AGRADECIMENTOS

À Deus, por todas as oportunidades em minha vida.

A Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) por todo auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

A Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

A meus amigos Wladya Maria Mendes de Oliveira, Enio Costa, Audi Costa, Pedro Ivo Santos, Daiane Gadelha, Regilla de Paulo, Regina Marrocos e tantos outros que fazem parte da minha vida.

Agradeço a minha família meus pais, avós, tia, primos e aos meus professores de mestrado por todos os ensinamentos.

Agradeço de forma especial ao meu orientador Professor Dr. Francisco Maurício de Sá Barreto, meu colega de pesquisa Emanuel Marcel e a banca examinadora Professora Dra. Adriana Guimarães Costa e Professora Dra. Ana Barbara de Araújo Nunes.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuem para o meu aprendizado.

RESUMO

Com o aumento da degradação da qualidade das águas armazenadas em mananciais e devido à necessidade de disponibilizar água tratada para a manutenção das atividades humanas, se busca elevar a eficiência dos métodos de tratamento de água para que possam atender os parâmetros de qualidade exigidos, despendendo o menor volume de recursos possível em sua utilização. O objetivo do trabalho foi comparar a eficiência de tratamento entre dois sistemas de dupla filtração convencional e de dupla filtração modificado por filtros pressurizados descendentes. Na pesquisa foram utilizados dois sistemas de filtração e comparado a eficiência da carreira de filtração, características de qualidade da água filtrada, volumes de água filtrada e volumes gasto na realização da retrolavagem. Com relação à carreira de filtração o sistema de dupla filtração convencional apresentou tempo de funcionamento superior à dupla filtração modificada em mais de 5 horas de funcionamento. Os resultados de turbidez para o sistema de dupla filtração convencional ao longo de toda a carreira de filtração se mantiveram dentro do exigido pela Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S. Em contra partida os resultados de turbidez para o sistema de dupla filtração modificada apresentou valores próximos ou superior ao máximo permitido de acordo com a mesma legislação. Para a avaliação da qualidade da água, entre os sistemas de filtração, foi identificado pouca variação de qualidade entre os parâmetros analisados. Através dos critérios estabelecidos na pesquisa, o sistema de dupla filtração convencional se demonstrou mais eficiente na potabilização de águas para abastecimento humano, uma vez que proporcionou uma maior quantidade de água tratada por carreira de filtração e os resultados de turbidez estiveram dentro do valor máximo permitido segundo a Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S.

Palavras-chave: Filtração modificada, Tratamento de água, Pressurização.

ABSTRACT

With the increasing degradation of the quality of the water stored in water resources and because of the need of treat water for a maintenance of the human activities, seeks to raise the efficiency of water treatment methods so that they can supply the quality requirements, while expending the least amount of resources available in its use. The objective of this work was to compare the treatment efficiency between two conventional double filtration systems and double filtration modified by downstream pressurized filters. In the research, two filtration systems were used, comparing filtration career efficiency, quality of filtered water, volumes of filtered water and volumes used to perform backwash. Regarding the filtering career, the conventional double filtration system showed a longer operating time than the double filtration modified in more than 5 hours of operation. The turbidity results for the conventional double filtration system over the entire filtration career were kept within the requirements of Consolidation Ordinance No. 5/2017 - annex XX / MS. Contrary to the turbidity results for the dual system filtration, even in the initial period, already presented values close to the maximum allowed according to the same legislation. For the evaluation of water quality, among the filtration systems, little quality variation was identified for the parameters analyzed. Through the tests established in the research, the conventional double filtration system has been shown to be more efficient in drinking water treatment for human supply, since it proposes a higher amount of treated water per filtration stroke and turbidity results according to a Consolidation Ordinance n 5/2017 - Annex XX / MS.

Keywords: Modified filtration, Water treatment, Pressurization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Sistema de abastecimento de água.....	13
Figura 2- Mecanismos de transporte no sistema de filtração	21
Figura 3- Mecanismos de aderência no sistema de filtração	23
Figura 4 - Estrutura de um filtro lento	24
Figura 5- Estrutura de filtros ascendentes	25
Figura 6- Configuração de filtro descendente de dupla camada	27
Figura 7- Visualização de diferentes esfericidade de grãos	33
Figura 8- Interferência da forma do grão nos valores de porosidade	35
Figura 9- Localização da estação de tratamento de água	38
Figura 10- Fluxograma das etapas da pesquisa realizado no laboratório - ETA Piloto (ETA Oeste).	40
Figura 11- Sistema de dupla filtração convencional em escala piloto	41
Figura 12- Sistema de dupla filtração modificada em escala piloto.	43
Figura 13- Bomba de pressurização da dupla filtração modificada	44
Figura 14- Croquis da entrada de água na unidade de filtração.	45
Figura 15- Croquis da saída da água de lavagem na unidade de filtração.	46
Figura 16- Dosagem dos químicos	47
Figura 17- Equipamentos de medição.....	49
Figura 18- Água de lavagem dupla filtração convencional do sistema piloto 2h de operação	50
Figura 19- Água de lavagem dos filtros pressurizados do sistema piloto 2h de operação.....	50
Figura 20- Valores de turbidez para a dupla filtração convencional.....	52
Figura 21- Valores de turbidez para o sistema de filtração pressurizada.	57
Figura 22- Perda de carga no sistema de dupla filtração convencional.	61
Figura 23- Perda de carga na dupla filtração modificada em cinco carreiras de filtração.	64
Figura 24- Gráfico de turbidez da água de lavagem do filtro ascendente.....	70
Figura 25- Turbidez da água de lavagem do filtro descendente	71
Figura 26- Turbidez da água de lavagem dos filtros pressurizados	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Estruturas de captação de água	16
Quadro 2- Padrões de qualidade para tratamentos	19
Quadro 3- Indicativo da utilização da tecnologia de tratamento	20
Quadro 4- Características das unidades de filtração.	27
Quadro 5- Características dos filtros da dupla filtração convencional em escala piloto.	42
Quadro 6- Características dupla filtração modificada em escala piloto	44
Quadro 7- Valores de Turbidez no Sistema de Dupla Filtração Convencional.	55
Quadro 8- Valores de turbidez no sistema de dupla filtração pressurizado	58
Quadro 9- Valores de perda de carga no sistema de dupla filtração convencional em três carreiras de filtração.....	62
Quadro 10- Valores de perda de carga no sistema de dupla filtração pressurizado em cinco carreiras de filtração.....	65
Quadro 11- Características de qualidade da água bruta do Açude Gavião.	66
Quadro 12- Características de qualidade da água tratada e valores de potabilidade segundo Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX.....	67
Quadro 13- Valores de turbidez e volume de água de lavagem dos filtros do sistema de dupla filtração convencional, durante o período de uma carreira de filtração.....	69
Quadro 14- Valores de turbidez e volume de água de lavagem dos filtros do sistema de dupla filtração modificada, durante o período de duas carreira de filtração.....	72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS.....	10
2.1 Geral.....	10
2.2 Específicos.....	10
3 REFERENCIAL TEÓRICO	11
3.1 Parâmetros de qualidade de água.....	12
3.2 Etapas do abastecimento de água	13
3.2.1 <i>Manancial de água</i>	14
3.2.2 <i>Captação de água</i>	16
3.2.3 <i>Adutoras de água bruta e água tratada</i>	17
3.2.4 <i>Estação de tratamento de água</i>	18
3.3 Processos de tratamento de água	19
3.4 Mecanismos de filtração	21
3.5 Filtros Lentos.....	24
3.6 Filtros rápidos Ascendentes.....	25
3.7 Filtros rápidos descendentes.....	26
3.8 Filtros sob pressão	29
3.9 Dupla filtração	30
3.10 Características do meio filtrante	31
3.10.1 <i>Tamanho do grão</i>	31
3.10.2 <i>Esfericidade</i>	32
3.10.3 <i>Densidade</i>	34
3.10.4 <i>Porosidade</i>	34
3.10.5 <i>Dureza</i>	35
3.10.6 <i>Solubilização em Ácido Clorídrico e Hidróxido de Sódio</i>	36
3.10.7 <i>Perda de Carga</i>	37
4 METODOLOGIA	38
4.1 Área de estudo	38
4.2 Descrição dos sistemas de filtração em escala piloto	39
4.3 Condições operacionais.....	47
4.3.1 <i>Dupla filtração convencional</i>	47
4.3.2 <i>Dupla filtração modificada</i>	48
4.3.3 <i>Carreira de filtração</i>	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 Turbidez dos sistemas de dupla filtração convencional	52
5.2 Turbidez dos sistemas de dupla filtração modificado	56
5.3 Perda de carga nos sistemas de dupla filtração convencional	60
5.4 Perda de carga nos sistemas de dupla filtração modificado	63
5.5 Variação da qualidade de água entre os sistemas de filtração	66
5.6 Produção de água e curva de saída do lodo no sistema de dupla filtração convencional	69
5.7 Produção de água e curva de saída do lodo no sistema de dupla filtração modificada ..	71
6 CONCLUSÕES	74
7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	76
REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Com o rápido crescimento populacional existente nas grandes cidades uma maior demanda por água dos mananciais vem sendo solicitada pelas populações. Essas águas devem possuir qualidade e quantidade satisfatórias para o desenvolvimento das atividades humanas, compatibilizando sua utilização para diversas finalidades como recreação, agricultura, utilização industrial, entre outros usos.

Em virtude da expansão urbana desordenada maiores são as pressões existentes sobre os mananciais próximos a essas regiões. Os mananciais superficiais passam a sofrer diversos impactos provenientes do aporte de efluentes domésticos, remoção da mata ciliar, deposição de resíduos sólidos, o que provoca redução dos volumes e da qualidade existente nos corpos de água. Em condições de pobreza somada as flutuações climáticas e o mau uso do solo potencializa-se a degradação da qualidade da água e redução de sua oferta, aumentando o conflito pela utilização dos recursos hídricos (COSTA *et al.*, 2016).

Nesse contexto, o sistema de abastecimento trabalha de modo a suprir as demandas de água existentes, assegurando a todos água em condição de quantidade e qualidade satisfatórias para o desempenho de suas atividades (BRASIL, 2017).

A escolha da tecnologia de tratamento a ser empregada na potabilização das águas se encontra diretamente relacionada às respectivas características qualitativas da água do manancial (BRASIL, 2005). Para águas com excelente qualidade, sistemas mais simplificados e de menor custo podem ser utilizados, mas à medida que a qualidade da água bruta se torna reduzida, tecnologias mais complexas e de maior custo financeiro são requeridas, podendo em alguns casos específicos se tornar economicamente inviável à exploração de um manancial (REIS, 2016).

De acordo com a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH, 2016), o município de Fortaleza apresenta redução da qualidade das águas superficiais utilizadas para o abastecimento da população, decorrente do prolongado período de escassez hídrica, fator esse que ocasiona a redução dos volumes e da qualidade de água armazenada nos açudes da região.

Em virtude dos problemas naturais existentes e da dificuldade do sistema de tratamento atual em manter a qualidade da água exigida pela Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ Ministério da Saúde, que dispõem sobre os padrões de potabilidade de água para abastecimento, novas tecnologias de tratamento são estudadas com o intuito de aperfeiçoar a eficiência do tratamento e reduzir os custos operacionais.

Tecnologias modificadas baseadas no processo de dupla filtração convencional

vêm ganhando espaço pelos bons resultados obtidos, alguns exemplos são: dupla filtração por filtros ascendentes estudada por Machado e Sens, por filtros pressurizados ou por filtros de lavagem contínua estudados respectivamente por Lima e Capelo neto, Machado e Sens, tais tecnologias em escala piloto quando testadas apresentaram bons resultados de qualidade e quantidade de água produzida, sendo indicadas como tratamento de águas para abastecimento público.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

- Analisar se a água tratada por um sistema de dupla filtração modificado em escala piloto, composto por dois filtros descendentes pressurizados, apresenta qualidade superior ao tratamento por dupla filtração convencional.

2.2 Específicos

- Verificar se a tecnologia de dupla filtração modificada atende aos parâmetros de qualidade requeridos para o tratamento de água para o abastecimento humano apresentados na Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S;
- Analisar a duração das carreiras de filtração e o consumo de água utilizada para a retrolavagem das unidades de filtração.
- Avaliar a produtividade do sistema proposto em comparação ao sistema de dupla filtração convencional.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com a Portaria de Consolidação nº 5/2017 - M.S, capítulo II art 5º, entendessemos como sistema de abastecimento de água o conjunto de obras, serviços e equipamentos destinados a captar, aduzir, tratar e disponibilizar água em quantidade e com qualidade satisfatória aos seus consumidores. A função principal desses sistemas sejam esses de natureza pública, privada ou mista é assegurar um serviço apropriado de abastecimento de água maximizando a eficiência na gestão dos recursos hídricos promovendo uma infraestrutura de abastecimento eficiente e eficaz (ALEGRE *et al.*, 2004).

Os sistemas de abastecimento de água se configuram como a solução coletiva mais eficiente e econômica para abastecimento de água de uma comunidade permitindo expansão do sistema, onde no momento inicial o projeto contempla a situação atual e a possibilidade de futura expansão mediante o crescimento da densidade demográfica (YOSHIMOTO, 2015). Em locais que apresentam inexistência desses sistemas, baixos índices de cobertura ou mesmos que apresentam elevada incidência de problemas operacionais, os riscos associados ao consumo de águas impróprias se torna alto, e muitas vezes a população opta por buscar fontes complementares para abastecimento de água intensificando seus riscos ao consumirem água em condições inadequadas (SILVA *et al.*, 2016). Com o objetivo de minimizar os problemas operacionais: baixa eficiência do processo de distribuição, consumo excessivo de água, reclamação dos usuários, e favorecer uma disponibilização adequada de água, vêm se desenvolvendo ferramentas de melhorias operacionais que atuem sobre as principais necessidades existentes no sistema (SILVA, CAMPOS e SANTOS, 2016).

Para Araujo *et al.*, (2016), a região nordeste apresenta desempenho geral considerado satisfatório em relação ao índice de cobertura de água disponibilizado pelos sistemas de abastecimento com base nas informações apresentadas no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, porém, dentre os Estados que compõem essa região identifica-se uma elevada desproporcionalidade de cobertura, além de diversos outros problemas operacionais no sistema de abastecimento, como vazamentos em rede e ramais e consumo não faturado entre outros elencados pelos autores em seu trabalho.

Em estudo desenvolvido no município Juazeiro do Norte-Ceará foi verificado que mesmo dispondo-se de toda uma estrutura de abastecimento instalada, que atende a 84,93% do município, em uma análise de 12 meses o parâmetro Coliformes totais esteve fora dos padrões permitidos na maioria dos meses avaliados, demonstrando a necessidade de intensificação do monitoramento das águas distribuídas a população (ALVES *et al.*, 2017).

3.1 Parâmetros de qualidade de água

Segundo Funasa (2014), diferentes parâmetros físicos, químicos e biológicos são utilizados como indicadores da qualidade da água para representar uma diversidade de processos que se desenvolvem no corpo hídrico, através dos parâmetros é possível estabelecer critérios de qualidade e utilizações que podem ser previstas para a mesma.

Dentre os parâmetros físicos aqueles que mais apresentam destaque no monitoramento da qualidade da água e para a escolha da tecnologia de tratamento a ser utilizada são: Cor e turbidez (LIBANIO, 2008).

A cor pode ser dividida em verdadeira quando manifestada através de compostos naturais dissolvidos na amostra ou aparente quando sua coloração é modificada por intermédio de dissolução de compostos provenientes da ação antrópica como descarga de efluentes e lixiviação de resíduos (LIBANIO, 2008).

De acordo com Santos e Sampaio (2009), nos mananciais superficiais em espacial no açude gavião em Fortaleza onde foi desenvolvida a pesquisa o parâmetro cor tende a se elevar quando do momento de precipitações, segundo os autores esse acréscimo de valor ocorre devido o maior contato da água com diferentes materiais de origem mineral e vegetal além de substâncias húmicas presentes na região.

Em relação ao parâmetro turbidez a Portaria de Consolidação nº 05/2017 apresenta os valores máximos permitidos para a garantia da qualidade de água disponibilizada para abastecimento humano. Segundo a Portaria valores muito elevados acima de 0,5 uT na saída dos sistemas de filtração rápido podem vir a dificultar o processo de desinfecção comprometendo a eficiência de tratamento.

Dentre os parâmetros químicos que influenciam no processo de tratamento e na qualidade de água distribuída a população temo: pH, dureza, cloretos, amônia, nitrito, nitrato, sulfatos, dentre outros analisados segundo a recomendação fornecida pela Portaria de Consolidação nº 05/2017.

Valores de pH muito baixos podem causar problema de corrosão de estruturas maquinas e equipamentos, valores muito elevados podem causar processos de incrustação. O controle do pH em uma faixa aceitável entre 6,5 e 9,5 assegura a manutenção da boa qualidade das estruturas do sistema de abastecimento além de assegurar uma boa eficiência dos processos de coagulação e floculação que necessitam de um controle mais atuante do pH para manutenção da qualidade do processo (Funasa, 2014).

Com relação aos parâmetros nitrito e nitrato, estes por sua vez estão associados a

problemas de saúde quando consumidos em grande quantidade, problemas gastrointestinais e anemias são os mais comumente associados ao seu consumo sendo assim de interesse da saúde pública regular os limites máximos desse composto na água de abastecimento (KINDELIN, 2010).

Os demais parâmetros como: dureza, sulfatos, amônia, cloretos, são apresentados na Portaria de Consolidação nº 05/2017 como organolépticos estando associados ao desejo ou rejeição de uma população ao consumo de uma água mediante a variação de concentração desses. Tais parâmetros quando discrepante dos valores recomendados pela portaria pode ocasionar uma rejeição da água por parte da população mesmo que essa não apresente qualquer risco ao ser consumida.

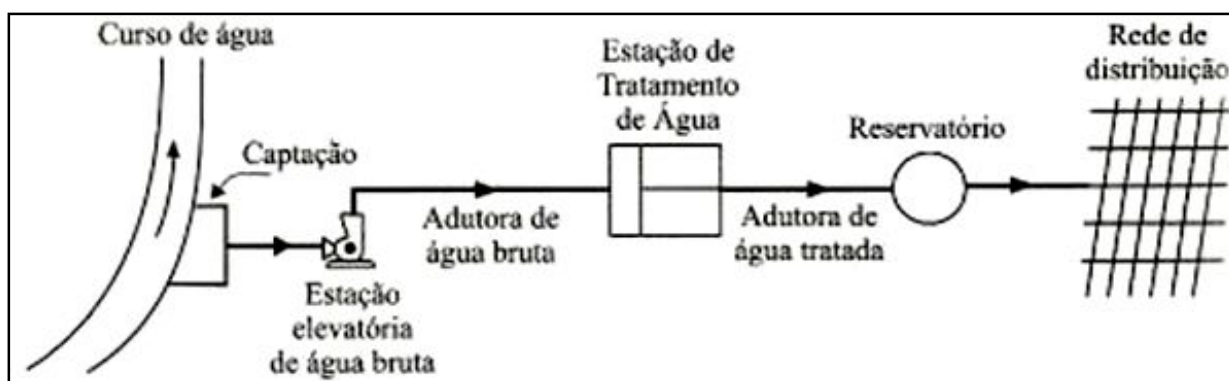
Dentre os parâmetros biológicos avaliados no processo de tratamento, a Portaria de Consolidação nº 05/2017 apresenta os Coliformes totais e *Escherichia coli* como indicadores da qualidade de água, sendo requerida sua ausência na saída do tratamento para que a mesma esteja apta ao consumo humano.

De acordo com a Cagece (2018), parâmetros como: turbidez, cor, flúor, Coliformes totais, *Escherichia coli* são avaliados a cada duas horas de operação para atestar a eficiência do sistema e a qualidade da água distribuída. Outros parâmetros como: dureza, cloretos, alcalinidade são avaliados de forma semanal.

3.2 Etapas do abastecimento de água

De forma geral, os sistemas de abastecimento de água são compostos de diversas unidades entre as quais podem se citar (Figura 01): manancial, captação, estação elevatória de água bruta, adutora de água bruta, estação de tratamento de água, adutora de água tratada, reservatório e rede de distribuição (AMORIM, 2016 e SORIANO, 2016).

Figura 1- Sistema de abastecimento de água



Fonte: TSUTIYA (2006).

Cada etapa do sistema de abastecimento durante sua operação apresenta um conjunto de dispositivos integrados à unidade que auxilia no atendimento das demandas solicitadas. Entretanto, devido ao processo de operação regular torna-se recorrente o surgimento de problemas nesses dispositivos, incitando assim uma busca contínua de um melhor gerenciamento que possa fornecer maior confiabilidade operacional aos dispositivos utilizados (SOUZA *et al.*, 2015).

3.2.1 Manancial de água

De acordo com a Fundação Nacional de Saúde - FUNASA (2014), os mananciais são considerados todas as fontes de água superficiais, subterrâneas e águas de chuva, que podem ser utilizadas no abastecimento de água para consumo humano. Em áreas em que existe um elevado crescimento urbano e consequentemente elevado consumo de água, é necessário que a disposição final dos efluentes gerados deva ocorrer após seu tratamento, de modo que não venham a comprometer a qualidade dos mananciais quando dispostos nesses (GIATTI, 2007).

Os mananciais podem ser agrupados em dois segmentos: os mananciais superficiais - rio, lago, represa e cisterna; e os mananciais subterrâneos - poços rasos ou profundos (FUNASA, 2014).

O abastecimento de uma região pode ser realizado por um único manancial conforme verificado nos estudos de Silva e Tozi (2016), que observaram para o município de Santa Helena, no Estado do Maranhão, abastecimento somente por manancial subterrâneo ou abastecimento por mais de um manancial, como no caso do município do Oiapoque no Estado do Amapá que apresenta abastecimento por manancial superficial e subterrâneo respectivamente com capacidade de atendimento de 30% e 70% da população (SOARES, BRARYMI, PALHARES, 2015).

As características físico-químicas e biológicas de um manancial superficial destinado a abastecimento estão diretamente ligadas à carga poluidora que esse recebe durante seu curso, por ação antrópica ou natural, de modo que na presença de valores superiores ao limite máximo permitido algumas utilizações podem ficar comprometidas (THOMAS *et al.*, 2016 e CORREIO *et al.*, 2016). Do mesmo modo, os mananciais subterrâneos também terão as características de suas águas influenciadas por algumas condições entre essas a composição do terreno e da rocha no qual se encontram (NUNEZ-GOMES *et al.*, 2016).

Segundo Costa *et al.*, (2015), o lançamento de esgotos domésticos não tratados nos

ambientes acabam por reduzir a qualidade das águas subterrâneas, mas principalmente a qualidade dos mananciais superficiais: rios e lagos pela maior exposição dessas águas aos contaminantes. Rocha e Nishio (2016), corroboram com a ideia de maior exposição dos mananciais superficiais alegando que, entre outras fontes de poluição, sua contaminação pode ocorrer por irrigação agrícola, disposição incorreta de efluentes, resíduos sólidos e compostos como hidrocarbonetos. Para Conceição (2015), uma fonte comum de contaminação de manancial subterrâneos são os cemitérios, que através do necrochorume, rico em nutrientes, reduz a qualidade das águas quando infiltram no solo.

Dentre os parâmetros que interferem no tratamento da água e apresentam relação intrínseca com a água presente no manancial podem se citar a cor, que pode ser de origem natural por ferro ou manganês dissolvido ou decorrente da decomposição de material vegetal e turbidez, decorrente de partículas finamente divididas como areais e siltes (LEIRA *et al.*, 2017). Segundo Soares *et al.*, (2016), altos valores de cor e turbidez estão associados a elevada concentração de coliformes o que pode vir a dificultar a eficiência dos processos de desinfecção. Araujo, Freitas e Baggio Filho (2016), apresentam a turbidez e cor como um mecanismo indicador de qualidade da água, para altos valores desses parâmetros maiores serão os custos com o tratamento das águas. Além dos processos e parâmetros já citados outras características naturais também podem gerar redução da qualidade das águas em mananciais, como a presença excessiva de algas e matéria orgânica presentes nos ambientes (PAIXÃO, SILVA e ANDREOLAR, 2015).

Dentre os métodos utilizados para reduzir a degradação dos mananciais são propostos a manutenção e a ampliação da cobertura vegetal próximo aos reservatórios, maior realização de avaliações de qualidade da água e adoção de normas que passem a promover o controle e proteção dos recursos hídricos (GARDIMAN JUNIOR e SIMOURA, 2015 e CORRÊA, 2015).

Segundo Santos e Caldeira (2016), outras medidas podem ser adotadas para manutenção da qualidade das águas presentes no manancial: zoneamento das áreas de expansão urbana, manutenção da fauna e flora, proteção da mata ciliar, controle dos processos erosivos e de assoreamento dos rios, além de introduzir sistemas de tratamento de efluente. Entretanto, com o objetivo de proteger os mananciais pode ser necessário ainda a adoção de medidas combinadas pela qual as condições de qualidade das águas possam ser adequadamente asseguradas (PINTO, 2016).

3.2.2 Captação de água

A unidade de captação consiste no conjunto de estruturas ou dispositivos moveis ou fixos construídos ou instalados junto ao manancial, para a tomada de água que ira suprir o sistema de abastecimento (CAETANO e FRANCISCO, 2016) (Quadro 01).

Quadro 1- Estruturas de captação de água

Tipo de captação	Utilização
Superfície de coleta	Água de chuva
Caixa de tomada	Nascente de encosta
Tomada direta	Rios, lagos e açudes
Galeria filtrante	Fundo de vale
Poço escavado	Lençol freático
Poço tubular profundo	Lençol subterrâneo

Fonte: FUNASA (2006).

Segundo a Fundação Nacional de Saúde (2006), na captação o conjunto de equipamento e instalações adotados deve atender as demandas da população ao longo do horizonte de projeto, assegurando os volumes mínimos necessários para o desempenho das atividades previstas.

Em determinados períodos de seca, em função da redução dos volumes de água nos mananciais, a captação pode vir a ser prejudicada por isso podem vir a ser adotadas estruturas de barramentos com o intuito de facilitar a captação, como no município de Uberaba que dispõem de um barremento para elevação do nível da água (SILVA, 2016). De acordo com Castro *et al.*, (2014), as estruturas de barramento, através do acúmulo de água, permitem a constante recarga dos aquíferos através de percolação a qual só ocorreria, sem essa estrutura, em períodos chuvosos. Desse modo, é interessante que a estrutura a ser implantada na captação das águas entenda a dinâmica entre as águas superficiais e subterrâneas (CASTRO *et al.*, 2014).

Assim, mediante o tipo de captação a ser utilizado, algumas condições devem ser verificadas antes de sua implantação, como por exemplo, para poços deve ser verificado as características de exploração do aquífero, existências de restrições hidrogeológicas e a qualidade da água (SILVA, MONTEIRO e FRANÇA, 1999). Já na utilização de superfícies de coleta se torna importante avaliar as características do reservatório, sua proteção sanitária,

condição das tubulações de transporte e cumprir o procedimento de operação recomendado para se obter águas com qualidade satisfatória (ANDRADE NETO, 2016).

3.2.3 Adutoras de água bruta e água tratada

As adutoras são tubulações normalmente sem derivações que transportam água entre dois pontos do sistema de abastecimento, sendo a adutora de água bruta a ligação entre a captação e o tratamento e adutora de água tratada, o trecho entre tratamento e à rede de distribuição (YOSHIMOTO, 2015).

Segundo Caetano e Francisco (2016), existem diferentes formas de classificação das adutoras, as mais comuns são as seguintes:

- Quanto à natureza da água transportada
 - I. Adutora de água bruta: transportam água sem tratamento.
 - II. Adutora de água tratada: transportam água após a etapa de tratamento.
- Quanto à energia para movimentação do líquido
 - I. Adutora por gravidade: a água é transportada de uma cota mais alta para uma cota mais baixa por conduto livre ou forçado estando submetida a pressões maiores ou menores que a atmosférica.
 - II. Adutora por recalque: a água é transportada de uma cota menor a uma cota maior através de bombeamento onde a água fica submetida a pressões maiores que a atmosférica.
 - III. Adutora mista: apresenta trechos por recalque e trechos por gravidade.

De acordo com a Fundação Nacional de Saúde (2006), os principais materiais utilizados na fabricação das adutoras são: pvc de alta pressão, ferro fundido, aço soldado, concreto armado, fibra de vidro e polietileno de alta densidade. Segundo Souza (2014), tubulações de concreto armado, PVC e polietileno de alta densidade são indicados para adutoras de baixa pressão ou condutos livres. Já para pontos de maior pressão e vazão ou locais com grandes quantidades de interconexões são indicados tubos de aço e ferro fundido (SOUZA, 2014). As adutoras são estruturas que apresentam ainda grandes diâmetros como

pode ser observado nos estudos de Firmino *et al.*, (2006), com adutoras no município de Campina Grande, no Estado da Paraíba, com diâmetros de 900mm a 1.100 mm para adutoras de água bruta e 800mm a 900mm para adutoras de água tratada.

3.2.4 Estação de tratamento de água

A estação de tratamento tem o objetivo de melhorar as condições físicas, químicas, biológicas e organolépticas das águas adequando sua qualidade ao uso destinado (FUNASA, 2014). Os processos químicos e físicos que realizam o tratamento das águas estão distribuídos em diversas unidades, sendo as mais comuns: aeração, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção (SOUZA, 2014). Segundo Souza (2007), a escolha das operações e técnicas que irão compor o tratamento utilizado na potabilização das águas é previamente definida com base nos estudos de qualidade das águas.

De acordo com Oliveira (2016), os processos de tratamento podem ser divididos em tratamento convencional (ciclo completo) ou tratamento simplificado. Tratamento de ciclo completo apresenta os processos de clarificação: coagulação, floculação, decantação ou flotação e as unidades de filtração e desinfecção (LOPES, 2008). Segundo o mesmo autor, a vantagem de operação de unidades com esse arranjo é que as etapas do processo são independentes, de modo que a falha em uma unidade pode ser mais facilmente amenizada nas etapas posteriores (LOPES, 2008). Para Katayama (2012), o sucesso do tratamento de água por ciclo completo está intimamente ligado a aplicação de produtos químicos, como sais de alumínio e ferro, que são capazes de desestabilizar as partículas ali presentes permitindo sua remoção ao longo das etapas do tratamento.

O tratamento simplificado pode ser definido como o processo de clarificação da água por meio do processo de filtração direta, desinfecção e correção de pH quando necessário (BRASIL, 2005). Segundo Boitrago *et al.*, (2016), a maior vantagem dos sistemas de tratamento simplificados está na redução dos custos de construção e operação do sistema. Já para Ramos (2016), o tratamento simplificado surge como uma opção para o abastecimento de pequenas localidades e núcleos populacionais que apresentam água com boas condições de qualidade, necessitando de menores dosagens de produtos químicos em seu tratamento.

Para Silva, Sá e França (2014), o tratamento simplificado composto por filtração direta e cloração foi uma solução técnica satisfatória aplicada na potabilização das águas distribuídas a um município do sudoeste mineiro atendendo plenamente os requisitos de qualidade necessários.

3.3 Processos de tratamento de água

O tratamento de água procura adequar as características da água bruta captada aos padrões de potabilidade para consumo humano, considerando o menor custo possível (REIS, 2016). Nesse sentido, parâmetros de controle da qualidade como turbidez, coliformes totais, cloro residual livre, dentre outros, apresentam significativa importância no controle operacional e na escolha da tecnologia de tratamento (REIS, 2016).

Segundo Di Bernardo e Paz (2010) as principais tecnologias de tratamento de água são:

- Convencional ou Ciclo Completo;
- Filtração em Múltiplas Etapas;
- Filtração Direta Descendente;
- Filtração Direta Ascendente;
- Floto Filtração;
- Dupla Filtração.

Tais tecnologias de tratamento são comumente utilizadas de acordo com os parâmetros de qualidade de água bruta apresentados no Quadro 2.

Quadro 2- Padrões de qualidade para tratamentos

Parâmetros	Tecnologia de tratamento				
	Convencional	Filtração Direta Ascendente	Filtração Direta Descendente	Floto Filtração	Dupla Filtração
Turbidez (uT)	<3000	<20	<100	<100	<200
Cor aparente (uC)	<1000	<20	<50	<50	<100
Escherichia coli (NPM/100 ml)	<10 ⁶	<10 ³	<10 ³	<10 ³	<5.10 ³
Algas (UPA/100ml)	<10 ⁵	<10 ³	<5.10 ²	<5.10 ²	<10 ³

Fonte: Adaptado de Kawamura (2000).

Para Libânio (2008), as tecnologias de tratamento de água podem ser descritas em quatro arranjos de acordo com o tipo de unidade de tratamento utilizado:

- Tecnologia de Filtração Lenta: pré-filtração, filtração lenta, desinfecção, correção de pH e fluoretação;
- Tecnologia de Filtração Direta em Linha: coagulação, filtração ascendente ou descendente, desinfecção, correção de pH e fluoretação;
- Tecnologia Filtração direta: coagulação, floculação, filtração ascendente ou descendente, desinfecção, correção de pH e fluoretação;
- Tecnologia de Tratamento Convencional: coagulação, floculação, decantação ou flotação, filtração ascendente ou descendente, desinfecção, correção de pH e fluoretação.

A utilização das tecnologias de tratamento indicada para cada classe de água encontra-se definida na Resolução Conama 357/2005 mediante a qualidade da água bruta apresentada pelo manancial, identificando-se como imprópria a utilização de água classificada como Classe IV para o abastecimento humano (Quadro 3).

Quadro 3- Indicativo da utilização da tecnologia de tratamento

Uso das Águas Doces	Classes de Enquadramento CONAMA 357/2005				
	Especial	I	II	III	IV
Abastecimento para consumo humano	Desinfecção	Tratamento Simplificado	Tratamento Convencional	Tratamento Convencional ou Avançado	-

Fonte: Adaptado de Conama 357 (2005).

Outras variações de sistema ou de seus componentes vem sendo estudadas a o longo dos anos, com o objetivo de melhorar e atender as novas necessidades de qualidade de água. elaboração de modelos de tratamento híbridos com ultrafiltração, utilização de métodos alternativos aos produtos químicos na desinfecção, com a utilização de sistemas ultravioleta para minorar a formação de subprodutos, utilização de carvão ativado modificado nos processos de filtração com o princípio antimicrobiano, utilização de filtros com resinas fenólicas para remoção de pesticidas da água, entre outros (CHEW *et al.*, 2017; SHEN *et al.*, 2016; ARAKAWA *et al.*, 2014 e BUSQUETS *et al.*, 2016).

Devido à diversidade de tecnologias de tratamento de água a seleção do sistema ideal a ser implantado torna-se uma tarefa complexa, nas quais diferentes variáveis tais como: qualidade da água bruta, qualidade exigida da água tratada, condições econômicas,

flexibilização operacional, entre outros, devem ser consultadas para que a melhor opção seja adotada (CASTRO, 2015).

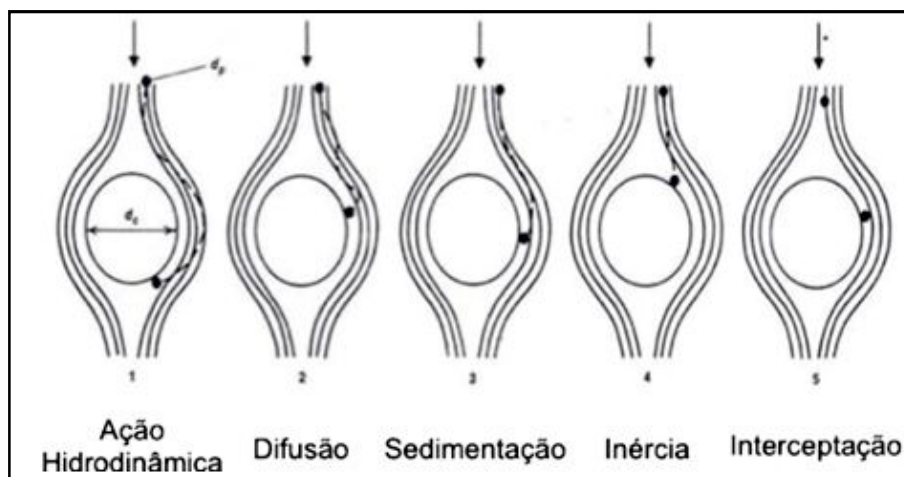
3.4 Mecanismos de filtração

A filtração é utilizada para a remoção de impurezas que estejam contidas na água através de sua passagem por uma matriz filtrante, que pode ser constituído por um ou mais materiais (FREITAS, 2011). No processo de filtração, a remoção das partículas que conferem cor e turbidez as águas ocorrem por mecanismos físicos e químicos, que se desenvolvem em seu leito filtrante (LIBÂNIO, 2008).

Para Libânio (2008), os mecanismos podem ser divididos em:

- Mecanismos de Transporte: coagem, sedimentação, interceptação, difusão, forças hidrodinâmicas e impacto inercial (Figura 2).

Figura 2- Mecanismos de transporte no sistema de filtração



Fonte: Amirtharajah (1988).

- I. Coagem: processo que promove a retenção de partículas com diâmetro superior a 0,15 vezes o diâmetro efetivo do leito filtrante. As partículas ficam retidas nos espaços vazios presentes no leito filtrante (HUISMAN, 1982).
- II. Sedimentação: processo de retenção de partículas suspensas densas com diâmetro superior a 10 μm que se deslocam em regime laminar sofrendo efeito da gravidade e ficam retidas em zonas de baixa agitação (MURTHA, 1998).

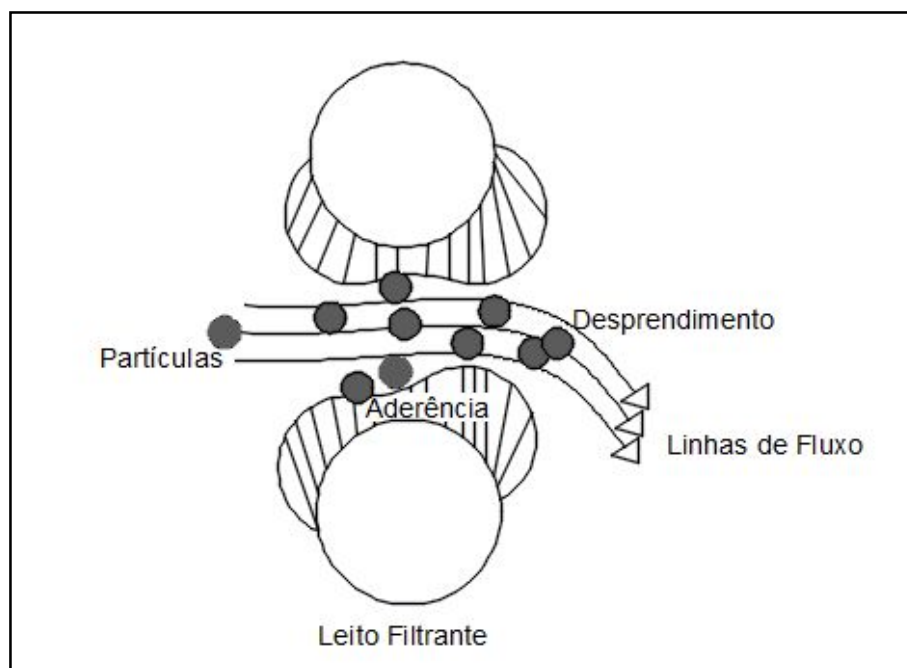
- III. Intercepção: processo de retenção de partícula que se desloca em uma linha de fluxo tangencial a superfície em que após o contato com o leito filtrante fica retida (MURTHA, 1998).
- IV. Difusão: processo de retenção de partículas que sofrem pequenas modificações de trajetória devido a variações térmicas da água que promovem a colisão entre partículas e o leito filtrante (VARGAS, 1992).
- V. Forças Hidrodinâmicas: processo de retenção de partículas que apresentam um gradiente de velocidade constante e são submetidas a velocidades tangenciais diferentes promovendo um movimento rotacional retraindo as partículas quando colidem com o leito filtrante (MURTHA, 1998).
- VI. Impacto Inercial: processo de retenção de partículas que sofrem efeito da bifurcação de linhas de fluxo que intensificam a colisão dessas com o leito filtrante (VARGAS, 1992).

Em decorrência do regime de escoamento imposto na unidade de filtração, as partículas dispersas no meio possuem caráter de fluxo laminar e deslocamento no sentido da corrente (FRANCO, 2015). Através dos mecanismos de transporte, para que ocorra a efetiva retenção das partículas dispersas no fluxo, é necessário que ocorra desvio de sua trajetória original até o leito filtrante, com porosidade compatível, em que o diâmetro da partícula e as forças existentes possam se equilibrar resultando em sua retenção (FRANCO, 2015). O princípio da remoção das partículas é diretamente afetado pela porosidade do elemento filtrante, onde as partículas com diâmetro maior que o elemento filtrante ficam retidas no sistema (MULLER, 2016).

- Mecanismos de Aderência: forças de Van der Waals, forças eletrostáticas e pontes químicas.

Com relação aos mecanismos de aderência, conforme observado na figura 3, esses ocorrem quando a força de cisalhamento é inferior às forças de aderência, fazendo com que as partículas fiquem retidas (MULLER, 2016). O contato entre as partículas dispersas no meio e o leito filtrante cria forças de atração elétrica que permite a aglomeração de demais partículas, favorecendo assim a retenção de partículas menores que o tamanho dos poros (ALVITO, 2010).

Figura 3- Mecanismos de aderência no sistema de filtração



Fonte: Adaptado de Amirtharajah (1988).

- I. Forças de Van Der Waals: Processo de retenção de partículas através de interações intermoleculares fracas que quando submetidas às elevadas forças de cisalhamento se desfazem (MENDÉZ, 2014).
- II. Forças Eletrostáticas: Processo de retenção de partículas através da interação de suas cargas e distância entre as mesmas.
- III. Pontes Químicas: Processo de retenção de partículas através da interação de seus elétrons promovendo uma coesão molecular.

Ademais, os processos biológicos também apresentam interferência nos mecanismos de transporte e aderência. A formação de biofilme no entorno das partículas facilita os processos de aderência e adsorção através da troca de cargas elétricas entre essas. Entretanto, o crescimento elevado do biofilme resulta em obstrução de vazios elevando as vazões e intensificando as forças de cisalhamento (SALATI, 2010).

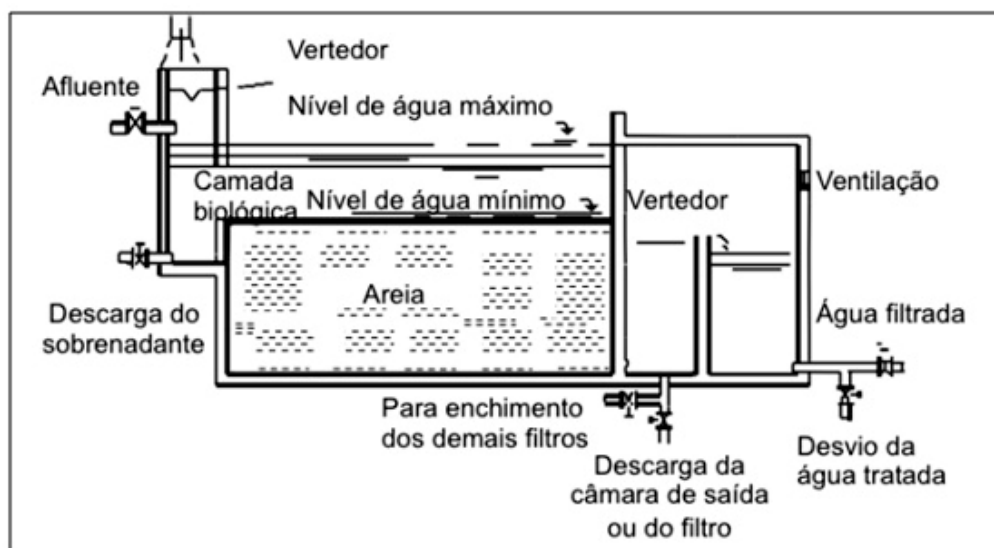
3.5 Filtros Lentos

Os filtros lentos são um sistema de filtração de baixo custo e de operação simplificada, não necessita de adição de coagulante e são comumente empregados em regiões rurais e comunidades de pequeno porte (SILVEIRA e COUTINHO, 2016).

O processo de tratamento que se desenvolve nos filtros lentos é principalmente biológico, esse processo é mais presente nas camadas iniciais do leito filtrante e resulta do elevado tempo de detenção da água na unidade de filtração (MURTHA, 1998). Os filtros operam com baixas taxas de filtração da ordem de 2 a 4 m³/m².dia, areia de granulometria fina e ausência de pré cloração, favorecendo o desenvolvimento dos processos biológicos, que para adquirirem condições de equilíbrio necessitam da manutenção de nutrientes e temperatura adequados (SALATI, 2010).

Segundo Burgardt (2015), devido à simplicidade de construção e operação dos sistemas de filtros lentos, e a elevada eficiência de tratamento obtido por esses, a tecnologia se torna muito utilizada em localidades com demanda de pequenas vazões de água (Figura 4).

Figura 4 - Estrutura de um filtro lento



Fonte: Di Bernardi, Brandão e Heller, (1999).

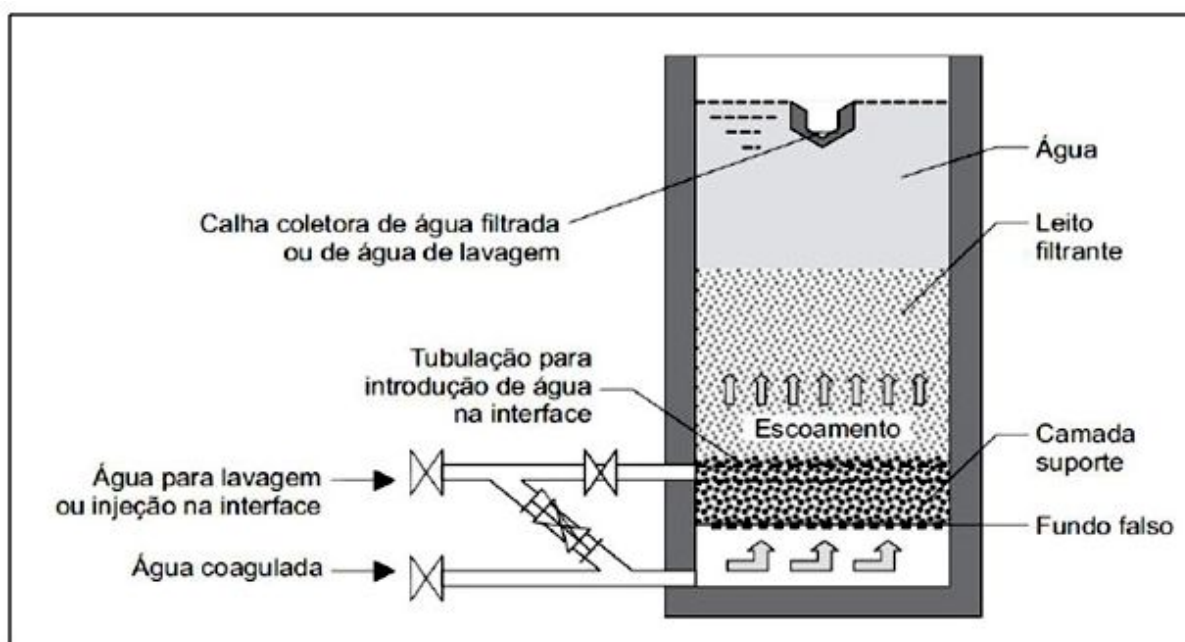
De modo a assegurar a eficiência máxima para essas unidades de filtração deve ser previsto uma espessura mínima de leito filtrante a ser removido no momento da limpeza e que não venha a prejudicar de forma significativa o tratamento desempenhado por esse, evitando assim que seja necessário um novo período de adaptação da camada superficial (PIZZOLATTI, 2014).

Corroborando com Pizzolatti (2014), Brito *et al* (2005) já apresentavam como resultado dos seus estudos sobre amadurecimento de filtros lentos de areia que o equilíbrio biológico do leito filtrante é afetado por condições de limpeza, taxas de filtração e presença de nutrientes sendo ainda o biofilme gerado nas camadas iniciais do filtro o principal processo responsável pelo tratamento na unidade de filtração.

3.6 Filtros rápidos Ascendentes

A tecnologia de filtração direta ascendente promove a retenção de partículas no leito filtrante na direção da diminuição de sua granulometria, promovendo a filtração em profundidade (MENDEZ, 2014). Segundo Quaresma (2013), um filtro ascendente é composto por uma câmara de fundo falso, uma camada base de granulometria maior e uma camada filtrante de granulometria fina (Figura 5).

Figura 5- Estrutura de filtros ascendentes



Fonte: Di Bernardi (2003).

Os filtros ascendentes trabalham com taxa que varia entre 120 a 240 m³/m². dia, são unidades utilizadas para filtração de água previamente coagulada e que possua baixo valor de turbidez, suportam variação da qualidade da água bruta que pode atingir 200 uT de turbidez e 1000mg/L de uH de cor aparente (FUNASA, 2014). Essas unidades de filtração podem apresentar como vantagem o baixo custo de implantação quando comparado a sistemas convencionais. Sistemas de filtração rápida que empregam filtros ascendentes geram menos

lodo e podem dispensar unidades de floculação, reduzindo os custos de construção (ALCANTARA, 2010).

Em termos de eficiência, a filtração ascendente apresenta eficiência de remoção de material particulado inferior a filtros descendentes, pois devido à maior granulometria existente em seu leito filtrante, se comparado a filtros descendentes, materiais de pequeno diâmetro são carregados com maior facilidade através de sua matriz, saindo na água filtrada (BURGARDT, 2015). Outro problema no sistema é a maior demanda por área se comparado a sistemas de filtração descendente. os filtros ascendentes se limitam a taxas menores de filtração demandando maior área filtrante para obter a mesma capacidade de filtração dos sistemas descendentes (TEXEIRA *et al.*, 2005).

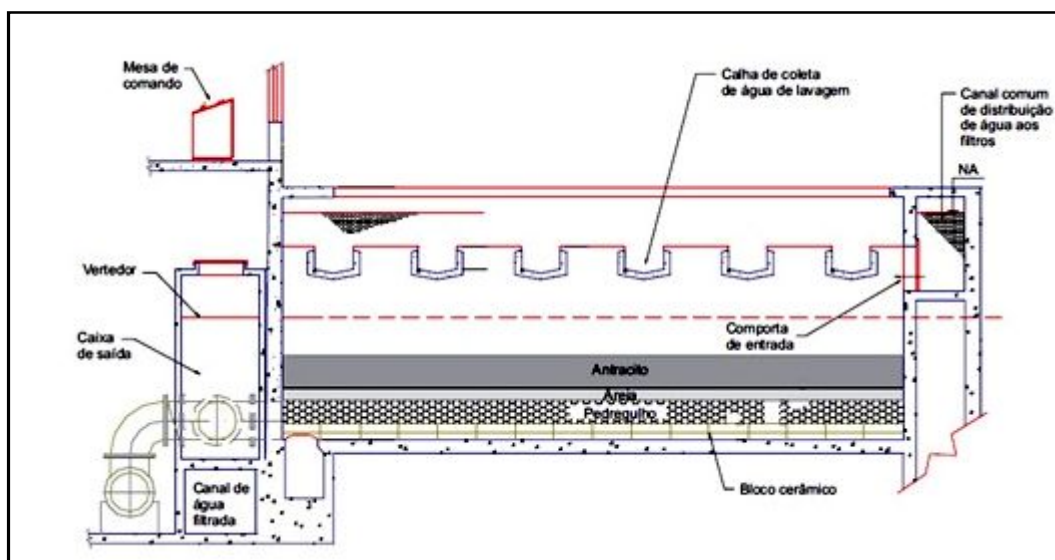
Segundo Mendéz *et al.*, (2016), ressalta-se que um dos grandes desafios da unidade de filtração direta constituído por filtros ascendentes e garantir a qualidade microbiológica da água para consumo, pois, como partículas de pequenos diâmetros e microrganismos podem transpor o leito filtrante a eficiência da unidade posterior de desinfecção pode vir a ser comprometida, uma vez que as partículas podem funcionar como abrigo para os microrganismos dificultando o contato com o agente desinfetante.

3.7 Filtros rápidos descendentes

Segundo Libânio (2008), os filtros rápidos descendentes constituem o tipo de unidade de filtração mais utilizado no Brasil, estando muitas vezes associado a estações de tratamento de ciclo completo. Essas unidades apresentam uma matriz filtrante composta de camada simples ou dupla camada (Figura 6). A composição mais comum do leito filtrante nas estações de tratamento de água é de camada simples constituída de areia que pode ser obtida de diversas fontes naturais (MOREIRA, 2015). Nos casos em que é acrescentada uma camada de antracito, que é um carvão mineral, sobre a camada de areia, o leito combinado passa a ser denominado de dupla camada (MOREIRA, 2015).

Observa-se que a composição da matriz filtrante influencia diretamente as taxas de remoção das partículas presentes na água. Características do leito como espaço vazio, permeabilidade e carga hidráulica aplicada no sistema, passam a influenciar nas condições de compactação do leito filtrante reduzindo as taxas de filtração e a remoção de partículas (ROLLAND *et al.*, 2009).

Figura 6- Configuração de filtro descendente de dupla camada



Fonte: Prosab (2003).

Na unidade de filtração rápida uma considerável quantidade de partículas com diâmetro inferior ao tamanho dos poros do filtro é retida, esse processo é possível decorrente dos mecanismos de transporte e aderência que ocorrem entre as partículas dispersas no meio e o leito filtrante (MENDEZ, 2014).

De acordo com o Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (2003), em decorrência das diferenças existentes entre os tipos de filtração ascendente e descendente, algumas características devem ser levadas em consideração antes do momento da escolha da unidade de filtração que irá compor o sistema de tratamento (Quadro 4).

Quadro 4- Características das unidades de filtração.

Filtração Ascendente	Filtração descendente
Retenção de impurezas inicialmente na camada de maiores vazios	Retenção de impurezas inicialmente na subcamada de menores vazios
Pressão aumenta com o tempo de funcionamento	Pressão reduzida quanto maior o tempo de funcionamento
Lavagem do leito filtrante e filtração no mesmo sentido	Lavagem do leito filtrante em contra fluxo ao sentido da filtração
Coleta da água na mesma calha da água de lavagem	Coleta da água na parte inferior do filtro
Leito filtrante composto de areia	Leito filtrante composto por um ou mais materiais
Maior consumo de água de lavagem em relação à filtração descendente	Menor consumo de água de lavagem em relação à filtração ascendente

Fonte: Prosab (2003).

Segundo Funasa (2014), a utilização dos filtros ascendentes se torna mais limitada a medida que a qualidade da água bruta se reduz sendo necessário assim o emprego de filtros descendentes. Outros parâmetros que reduzem a utilização dos filtros ascendentes são a taxa de filtração limitada a $180\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, para evitar carreamento do leito filtrante, e a baixa adaptação a picos de turbidez. Em contra partida os filtros descendentes podem operar com taxas de filtração superior a $200\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e suportar valores da ordem de 100 uT amenizando mais facilmente picos de turbidez existentes no sistema (LIBÂNIO, 2008).

Com relação ao consumo de água de lavagem, como a matriz filtrante dos filtros descendentes é constituído de grãos de areia de pequeno diâmetro, para sua fluidização, o consumo de água demandado é inferior a filtros que apresentam leito filtrante de maior granulometria, reduzindo o consumo de água no processo de lavagem (PROSAB, 2003). Para Schöntag *et al.*, (2015), a etapa de lavagem do leito filtrante é de elevada importância, pois durante esse processo todas as impurezas retidas na unidade deverão ser removidas do sistema, mas o volume de água utilizado não poderá ser demasiadamente elevado para que não onere o processo de lavagem e as velocidades devem ser limitadas para que o leito filtrante não seja carregado juntamente com as impurezas.

A lavagem dos filtros pode ocorrer analisando-se algumas variáveis: ocorrência de transpasse da turbidez, que indica o arraste do material retido no leito filtrante para as unidades subsequentes a filtração ou perda de carga, que indica a carga hidráulica suportável para a máxima taxa de filtração (ZIPF, 2010).

De acordo com Zipf (2010), outras características que devem ser observadas antes da lavagem de um dos filtros de uma unidade de filtração são:

- Observar o filtro que está operando há mais tempo com taxa de filtração declinante;
- Observar o filtro que opera com o nível de água mais elevado;
- Observar o filtro que apresenta os valores de turbidez mais elevados na saída da água filtrada.

Muitos artificios como utilização de pré-filtros, melhoria dos processos de coagulação, alteração da granulometria do leito filtrante são utilizados com o intuito de melhorar o desempenho dos filtros rápidos, tanto para a ampliação da carreira de filtração, quanto para a redução dos volumes gastos de água de lavagem, sendo na redução dos volumes da água de lavagem a principal forma de se obter uma maior produção de água filtrada e otimização do processo de filtração (SCHÖNTAG *et al.*, 2015).

3.8 Filtros sob pressão

De acordo com Libânio (2008), os filtros de pressão são cilindros fechados de eixo vertical ou horizontal com meio filtrante geralmente constituído de areia e seixos. Os filtros de areia pressurizados necessitam possuir correto dimensionamento de modo a evitar possíveis rupturas em sua parede devido às pressões de trabalho impostas às unidades de tratamento (PINHO e OLIVEIRA, 2016).

A operação do filtro tem sua eficiência estimada através da retenção do material disperso na água bruta em sua matriz filtrante, após sua remoção os vazios serão colmatados e os valores de pressão sofrerão acréscimo até que seja identificada a necessidade de limpeza da camada. As vazões e pressões impostas no momento da retrolavagem estão sujeitas às características do filtro e a granulometria de seu leito filtrante (SALCEDO, TESTEZLAF, MESQUITA, 2011).

As unidades de filtração pressurizadas são normalmente empregadas na potabilização de águas com baixa cor e turbidez, operando com taxas de até $900\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (LIBÂNIO, 2008). Quando operadas com fluxo descendente podem trabalhar satisfatoriamente com valores de 75 uT na água bruta sem comprometer os padrões de qualidade da água filtrada (FUNASA, 2014).

Para Pinho e Oliveira (2016), essas unidades são projetadas através do volume por unidade de tempo ou por unidade de área e se demonstram muito eficientes na remoção de impurezas quando utilizada para melhorias de águas para irrigação. Segundo Deus, Testezlaf, Mesquita, (2015) a utilização de filtro pressurizado para tratamento de água para irrigação demonstrou que a elevação das taxas de filtração associada à redução da granulometria do leito filtrante acentuou a perda de carga nas unidades com o passar do tempo.

Quando da utilização desse sistema com a finalidade de reutilizar água proveniente de uma estação de tratamento de efluente, na qual foi proposto à adoção de filtros pressurizados com dupla camada, de areia e carvão ativado, para constituir um tratamento terciário e adequar a água a qualidade requerida para lançamento em corpo receptor, foi observado à eficiência satisfatória de polimento exercido pelo sistema pressurizado (WEBER, CYBIS e BEAL, 2010).

Assim, se demonstra a eficiência dos sistemas de filtração pressurizados mesmo quando empregado a águas com diferentes qualidades, sendo essas unidades mais eficientes quando submetidas a elevadas vazões para remoção de material particulado (DEUS, TESTEZLAF, MESQUITA, 2015).

3.9 Dupla filtração

A dupla filtração é composta de filtro ascendente e descendente e surgiu como um avanço da tecnologia de filtração direta de tratamento de água (CERQUEIRA, 2008). Nesse sistema, o filtro de escoamento ascendente possui na composição do leito filtrante o material que pode ser areia grossa ou pedregulho, geralmente em camadas de granulometria decrescente na direção do escoamento (PROSAB, 2003). O filtro de escoamento descendente geralmente é constituído de areia ou outro material filtrante de pequena granulometria comumente usado em filtros rápidos descendentes (PROSAB, 2003).

De modo geral, o objetivo da dupla filtração é assegurar a simplicidade do sistema de filtração direta descendente, e obter melhor eficiência com águas de elevada turbidez acrescentando-se para isso um pré-filtro ascendente pelo qual é realizada a retenção inicial de partículas presentes na água (CERQUEIRA, 2008).

De acordo com Alcantara (2010), os sistemas de dupla filtração podem ser utilizados para tratar água bruta com valores de turbidez da ordem de 150 uT, cor verdadeira de 100 uH e sólidos em suspensão de 150 mg/L. Segundo Silva *et al.*, (2015), o processo de tratamento por dupla filtração apresenta elevada eficiência na remoção de turbidez, biomassa algal e matéria orgânica sendo por isso frequentemente utilizada nos processos de potabilização de águas para consumo humano.

De acordo com Machado e Sens (2012), utilizando-se um sistema de dupla filtração modificado, constituído por dois filtros ascendentes um de lavagem contínua e um convencional, foi possível obter elevada eficiência na remoção de cianobactérias, aumentando significativamente a produção efetiva de água filtrada e redução do volume de água gasto para realizar a lavagem dos filtros.

Para Lima e Capelo Neto (2015), a utilização de dupla filtração modificada inserindo-se três filtros pressurizados a montante do filtro ascendente para o tratamento de águas eutrofizadas, permitiu impor uma taxa de filtração de 200 m³/m² dia com carreiras de filtração de 10 h para os filtros pressurizados e 49h para o filtro ascendente e um volume de água produzido nos filtros pressurizados de 13,41m³ sendo gasto apenas 0,37m³ para suas lavagens. A tecnologia de dupla filtração modificada foi capaz de produzir água de acordo com os padrões de qualidade avaliados e a utilização de filtro pressurizado reduziu em 40% o consumo de água para lavagem dos filtros (LIMA e CAPELO NETO, 2015).

3.10 Características do meio filtrante

De acordo com Alvito (2010), a escolha correta do material que irá compor o leito filtrante é de suma importância, pois essa influencia diretamente nas características como: taxa de filtração disponível, qualidade do efluente e espessura da camada filtrante necessária. Para Libânio (2008), além da escolha do material e da espessura da camada filtrante, outras características do leito filtrante também exercem influência direta no processo de filtração como: tamanho e distribuição dos grãos, esfericidade, porosidade do meio, densidade, dureza em que a característica proeminente dos meios filtrantes relaciona-se ao tamanho e distribuição dos grãos.

Schöntag *et al.*, (2015) corrobora com a ideia dos demais autores apresentando que a eficiência da filtração está diretamente relacionada com quantidade de partículas em suspensão presentes na água afluente e com as características do meio filtrante: material, tamanho, coeficiente de uniformidade, massa específica e espessura da camada filtrante. Ademais, Prosab (2003), acrescenta ainda além dos parâmetros já citados a solubilidade em ácido clorídrico e solubilidade em hidróxido de sódio, como ensaios para identificar impurezas presentes no meio filtrante e que podem vir a ser liberada para água afetando sua qualidade.

Duris *et al.*, (2016), ressaltam a importância da retrolavagem existente no sistema de filtro rápido descendentes que muitas vezes podem adquirir uma importância maior que a própria filtração, pois uma lavagem incorreta pode promover uma fluidização inadequada do meio filtrante resultando em processos de mistura e dificuldade de segregação desse material ou mesmo expulsa-lo do interior do filtro. Ainda segundo o mesmo autor, o conhecimento das características do material granular que constitui o filtro é de grande importância para evitar tais inconvenientes (DURIS *et al.* 2016).

3.10.1 Tamanho do grão

De acordo com Libânio (2008), o tamanho dos grãos é um parâmetro de grande importância na caracterização do conjunto de grãos que integram o meio filtrante com influência sobre os mecanismos de filtração por transporte e sobre as carreiras de filtração. Segundo Sousa (2011), a identificação do tamanho dos grãos é realizada pela análise granulométrica no qual se observa a passagem de uma amostra seca, do material granular, por um conjunto de peneiras com aberturas especificadas. Os volumes retidos nas peneiras são pesados e relacionados com as percentagens de massa retida e assim compõem a

determinação dos percentuais acumulados dos grãos menores ou iguais a cada abertura da peneira (SOUSA, 2011).

Na composição das camadas e subcamadas do leito filtrante a escolha do tamanho dos grãos é definida previamente a partir de estudos em instalação-piloto, dados experimentais de pesquisas ou então, adotado em função de experiências em outras estações de tratamento de água com características similares (MENDEZ, 2014). Lima (2006), informa que mediante a granulometria adotada para o material filtrante pode ser identificado o melhor diâmetro da camada de seixo rolado a qual servirá como camada suporte para apoio do meio. Para Mendez (2014), o tamanho dos grãos na camada suporte deverá ser reduzido de baixo para cima sendo a escolha da granulometria compatível com as variáveis: taxa de filtração, carga hidráulica disponível, qualidade do afluente, qualidade desejável do efluente e sistema de lavagens previstas no projeto.

O meio filtrante não apresenta um tamanho único de grãos, mas uma respectiva faixa de abrangência (STEVENSON, 1995). Desse modo, algumas características podem ser mais atuantes em determinadas faixas de tamanho, como por exemplo, quando utilizados grãos pequenos na composição do leito, uma maior concentração de partículas de pequeno diâmetro é removida melhorando a qualidade do processo de filtração, embora um tamanho menor exija uma limpeza mais frequente (ELBANA, CARTAGENA, BARGUÉS, 2012).

Outros processos também são influenciados pelo tamanho dos grãos que compõem o leito filtrante, como no caso dos processos de retrolavagem em que grãos de pequeno tamanho podem ser carregados pelas velocidades ascensionais existentes no momento de fluidificação do leito filtrante (SLAVIK, JEHLICH, WOLFGANG, 2013). A perda de carga também se apresenta influenciada diretamente pelo tamanho dos grãos onde um processo de seleção inadequado do tamanho das partículas pode elevar a perda de carga consequentemente reduzindo o tempo de filtração e aumentando a necessidade de retrolavagem (MESQUITA, TESTEZLAF, RAMIREZ, 2012).

Para Florescu e Podoleanu (2010), em pesquisa experimental, foi revelado que para o mesmo tipo de material filtrante é possível a melhoria do processo de filtração desde que se tenha uma caracterização adequada do tamanho dos grãos utilizados no leito filtrante.

3.10.2 Esfericidade

A forma do grão e sua geometria exercem grandes influencia na perda de carga no meio filtrante, na velocidade mínima de fluidificação e no comportamento durante a lavagem.

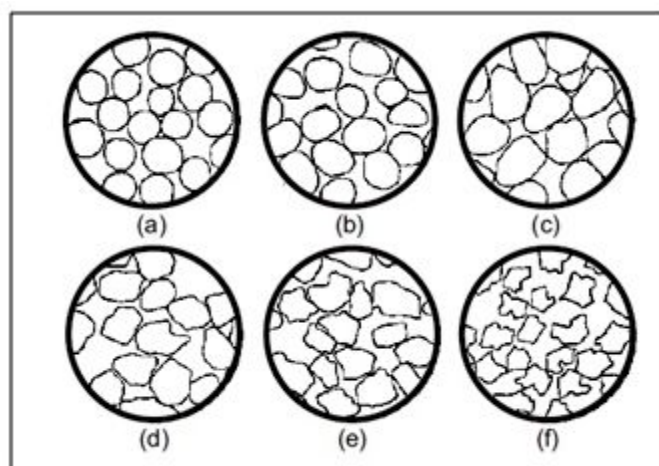
Quanto mais irregular for a forma do grão maior a porosidade e melhor o processo de filtração. Em contrapartida, quanto mais uniformemente esférico for a forma geométrica do grão melhor será seu desempenho no momento da lavagem (LIMA, 2006).

A esfericidade dos grãos pode ser definida como a relação entre a área superficial de uma esfera e a de um grão de mesmo volume (LIBÂNIO, 2008). Essa forma é um fator chave no meio filtrante, pois pode afetar as propriedades mecânicas como resistência ao cisalhamento, arranjo estrutural, fricção, dilatação, permeabilidade e razão de vazios dos materiais granulares (COX e BUDHU, 2008). Outros autores informam que a esfericidade dos grãos interfere também na velocidade ascensional aplicada nas retrolavagens e no processo de fluidificação do meio filtrante devido à sedimentação diferente de grãos esféricos e não esféricos (LU, WEI, WEI, 2015).

De acordo com Lu, Wei, Wei (2015), a resistência ao fluxo para grãos irregulares e grãos esféricos é diferente (Figura 7). Nos grãos irregulares (f) a força de arrasto deve ser de maior magnitude, devido a sua dificuldade para expansão no momento de lavagem, dificuldade não observada nos grãos esféricos (a) quando aplicado a mesma velocidade relativa (LU, WEI, WEI, 2015).

De maneira geral, a tendência das esfericidades de a até f demonstra o aumento da porosidade e da perda de carga à medida que a esfericidade dos grãos diminui.

Figura 7- Visualização de diferentes esfericidades de grãos



Fonte: Prosab (2003).

O conhecimento do tamanho e forma dos grãos utilizados nas unidades de filtração é importante para prever seu comportamento no sistema, uma vez que grãos de diferentes formas podem ser utilizados como meio filtrante a identificação da esfericidade desses facilita

a adequação dos processos de lavagem, impondo-se maiores velocidades ascensionais para formas menos esféricas dos grãos (RADOICIC *et al.*, 2014).

3.10.3 Densidade

A densidade dos grãos não apresenta interferência em relação à retenção de partículas no meio filtrante, mas essa é uma característica fundamental no processo de lavagem do filtro considerando que os grãos devem possuir densidade satisfatória para permanecerem na unidade após a lavagem (LIBÂNIO, 2008).

De acordo com Duris *et al.*, (2013), no processo de lavagem o leito filtrante sofre fluidização e se torna parcialmente segregado, com isso as partículas de maior e menor densidade se diferenciam, as de maior densidade são fluidizadas no fundo da unidade e as de menor densidade se tornam fluidas no topo.

Segundo Schöntag *et al.*, (2015) no processo de filtração podem ser utilizados diversos materiais com diferentes densidades. A utilização desses materiais ocorre para melhoria do processo de filtração, mas é necessário que a velocidade ascensional de lavagem para fluidizar todo o meio não seja elevada o bastante para arrastar o material filtrante (SCHÖNTAG *et al.*, 2015). Para Tatari, Smets, Albrechtsen (2016), quando se tem diferentes materiais com densidade similar pode ocorrer a mistura dos materiais, de modo que no momento da sedimentação do material, após a lavagem, poderá ocorrer à mistura de ambos sem que haja a separação em camada filtrante específicas.

De modo que seja obtida uma condição satisfatória do filtro, no momento da retrolavagem, os grãos de maior densidade, após sua fluidificação, deverão se acumular em camadas diferenciadas por densidade na parte inferior do filtro e as de menor densidade em camadas diferenciadas por densidade na parte superior (ALTMANN, 2016).

3.10.4 Porosidade

A porosidade é definida como a relação dos espaços vazios em um meio poroso total, sendo muitas vezes estimada através de medições diretas. (TANG e MCDONOUGH, 2016). Segundo Prosab (2003), a porosidade está diretamente relacionada ao coeficiente de esfericidade dos grãos, de modo que quanto menor o coeficiente de esfericidade dos grãos, maior será a porosidade de um meio filtrante fixo (Figura 8). Para Stevenson (1995), a porosidade varia ainda em relação à forma, tamanho e material utilizado para filtração.

Figura 8- Interferência da forma do grão nos valores de porosidade

Forma do grão	Coeficiente de esfericidade (Ce)	Fator de Forma (FF)	Porosidade
Esferico	1,0	6	0,38
Arredondado	0,98	6,1	0,38
Desgastado	0,94	6,4	0,39
Agudo	0,81	7,4	0,40
Angular	0,78	7,7	0,43
Triturado	$\leq 0,70$	8,5	0,48

Fonte: Prosab (2003).

De acordo com Alvito (2010), se recomenda a utilização de grãos angulares para composição do leito filtrante, uma vez que esses grãos apresentam uma porosidade elevada é possível otimizar a retenção de sólidos suspensos devido a sua alta porosidade.

No processo de filtração rápida descendente o leito de filtração é um meio poroso e contém espaços chamados de poros, entre os grãos, quando a água atravessa o filtro algumas das partículas nela contida podem ficar retidas e acabam por colmatar esses poros, exigindo uma lavagem para desobstrução após um período de funcionamento (ZAMANI e MAINI 2009).

Na estruturação da camada filtrante, o leito é colocado de maneira sobrepostas, de modo que a porosidade vá aumentando de forma escalonada, de baixo para cima, e a granulometria das partículas irá diminuir, não permitindo assim que os grãos sejam empurrados as camadas mais internas e obstruam os vazios (JACOBSEN, VAN GENTA E FREDSOE, 2017).

Para que a filtração seja eficiente é importante que após a lavagem do meio filtrante a porosidade inicial se restabeleça através da sedimentação correta dos grãos que compõem cada camada filtrante, de modo a não gerar caminhos preferenciais de fluxo de água (BOVÉ *et al.*, 2017).

3.10.5 Dureza

A característica dureza está associada à resistência mínima dos grãos ao efeito da abrasão, pois durante o processo de lavagem com a expansão e fluidificação do meio filtrante, pode haver desgaste dos grãos, culminando em sua fragmentação e geração de maior

quantidade de fino, alterando assim sua curva granulométrica, o que pode trazer prejuízos à filtração (PROSAB, 2003).

De acordo com Alvito (2010), os materiais filtrantes podem sofrer fragmentação da sua estrutura geométrica devido a três possíveis causas: transporte do material, processo de filtração e retrolavagem. Durante o processo de lavagem com a fluidificação e expansão do meio filtrante, nos casos em que o material não apresenta resistência mínima a abrasão, ele tendera a se desintegrar em grãos menores e com isso comprometer a filtração (BRINCK, 2013). Quando o sistema de lavagens dos filtros possui ar como auxiliar de lavagem o efeito abrasivo entre os grãos do meio filtrante podem se intensificar possibilitado a ruptura dos grãos, especialmente quando se tem antracito na composição do leito filtrante (PROSAB, 2003; BRINCK, 2013).

Como o principal material utilizado nos filtros de camada simples e dupla é a areia, e essa tem como principal elemento formador o quartzo, um elemento bastante duro e resistente a efeitos abrasivos, sua caracterização quanto à dureza não é necessária para efeitos práticos, pois nas lavagens não acontece efeito abrasivo significativo (ALVITO, 2010, QUARESMA, 2013). Entretanto, o carvão antracito e o carvão ativo granular também usados como leito filtrante, merece significativa atenção, uma vez que apresentam baixas durezas (BRINCK, 2013).

Desse modo, a caracterização da dureza do material filtrante se torna importante para a durabilidade dos grãos e conseqüentemente para a vida útil do leito filtrante (BRINCK, 2013). Como ocorrem fluidificação e expansão do meio filtrante e conseqüente abrasão no processo de lavagem do filtro, é importante que o material possua uma resistência mínima à abrasão para assegurar uma vida útil prolongada do leito filtrante (VIEIRA, 2013).

3.10.6 Solubilização em Ácido Clorídrico e Hidróxido de Sódio

De acordo com Brinck (2013), o teste da solubilidade é utilizado para determinação de impurezas e compostos solúveis em ácido clorídrico e hidróxido de sódio presentes no material filtrante e que possam vir a ser lixiviados, prejudicando a qualidade final das águas tratadas. Em muitos casos, a principal impureza solúvel em ácido e hidróxidos, presente em areia e pedregulho, são respectivamente o carbonato de cálcio e outros óxidos solúveis (PROSAB, 2003).

A análise é realizada a partir da massa conhecida do material deixando-a imersa em uma solução de 1% de ácido clorídrico e outra amostra em solução de 1% de hidróxido de

sódio por 30 dias, no final desse período é realizada a pesagem do material residual, determinando-se assim, o percentual de perda mássica do perdido (MOREIRA, 2015). Deve-se ressaltar também que para qualquer material filtrante a solubilidade em ácido clorídrico deve ser a menor possível, no caso do antracito a solubilidade menor ou igual a 1% de sua massa (BRINCK, 2013).

3.10.7 Perda de Carga

De acordo com Bové *et al.*, (2015), a perda de carga nas unidades de filtração podem ocorrer pelo meio filtrante utilizado ou por seus componentes: válvulas, tubos, entre outros. Para o leito filtrante a perda de carga aumenta quando as partículas são retidas até atingirem a perda de carga máxima definida no projeto do filtro, que pode ser calculada pela diferença da perda de carga máxima e da perda de carga do meio limpo (SCHÖNTAG, 2015).

Segundo Zipf (2010), o momento ideal de lavagem seria aquele em que a perda de carga é máxima e a turbidez encontrasse no valor limite aproveitando da melhor forma a carreira de filtração. No momento da lavagem, a perda de carga para grãos muito densos como a areia cresce proporcionalmente até sua completa expansão para quase instantaneamente decrescer e permanecer constante até o final da lavagem (DALSASSO, 2005).

Silveira (2003), informa que a perda de carga no leito filtrante ocorre como escoamento em meios porosos podendo ser calculada através da lei de Darcy. Qin e Pletcher (2015), propõem que à medida que as partículas passam a se acumular na unidade de filtração a perda de carga se eleva devido à dificuldade do líquido em atravessar o meio poroso obstruído.

Uma das formas de registros da perda de carga em filtros é através de piezômetros, de modo que, sempre que a perda de carga total no meio filtrante atinja a altura máxima o operador identifique a necessidade de lavagem do filtro, servindo como medida de controle operacional (MELO FILHO, 2006).

4 METODOLOGIA

A pesquisa realizada é caracterizada como pesquisa exploratória, uma vez que estuda um tema novo e ainda pouco pesquisada, tentando fornecer subsídio técnico a futuras pesquisas que venham a ser desenvolvidas. Classifica-se também como experimental e de campo por se utilizar de um conjunto de experimentos como ferramenta de análise e posteriormente correlacionar os dados obtidos com fundamentações teóricas discutidas de modo a esclarecer o problema pesquisado.

4.1 Área de estudo

A pesquisa se desenvolveu na unidade da Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE), denominada de Estação de Tratamento de Água Oeste (ETA Oeste), conforme pode ser observada na Figura 9.

Figura 9- Localização da estação de tratamento de água



Fonte: Google (2017).

A ETA oeste se localiza no município de Caucaia, com acesso através do anel viário. A estação de tratamento de água adota a tecnologia de tratamento por dupla filtração, com capacidade total de operação de $5\text{ m}^3/\text{s}$, mas atualmente produz cerca de $0,7\text{ m}^3/\text{s}$ de água tratada. Ao todo, são 24 filtros ascendentes e 24 filtros descendentes, mas apenas seis (6) unidades de cada tipo se encontram em operação.

Os sistemas de dupla filtração estudados, convencional e modificado, são de propriedade da CAGECE e foram projetados pelo corpo técnico da empresa.

O sistema de dupla filtração convencional, em escala piloto, é utilizado para testar dosagens de produtos químicos, simular operações hidráulicas nos filtros, perda de carga, entre outros, considerando as mesmas condições do sistema de dupla filtração em escala real.

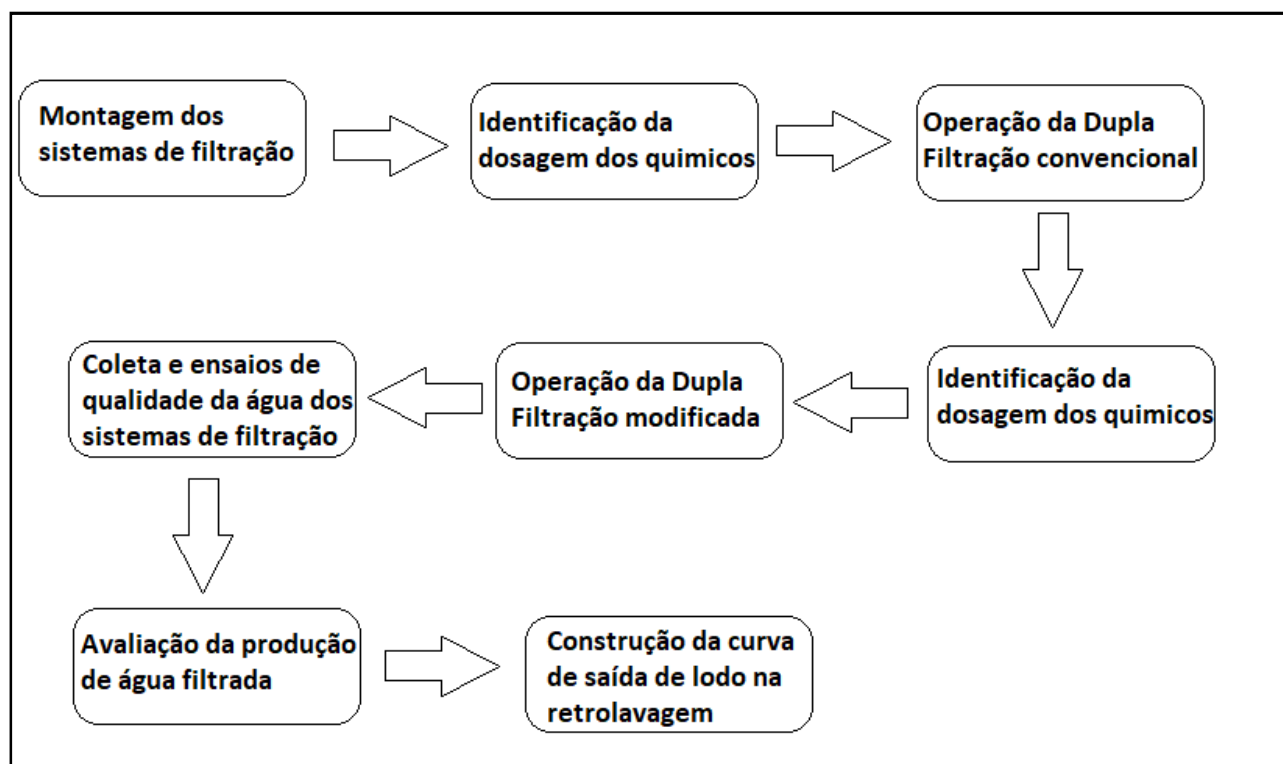
Os filtros sob pressão, em escala piloto, são utilizados para o desenvolvimento de pesquisas e outras atividades ligadas ao tratamento de água nas instalações piloto da CAGECE. Ambos os sistemas estão localizados no laboratório da ETA Oeste, denominado de ETA Piloto.

4.2 Descrição dos sistemas de filtração em escala piloto

A pesquisa se desenvolveu de acordo com as etapas descritas na Figura 10. Inicialmente os sistemas de filtração foram adaptados para a realização da pesquisa e, posteriormente, foram identificadas as dosagens ótimas dos produtos químicos e em seguida realizado a operação dos sistemas de filtração. Ao termino dos experimentos foi coletado uma amostra de água filtrada para avaliação de sua qualidade e uma amostras de água de lavagem dos filtros para construção da curva de saída de lodo.

A operação dos sistemas de filtração se desenvolveu entre os meses de janeiro a julho de 2017. Os experimentos foram realizados em três carreiras de filtração e a coleta de dados referentes à vazão, turbidez e perda de carga ocorreu a cada hora de funcionamento. As análises de qualidade de água foram realizadas nos laboratórios: de análise físico-químicas, laboratório de análises bacteriológicas e laboratório de análises hidrobiológicas pertencentes à CAGECE e localizados no endereço rua Ribeiro Leitão, nº1, Bairro Pici, Fortaleza – CE.

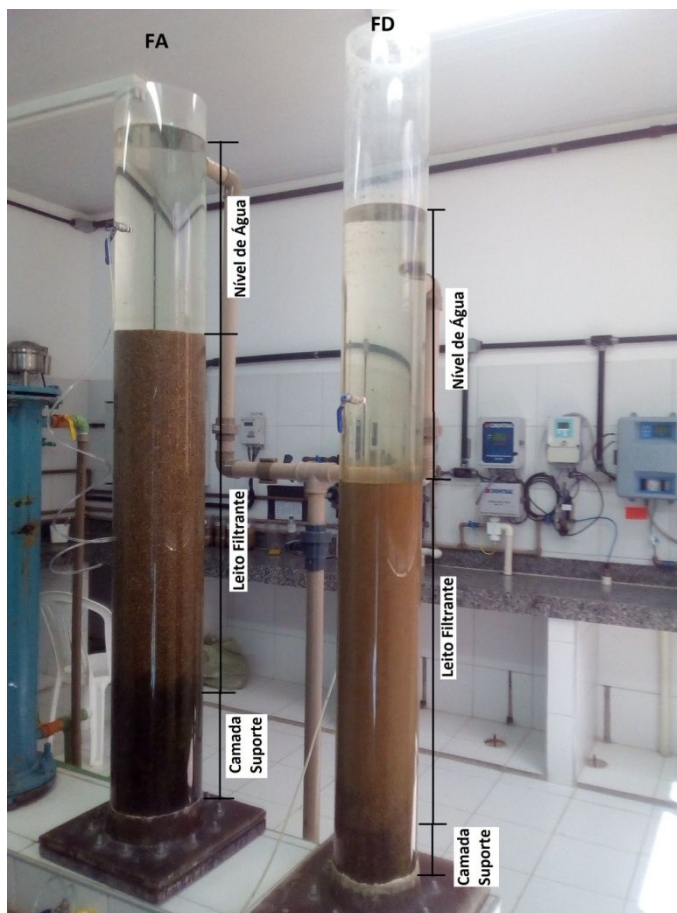
Figura 10- Fluxograma das etapas da pesquisa realizado no laboratório - ETA Piloto (ETA Oeste).



Fonte: Autor (2017).

Foram utilizados dois sistemas de filtração na pesquisa. O primeiro sistema utilizado, descrito na literatura como sistema de dupla filtração convencional, composto por dois filtros, sendo o primeiro de fluxo ascendente e o segundo de fluxo descendente (Figura 11).

Figura 11- Sistema de dupla filtração convencional em escala piloto



Fonte: Autor (2017).
FA- Filtro Ascendente.
FD- Filtro Descendente.

Os dois filtros do sistema possuem 2m de altura e foram construídos em acrílico, facilitando a visualização do processo de filtração. Ambos os filtros possuem leito filtrante de camada simples composto de areia e camada suporte composta de pedregulhos de diferentes granulometrias, demais informações técnicas são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5- Características dos filtros da dupla filtração convencional em escala piloto.

DUPLA FILTRAÇÃO CONVENCIONAL						
Características	Filtro Ascendente			Filtro Descendente		
Altura do filtro	2m			2m		
Material do filtro	Acrílico			Acrílico		
Material do leito filtrante	Areia			Areia		
Leito Filtrante	Material	Diâmetro	Altura da camada	Material	Diâmetro	Altura da camada
Altura do leito filtrante	Areia	3,36 a 1,19mm	1m	Areia	1,41 a 0,3mm	0,85m
Altura da camada suporte	Pedregulho	38 a 25,4mm	0,15m	Pedregulho	19 a 12,7mm	0,075m
		25,4a 19mm	0,15m		12,7 a 6,4mm	0,075m
		19 a 12,7mm	0,15m		6,4 a 3,36mm	0,075m
		12,7 a 6,4mm	0,15m		-	
		6,4a 3,36mm	0,15m			
Diâmetro do tubo	250 mm			200 mm		
Área filtrante	0,049 m²			0,031 m²		

Fonte: Autor (2017).

O segundo sistema utilizado foi denominado de sistema de dupla filtração modificado ou não convencional (Figura 12). A utilização de filtro pressurizado ocorreu pela possibilidade de trabalho com maiores taxas de filtração quando comparado à dupla filtração convencional, e pela possibilidade de reduzir a demanda de área e volume de água para a lavagem dos filtros, aumentando a sua produtividade.

Figura 12- Sistema de dupla filtração modificada em escala piloto.



Fonte: Autor (2017).

FP1- Filtro Pressurizado Descendente 1

FP2- Filtro Pressurizado Descendente 2

O sistema é composto de dois filtros metálicos, com 1,20m de altura, e sistema pressurizados de fluxo descendente (Quadro 6). O leito filtrante do filtro pressurizado 1 (FP1) apresentou a mesma granulometria do leito filtrante do filtro ascendente do sistema de dupla filtração convencional. Já o filtro pressurizado 2 (FP2) apresentou o leito filtrante com granulometria igual a granulometria do leito filtrante do filtro descendente da dupla filtração convencional.

Quadro 6- Características dupla filtração modificada em escala piloto

DUPLA FILTRAÇÃO MODIFICADA						
Características	Filtro Pressurizado 1			Filtro Pressurizado 2		
Altura do filtro	1,2m			1,2m		
Material do filtro	Ferro fundido			Ferro fundido		
Material do leito filtrante	Areia			Areia		
Leito Filtrante	Material	Diâmetro	Altura da camada	Material	Diâmetro	Altura da camada
Altura do leito filtrante	Areia	3,36 a 1,19mm	0,50 m	Areia	1,41 a 0,3mm	0,50m
Altura da camada suporte	Pedregulho	25,4 a 19mm	0,10m	Pedregulho	19 a 12,7mm	0,10m
		19 a 12,7mm	0,05m		12,7 a 6,4mm	0,05m
		12,7 a 6,4mm	0,05m		6,4 a 3,36mm	0,05m
		6,4 a 3,36mm	0,10m		2,4 a 3,2mm	0,10m
Diâmetro do tubo	200 mm			200 mm		
Área filtrante	0,031 m ²			0,031 m ²		

Fonte: Autor (2017).

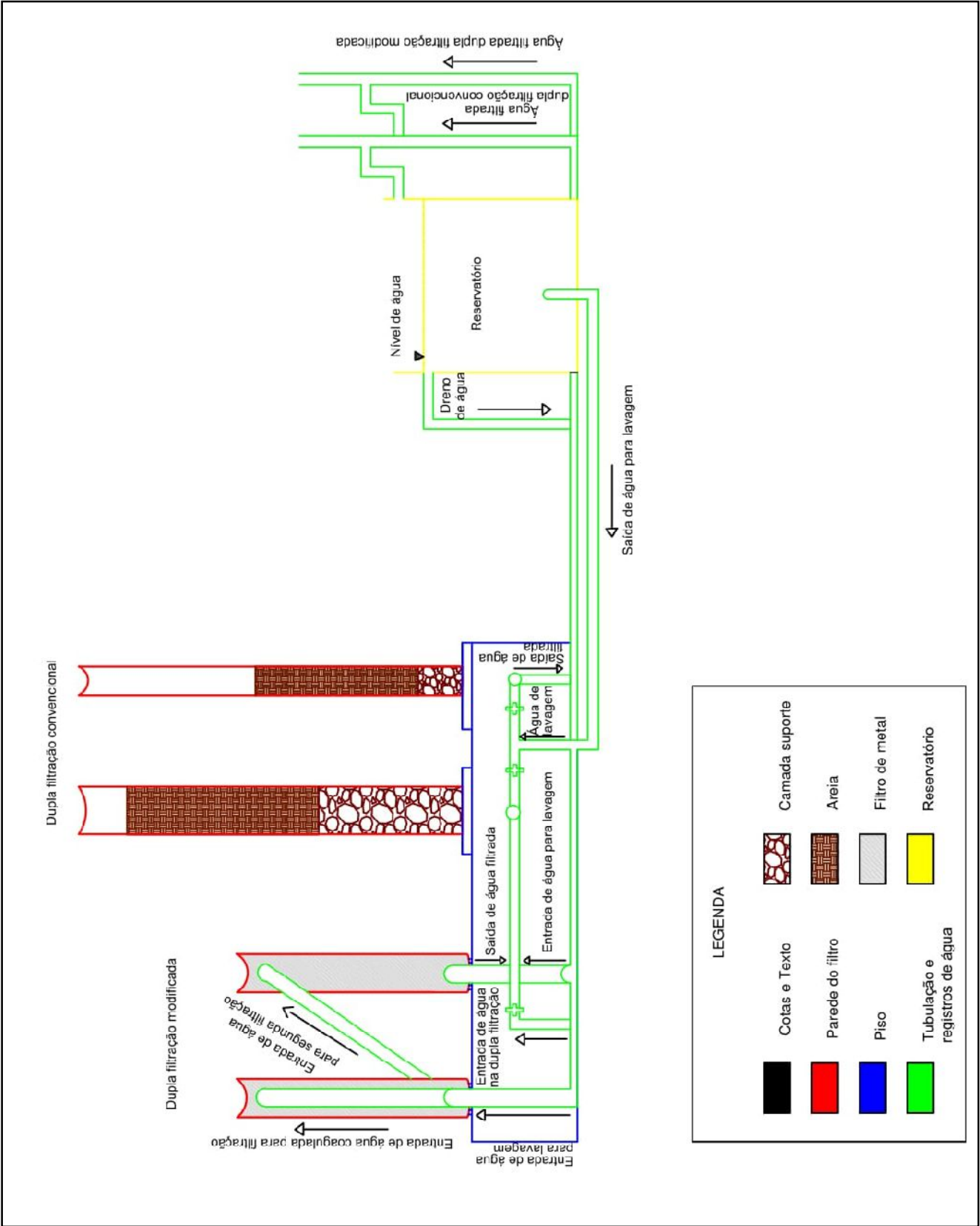
A pressurização dos filtros é realizada por uma bomba periférica gamma QB60, com vazão máxima de água de 32 L/min (Figura13).

Figura 13- Bomba de pressurização da dupla filtração modificada

Fonte: Autor (2017).

Na figura 14 está apresentado o croqui de ambos os sistemas de filtração. O sistema é composto por duas unidades de filtração, tubulações de transporte de água bruta e filtrada e unidade de armazenamento de água filtrada.

Figura 14- Croquis da entrada de água na unidade de filtração.



Fonte: Autor (2017).

4.3 Condições operacionais

Na primeira etapa da pesquisa foram identificadas as características operacionais do sistema de dupla filtração convencional. Considerando que o sistema convencional de dupla filtração presente na ETA piloto representa uma miniatura dos filtros da ETA Oeste, apresentando mesma granulometria do leito filtrante e recebendo águas do mesmo manancial, se optou por trabalhar em condições similares a da ETA Oeste em relação às taxas de filtração e dosagens de químicos.

4.3.1 Dupla filtração convencional

Seguindo o modelo existente na ETA Oeste foi realizada a dosagem do cloro, policloreto de alumínio (PAC) e polímero antes das águas passarem pelo processo de filtração. Para o sistema de dupla filtração convencional foi dosado 16mg/L de PAC, 4mg/L de polímero e 2mg/L de cloro, sendo esse com pureza de 65% (Figura 16). O sistema trabalhou com vazão constante de 0,36m³/h, representando uma taxa de filtração para o filtro ascendente de 180m³/m².dia e para o filtro descendente de 280m³/m².dia.

Figura 16- Dosagem dos químicos



Fonte: Autor (2017).

Durante os ensaios da carreira de filtração ocorreu redução da qualidade de água bruta disponibilizada pelo manancial, comprovada pela alteração das concentrações de cor e turbidez, tal alteração pode ter ocorrido devido à junção de dois fatores: elevada concentração de algas presente no manancial e baixo volume de água armazenado no reservatório. A

alteração da qualidade da água disponibilizada, porém não interferiu de forma significativa no processo de filtração pela unidade de dupla filtração convencional mantendo-se a mesma dosagem de químicos.

4.3.2 Dupla filtração modificada

Inicialmente, buscou-se operar o sistema de filtração pressurizado com as mesmas dosagens de químicos propostas para o sistema de dupla filtração convencional. Entretanto, não se obteve sucesso, pois a qualidade da água filtrada apresentou, mesmo nas horas iniciais, valor de turbidez superior ao permitido na Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S, para águas filtradas em filtros rápidos.

Com a redução da qualidade da água bruta disponibilizada pelo manancial a operação do sistema de dupla filtração pressurizada necessitou de ajuste na dosagem dos produtos químicos. A adaptação das dosagens seguiu os novos valores estabelecidos para a operação da ETA.

Desse modo, as dosagens de produto químico foram alteradas, as novas dosagens foram: 20mg/L de PAC, 5mg/L de polímero catiônico, 2mg/L de cloro (pureza de 65%). As vazões de trabalho foram constantes de 0,39m³/h, em ambos os filtros pressurizados, correspondendo a uma taxa de filtração de 300m³/m².dia.

4.3.3 Carreira de filtração

Durante o processo de filtração foram avaliadas as características de turbidez e perda de carga a cada hora do período da carreira de filtração, de maneira independente para cada um dos filtros. Foram avaliados também os valores de turbidez, pH e cor da água bruta a cada duas horas no laboratório da CAGECE ao longo de toda a carreira de filtração.

As carreiras de filtração eram consideradas encerradas quando:

- Atingia-se a perda de carga máxima (1,03m) proposta para o sistema piloto convencional;
- Ocorresse transpasse de turbidez, para água filtrada, superior ao limite estabelecido na Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S (0,5 uT).

Quando o ensaio de turbidez, durante a carreira de filtração, apresentava valor superior a (0,5 uT), outros dois ensaios eram realizados após 10 e 15min do resultado inicial,

para confirmação do transpasse. Se os dois resultados para os ensaios de turbidez fossem superior ao valor inicial a carreira era finalizada, procedendo-se, em seguida, com a retrolavagem do filtro.

A turbidez foi medida por meio de um turbidímetro portátil de marca Hach, calibrado em fevereiro e novamente em maio de 2017. As medidas de perda de carga foram realizadas com um manômetro diferencial digital da marca Instruterm (Figura 17).

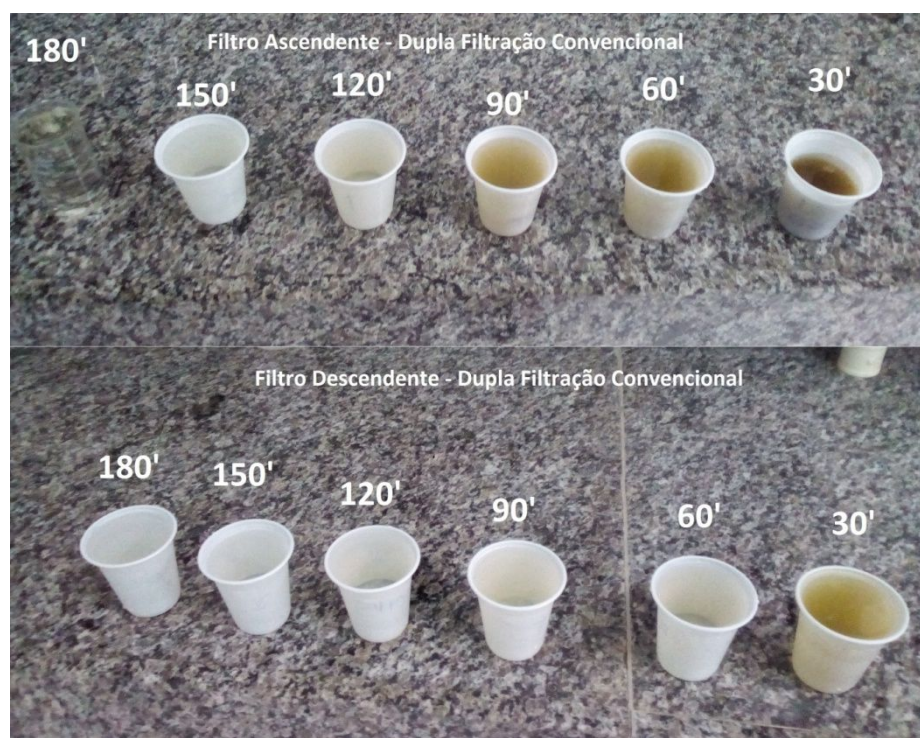
Figura 17- Equipamentos de medição



Fonte: Autor (2017).

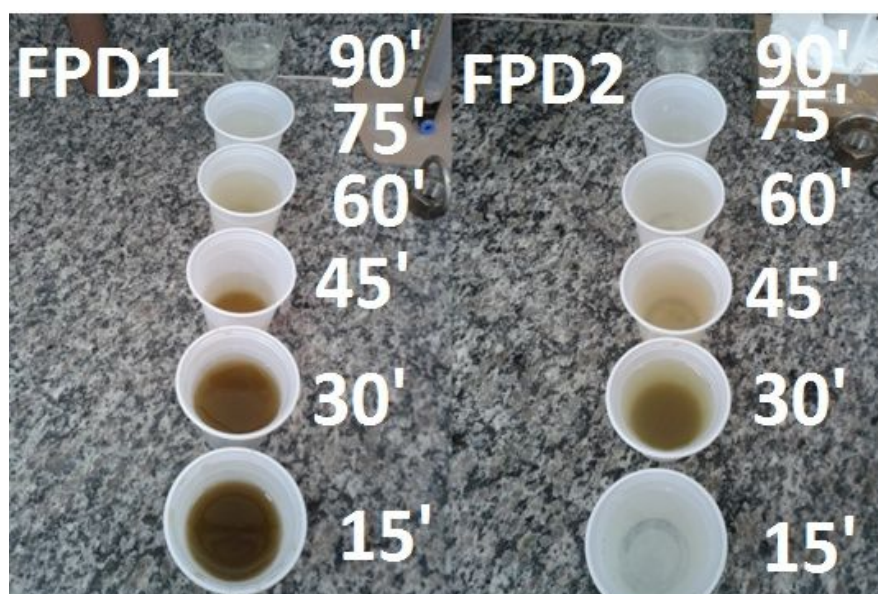
Para construção da curva de saída do lodo ao final da carreira de filtração, no momento da retrolavagem dos filtros, ocorreram coletas sucessivas da água de lavagem a cada 30 segundos do momento inicial para o sistema convencional (Figura 18) e a cada 15 segundos para o sistema modificado (Figura 19). O intervalo entre as amostras predeterminado em função da duração do período de lavagem previsto em projeto. Quando utilizado um tempo superior entre as coleta para a água de lavagem, a precisão da construção do gráfico foi significativa alterada não representando os diferentes estágios de lavagem. Após as amostras serem coletadas, foram realizadas as determinações de turbidez e verificado o tempo ótimo de lavagem e o momento de maior saída de lodo.

Figura 18- Água de lavagem dupla filtração convencional do sistema piloto 2h de operação



Fonte: Autor (2017).

Figura 19- Água de lavagem dos filtros pressurizados do sistema piloto 2h de operação.



Fonte: Autor (2017).

FPD1- Filtro Pressurizado Descendente 1.

FPD2- Filtro Pressurizado Descendente 2.

Foi realizada uma coleta de água bruta e filtrada na data de 12/07/2017 para análise dos sistemas de filtração convencional e modificada, com a finalidade de verificar se ocorria

modificação de sua qualidade em virtude da alteração do sistema de filtração.

A amostra de água bruta foi coletada no início da carreira de filtração, e para os sistemas pilotos após 1h e 2h de funcionamento dos mesmos. O tempo de coleta foi determinado para a avaliação do momento inicial e da metade da carreira de filtração dos filtros pressurizados onde os valores de turbidez começavam a se aproximar ou exceder o valor máximo permitido.

Os parâmetros avaliados foram: clorofila, Coliformes totais, cor aparente, pH, dureza total, cloretos sulfato, nitrato, nitrito e amônia, por estarem relacionados a qualidade da água destinada a abastecimento publico. Todas as amostras foram analisadas no Laboratório da CAGECE e seguiram os métodos e protocolos recomendados no Standard Methods (2012, 22º Ed).

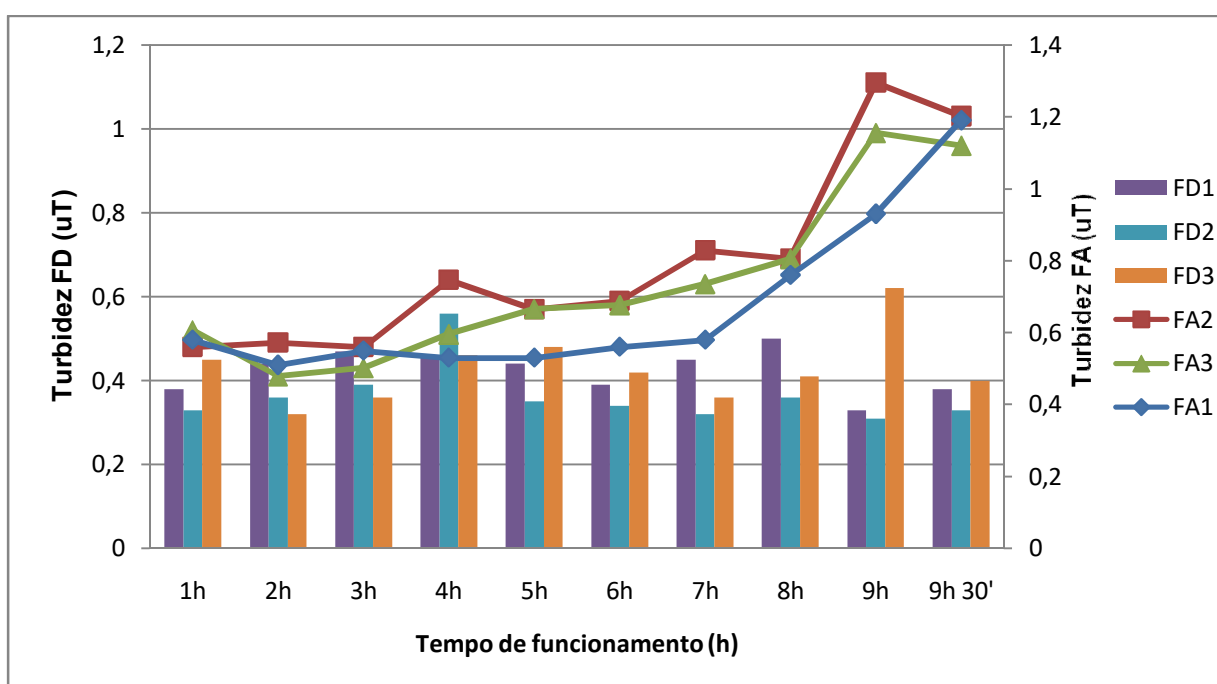
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Turbidez dos sistemas de dupla filtração convencional

Para o sistema de dupla filtração convencional as três carreiras de operação realizadas demonstraram o mesmo tempo duração de nove horas e trinta minutos, encerrando-se depois de constatado a perda de carga máxima estabelecida em projeto para a unidade de filtração descendente (1,03 m).

O filtro ascendente apresentou para as carreiras de filtração turbidez mínima variando entre 0,41 - 0,51 e turbidez máxima variando entre 0,99 - 1,19 conforme apresentado na figura 20.

Figura 20- Valores de turbidez para a dupla filtração convencional



Fonte: Autor (2017).

- FA-filtro ascendente.
- FD- filtro descendente.

* A numeração designa a carreira de filtração.

De acordo com o gráfico da figura 18, observa-se que os valores de turbidez da água filtrada, em ambos os filtros, aumentaram com o passar das horas de funcionamento como consequência da colmatação do leito filtrante. Como se manteve constante a vazão do sistema, não houve alteração da taxa de filtração, mas apenas da perda de carga.

As elevações de turbidez da água filtrada se mostraram mais acentuadas após a 6ª h de

funcionamento, resultado de uma sobrecarga maior no filtro descendente, para manutenção da qualidade da água.

No arranjo de dupla filtração, o filtro ascendente recebe inicialmente uma grande quantidade de flocos, dos quais aproximadamente 50% ficam retidos ao longo da carreira de filtração em sua camada suporte, e os flocos restantes ficam retidos ao longo do leito filtrante. Nesse contexto, tanto a camada suporte quanto a camada filtrante passam a realizar o polimento das águas, de modo que quando vazios se encontram preenchidos ocorre à liberação mais acentuada de impurezas para a unidade posterior (BOTARI e DI BERNARDO, 2007, GHISI, 2016). De acordo com Cirne (2014), em seus experimentos utilizando diferentes granulometrias e taxas de filtração para sistemas de dupla filtração, comprovou-se que através da redução da granulometria do leito filtrante em filtros ascendentes e descendentes é possível otimizar a remoção de turbidez na filtração. Entretanto, fatores como taxa de filtração e características granulométricas do leito filtrante acabam por modificar a perda de carga, de modo que para leitos filtrantes de menor granulometria maior será a perda de carga (BOTARI e DI BERNARDO, 2009).

Para Kuroda (2002), a duração da carreira de filtração está diretamente associada à qualidade da água bruta que advém ao sistema. Para os sistemas de dupla filtração é necessário que os filtros ascendentes operem nas primeiras horas retendo a maior parte flocos dispersos no meio líquido, evitando assim uma sobrecarga de remoção por parte dos filtros descendentes para assegurar a eficiência do tratamento.

O filtro descendente, nos ensaios realizados, apresentou nas carreiras de filtração turbidez mínima variando entre 0,31 - 0,33 e turbidez máxima variando entre 0,50 - 0,62. Ao final dos ensaios, a turbidez para as carreiras de filtração variavam entre 0,33 - 0,40 cumprindo as exigências estabelecidas na Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/M.S que requer um valor máximo de 0,5 uT em 95% das amostras coletadas para água pós-filtração.

Estudos realizados por Braga (2005), mostraram que em sistemas de dupla filtração convencional grande parte das impurezas são removidas no filtro ascendente, sendo portanto o filtro descendente responsável por um polimento adicional das águas que adentram a unidade. Ademais, segundo o mesmo autor, a qualidade da água do filtro descendente não foi influenciada imediatamente pela degradação da qualidade da água advinda do filtro ascendente, pois sua matriz filtrante ainda permitia a retenção dos flocos presentes no meio líquido, porém devido à maior velocidade de colmatação do leito a perda de carga apresentou rápida elevação dos seus valores.

Situação similar ocorreu no desenvolvimento desta pesquisa (figura 18), uma vez que a turbidez do filtro descendente se manteve relativamente constante durante todo o período, mas após o período de 6h de funcionamento, com a redução da qualidade das águas do filtro ascendente, a perda de carga do filtro descendente passou a sofrer significativo aumento nas horas posteriores.

Os valores de turbidez da água filtrada dos dois filtros apresentaram pequena variação ao longo das carreiras de filtração. Após a 6ª h de funcionamento o filtro ascendente passou a apresentar redução de sua qualidade, identificado por meio do ensaio de turbidez que demonstrou o transpasse dos flocos. Entretanto, a qualidade para as águas do filtro descendente se manteve relativamente constante.

No interior do filtro ascendente sua camada suporte atua como uma unidade de floculação, em que os flocos, à medida que crescem, vão sendo retidos nas camadas superiores do leito filtrante. Porém, com a colmatação dos vazios no filtro ascendente, ocorre a redução da retenção dos flocos que passam a se deslocar para o filtro descendente. Isso ocorre em parte, pois com a redução dos vazios no filtro o processo de floculação na unidade tornasse menor incidindo em um carregamento de partículas não floculadas com pequeno diâmetro para o filtro descendente.

A qualidade da água bruta apresentou maior variação de turbidez para a última carreira de filtração atingindo valores máximos de 8,60 uT e valores mínimos de 3,84 uT. Para as demais carreiras de filtração a qualidade da água bruta se manteve entre 3,17 e 6,32 uT, sempre tendendo a elevação de valores ao longo do dia. Tal condição poderia ser explicada devido ao processo de estratificação térmica presente no manancial, que pode provocar ressuspensão do fitoplâncton elevando os valores de cor e turbidez das águas captadas (FUNCEME, 2002).

A eficiência de remoção média de turbidez no filtro ascendente variou entre 85% e 89% para as carreiras de filtração (Quadro 7). No decorrer do processo, com a colmatação do filtro ascendente, a eficiência de remoção de turbidez no filtro descendente passou a obter acréscimo, com eficiência média de remoção entre 28% e 41%. Os valores de turbidez da água tratada pelo sistema de dupla filtração convencional, sofreram pouca variação e ao final de todas as carreiras de filtração sempre estiveram de acordo com o valor máximo permitido de 05 uT presente Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S.

Quadro 7- Valores de Turbidez no Sistema de Dupla Filtração Convencional.

Hora de coleta	Valores de Turbidez (uT)			Eficiência de Remoção de Turbidez	
	27/04/2017	1ª Carreira			
	Água Bruta	Filtro Ascendente	Filtro Descendente	Filtro Ascendente	Filtro Descendente
1h	3,96	0,58	0,38	85%	34%
2h	-	0,51	0,44	87%	14%
3h	3,17	0,55	0,47	83%	15%
4h	-	0,53	0,46	83%	13%
5h	4,67	0,53	0,44	89%	17%
6h	-	0,56	0,39	88%	30%
7h	5,83	0,58	0,45	90%	22%
8h	-	0,76	0,50	87%	34%
9h	5,80	0,93	0,33	84%	65%
9h 30'	5,81	1,19	0,38	80%	68%
Hora de coleta	03/05/2017	2ª Carreira			
	Água Bruta	Filtro Ascendente	Filtro Descendente	Filtro Ascendente	Filtro Descendente
1h	4,70	0,48	0,33	90%	31%
2h	-	0,49	0,36	90%	27%
3h	5,55	0,48	0,39	91%	19%
4h	-	0,64	0,56	88%	13%
5h	4,46	0,57	0,35	87%	39%
6h	-	0,59	0,34	87%	42%
7h	5,55	0,71	0,32	87%	55%
8h	-	0,69	0,36	88%	48%
9h	5,98	1,11	0,31	81%	72%
9h 30'	6,32	1,03	0,33	84%	68%
Hora de coleta	09/05/2017	3ª Carreira			
	Água Bruta	Filtro Ascendente	Filtro Descendente	Filtro Ascendente	Filtro Descendente
1h	3,84	0,52	0,45	86%	13%
2h	-	0,41	0,32	89%	22%
3h	5,32	0,43	0,36	92%	16%
4h	-	0,51	0,46	90%	10%
5h	5,04	0,57	0,48	89%	16%
6h	-	0,58	0,42	88%	28%
7h	7,97	0,63	0,36	92%	43%
8h	-	0,69	0,41	91%	41%
9h	5,66	0,99	0,62	83%	37%
9h 30'	8,60	0,96	0,40	89%	58%

Fonte: Autor (2017).

Segundo Alcantara (2010), se utilizando de um sistemas de dupla filtração para o tratamento de águas para abastecimento, foi possível amortecer de forma mais eficiente maiores variações de qualidade e remeter o polimento final das águas ao filtro descendente assegurando uma maior eficiência no tratamento e maior tempo de operação do sistema de filtração. O mesmo fato foi identificado na pesquisa em que o sistema de dupla filtração convencional suportou de forma satisfatória a variação de qualidade da água ao longo do dia.

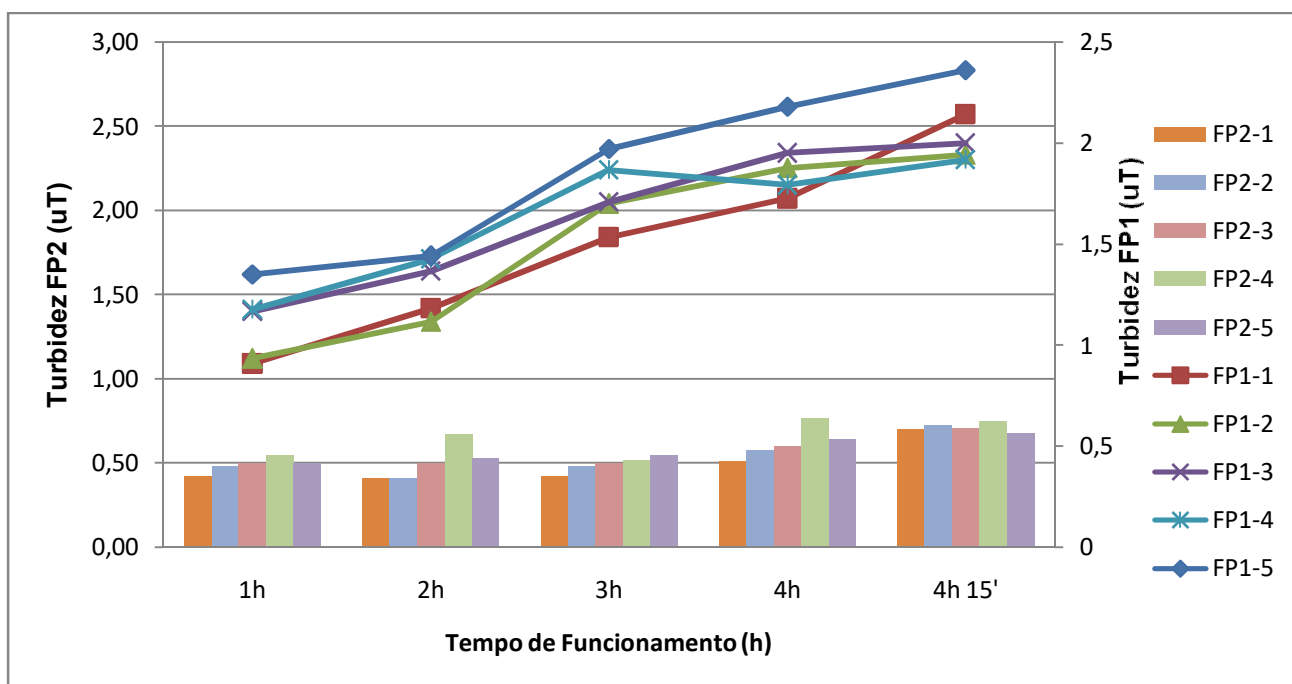
Na pesquisa foi facilmente identificado que o filtro ascendente nas horas iniciais realizava a maior retenção de flocos e remetia ao filtro descendente apenas um polimento final as águas filtradas corroborando com a pesquisa anterior.

5.2 Turbidez dos sistemas de dupla filtração modificado

A utilização dos filtros pressurizados caracteriza-se por: seguir o princípio dos filtros rápidos por gravidade, permitindo uma área reduzida para o tratamento de água e trabalhar com elevadas vazões, apesar de serem pouco estudados no tratamento de água para o abastecimento, pois é um sistema bastante sensível à variação da qualidade da água bruta (WATER TREATMENT, 2017).

Para os filtros pressurizados (FP1 e FP2) as carreiras de filtração apresentaram duração de quatro horas, sendo o fator limitante de operação os elevados valores de turbidez da água filtrada obtidos após esse período de funcionamento. O filtro pressurizado (FP1) apresentou para as cinco carreiras de filtração turbidez mínima variando entre 1,09 - 1,41 e turbidez máxima variando entre 2,30 - 2,57 conforme apresentado na figura 21. Os valores demonstram uma elevação da turbidez do efluente filtrado com o passar das horas de funcionamento.

Figura 21- Valores de turbidez para o sistema de filtração pressurizada.



Fonte: Autor (2017).

- FP1-filtro pressurizado 1.
- FP2- filtro pressurizado 2.
- * A numeração final designa a carreira de filtração.

Deus, Testezlaf e Mesquita (2015), estudando a eficiência de filtros de areia pressurizados para remoção de diferentes tamanhos de partículas na água de irrigação constataram que taxas de até $75\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ os filtros são eficiente na remoção de areias com tamanhos maiores que $60\mu\text{m}$. Ainda segundo esses autores a diminuição da granulometria do leito filtrante pode aumentar a eficiência de remoção de pequenas partículas, mas em consequência passaram a elevar a perda de carga e reduzir o funcionamento da carreira de filtração.

Com base no sistema de dupla filtração modificado estudado a retenção de flocos no filtro (FP2), que possuía um leito de menor granulometria, possibilitava um maior polimento quando empregado baixos índices de turbidez, decorrente de sua pequena granulometria, corroborando com a pesquisa anterior.

Em um sistema de dupla filtração modificado composto de um pré-filtro e dois filtros descendentes, foi observado que para que ocorra remoção da turbidez satisfatória nas unidades de filtração, quanto menor o material que deve ser removido menor será a granulometria do leito (LINHARES *et al.*, 2016).

Para o sistema de dupla filtração modificado pesquisado, observou-se que para a

granulometria do filtro pressurizado 1 (FP1) os valores mínimos de turbidez obtidos estão acima de 1 uT. Estes valores indicam a dificuldade do leito filtrante em reter os microflocos presentes na unidade ocasionando a redução da carreira de filtração da unidade posterior devido à maior concentração de flocos que será encaminhado a ela.

O filtro pressurizado mesmo possuindo a mesma granulometria do filtro ascendente por possuir um fluxo descendente e pressurizado, apresenta dificuldade em reter os microflocos produzidos, a pressurização no sistema que impulsiona o flocos a matriz filtrante também possibilita o carregamento das partículas retidas no mesmo leito.

O filtro pressurizado 2 (FP2) apresentou para as carreiras de filtração turbidez mínima variando entre 0,41 - 0,50 e turbidez máxima variando entre 0,68 - 0,77. Ao final dos ensaios, a turbidez para as carreiras de filtração variavam entre 0,68 - 0,75. A maioria dos resultados de turbidez demonstrou que para água pós-filtrada, mesmo nas horas iniciais, os resultados já estão próximos do valor máximo permitido, ou em desacordo com a Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S que limita o valor máximo de 0,5 uT em 95% das amostras coletadas, identificando a dificuldade de se obter uma remoção satisfatória de turbidez (Quadro 8).

Quadro 8- Valores de turbidez no sistema de dupla filtração pressurizado

Hora de coleta	Valores de Turbidez (uT)			Eficiência de Remoção de Turbidez	
	31/05/2017	1ª Carreira			
	Água Bruta	Filtro Pressurizado 1	Filtro Pressurizado 2	Filtro Pressurizado 1	Filtro Pressurizado 2
1h	6,96	1,09	0,42	84%	61%
2h	-	1,42	0,41	80%	71%
3h	6,98	1,84	0,42	74%	77%
4h	-	2,07	0,51	70%	75%
4h 15'	5,95	2,57	0,70	57%	73%
Hora de coleta	01/06/2017	2ª Carreira			
	Água Bruta	Filtro Pressurizado 1	Filtro Pressurizado 2	Filtro Pressurizado 1	Filtro Pressurizado 2
1h	8,19	1,12	0,48	86%	57%
2h	-	1,34	0,41	84%	69%
3h	5,28	2,04	0,48	61%	76%
4h	-	2,25	0,58	57%	74%
4h 15'	6,99	2,33	0,73	67%	69%
Hora	01/06/2017	3ª Carreira			

de coleta	Água Bruta	Filtro Pressurizado 1	Filtro Pressurizado 2	Filtro Pressurizado 1	Filtro Pressurizado 2
1h	6,99	1,4	0,50	80%	64%
2h	-	1,64	0,50	77%	70%
3h	6,83	2,05	0,50	70%	76%
4h	-	2,34	0,60	66%	74%
4h 15'	6,26	2,40	0,71	62%	70%
Hora de coleta	07/06/2017	4ª Carreira			
	Água Bruta	Filtro Pressurizado 1	Filtro Pressurizado 2	Filtro Pressurizado 1	Filtro Pressurizado 2
1h	5,83	1,41	0,55	76%	61%
2h	-	1,71	0,67	71%	61%
3h	5,64	2,24	0,52	60%	77%
4h	-	2,15	0,77	62%	64%
4h 15'	4,60	2,3	0,75	50%	67%
Hora de coleta	07/06/2017	5ª Carreira			
	Água Bruta	Filtro Pressurizado 1	Filtro Pressurizado 2	Filtro Pressurizado 1	Filtro Pressurizado 2
1h	4,49	1,35	0,5	70%	63%
2h	-	1,44	0,53	68%	63%
3h	8,64	1,97	0,55	77%	72%
4h	-	2,18	0,64	75%	71%
4h 15'	5,06	2,36	0,68	53%	71%

Fonte: Autor (2017).

De acordo com Ncube *et al.*, (2016), utilizando-se de diferentes meios filtrantes para filtros pressurizados no tratamento de águas residuárias terciárias, foi possível observar que a redução dos valores de turbidez no tratamento com filtros pressurizados só se torna eficiente com leitos filtrantes de pequena granulometria, mas resultando em uma elevada perda de carga.

A qualidade da água bruta apresentou variação de turbidez com valores mínimo e máximos, respectivamente, de 4,49 uT e 8,64 uT. Esses valores encontram-se dentro dos valores apresentados pela literatura para águas superficiais lênticas do nordeste que variam entre 2,4 e 10,3 uT (SENS *et al* 2002; BRAGA 2005; SÁ 2012).

Para Lima e Capelo Neto (2015), Na utilização de filtro pressurizado descendente a montante de um filtro ascendente no tratando águas a taxa de 300m³/m².d com turbidez que variavam entre 0,9 e 7,85, foi possível observar que as carreiras de filtração dos filtros pressurizados duravam em torno de 3h, após esse período não era vantajosa a remoção de turbidez nessas unidades.

Para o sistema de dupla filtração modificada estudado, após a terceira hora de funcionamento, foram identificados valores de turbidez para águas filtradas próximos ou acima do valor máximo permitido, corroborando com o encontrado na pesquisa de Lima e Capelo Neto (2015), em relação a duração das carreiras de filtração dessas unidades.

Com relação à eficiência de remoção de turbidez para o filtro pressurizado 1 (FP1), observou-se valor médio de remoção de 70% da turbidez, inferior ao valor observado no filtro ascendente do sistema de dupla filtração convencional, que foi de 83% de remoção para o mesmo período. Para o filtro pressurizado 2 (FP2) foi observado valor de remoção turbidez entre 68% e 70%, sendo esse bem superior à média do filtro descendente do sistema de dupla filtração convencional.

Ressalta-se que nos momentos iniciais da carreira de filtração, o filtro pressurizado 2 (FP2) já realizava uma remoção superior a 50% da remoção da turbidez afluyente, esses valores advêm da maior carga de turbidez que é imposta as unidades. Para essa unidade os valores de turbidez sempre estiveram próximos ao limite máximo permitido de 0,5 uT pela Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S. O inverso foi observado no sistema convencional, que para o filtro descendente, nas horas iniciais da carreira de filtração, realizou polimento de cerca de 20% da turbidez do filtro ascendente, pois recebia uma carga reduzida de sólidos para remoção e decorrente disso apresenta valores bem abaixo do limite máximo permitido de 0,5 uT. No sistema convencional, o polimento apresenta valor reduzido, para a unidade de filtração descendente, devido à pequena quantidade de partículas que afluem.

Desse modo, a remoção de turbidez se demonstrou mais eficiente no sistema de dupla filtração convencional. Devido à maior eficiência na retenção de flocos desempenhada pela matriz filtrante da unidade. O filtro pressurizado (FP1) por não apresentar a eficiência esperada de remoção de flocos presentes na unidade acaba por sobrecarregar o leito filtrante do filtro pressurizado (FP2), com menor granulometria de areia, reduzindo sua carreira de filtração e comprometendo a eficiência do tratamento.

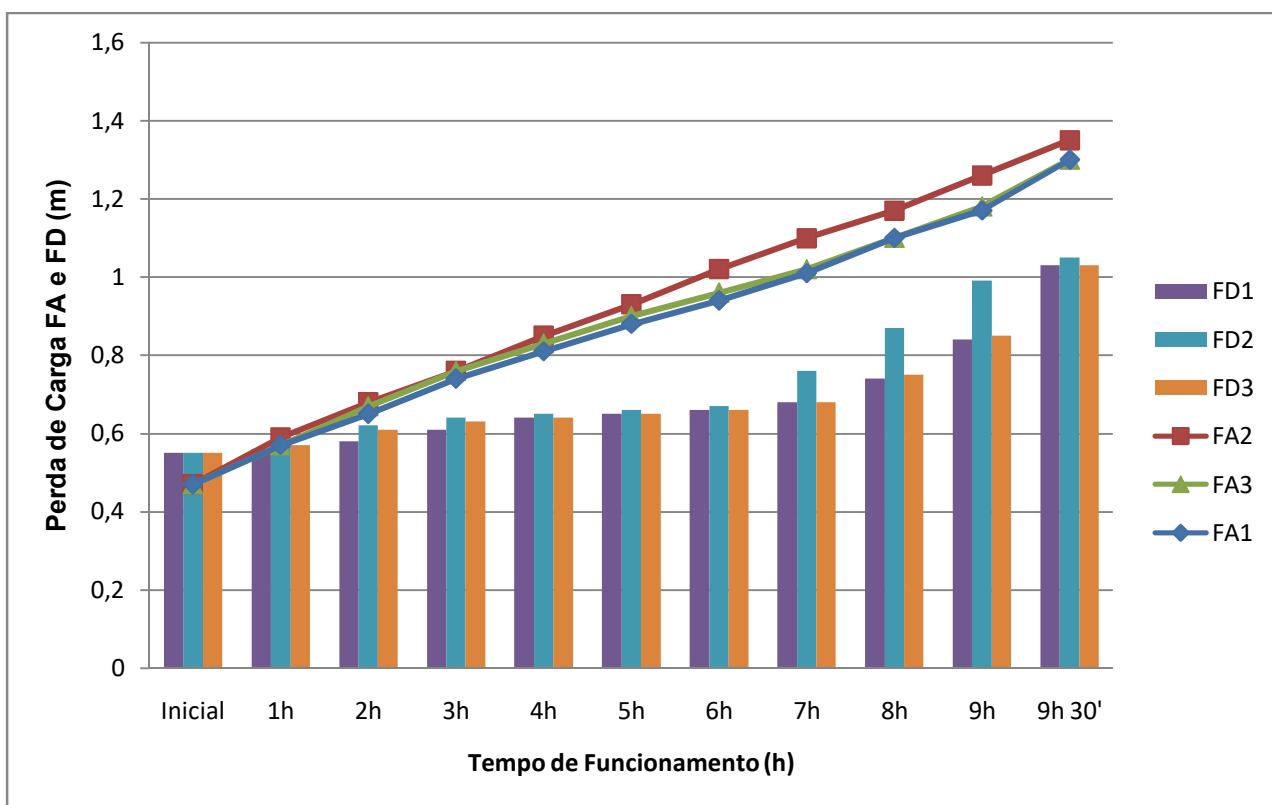
5.3 Perda de carga nos sistemas de dupla filtração convencional

De acordo com Silveira (2014), a perda de carga inicial nos sistemas de filtração se remete a resistência ao fluxo de água pelo leito filtrante limpo. Com o término da carreira de filtração, de posse do valor total de perda de carga, é possível através da subtração final menos a inicial, estimar o valor de perda de carga decorrente da colmatação do sistema.

No sistema de dupla filtração convencional, o filtro ascendente iniciou as carreiras de

filtração com perda de carga de 0,47 m em todos os ensaios (Figura 22). Essa perda de carga está associada às características do meio filtrante utilizado: granulometria do material, densidade e esfericidade da matriz filtrante. A perda de carga nesse filtro se elevou em média 9cm a cada hora de operação, culminando em uma perda de carga final que variou entre 1,30m a 1,35m.

Figura 22- Perda de carga no sistema de dupla filtração convencional.



Fonte: Autor (2017).

- FA-filtro ascendente.
- FD- filtro descendente.

* A numeração designa a carreira de filtração.

A perda de carga nas unidades de filtração tende a se elevar mais rápido quando águas com alta concentração de turbidez, cor e presença de algas passam pelo processo de filtragem (NCUBE *et al.*, 2016). Segundo Wiecheteck, Benini e Di Bernardo (2017), a aceleração do aumento da perda de carga nos filtros decorrentes da cor e tubidez ocorre, pois quanto mais elevados forem os valores desses parâmetros, maior será a formação e retenção de flocos na matriz filtrante, com isso elevando a perda de carga e reduzindo o tempo da carreira de filtração.

Segundo Di Bernardo, Kuroda e Paula (2002), estudando a perda de carga em um sistema de dupla filtração, em que o filtro ascendente possuía 4 camadas com material granulométrico variado, todas com a mesma espessura a uma mesma taxa de filtração, foi possível observar que a perda de carga foi maior quanto menor era a granulometria da subcamada, sendo a camada mais fina responsável por 60% da perda de carga total.

Para o filtro descendente do sistema de dupla filtração convencional as carreiras de filtração iniciaram sua operação com uma perda de carga de 0,55 m para todos os ensaios. Essa perda de carga foi superior à obtida no filtro ascendente e está associada ao material do leito filtrante utilizado, que por ser um material mais fino desenvolve uma maior perda de carga. A perda de carga nesse filtro se elevou em média 6cm a cada hora de funcionamento, o que culminou em uma perda de carga final de 1,03m, conforme apresentado no quadro 9.

Esse parâmetro foi o limitante na carreira de filtração do sistema de dupla filtração convencional que foi encerrado com 9h 30min de operação, uma vez que para o projeto dos filtros existentes uma maior perda de carga faria os mesmos transbordarem. A perda de carga após a 7h de funcionamento passou a apresentar maiores elevações, saltando de valores de 1cm a 3cm para valores superior a 6cm por hora.

Quadro 9- Valores de perda de carga no sistema de dupla filtração convencional em três carreiras de filtração.

Hora de coleta	Valores de Perda de Carga					
	1ª Carreira		2ª Carreira		3ª Carreira	
	Filtração Ascendente	Filtração Descendente	Filtração Ascendente	Filtração Descendente	Filtração Ascendente	Filtração Descendente
Inicial	0,47	0,55	0,47	0,55	0,47	0,55
1h	0,57	0,56	0,59	0,58	0,57	0,57
2h	0,65	0,58	0,68	0,62	0,67	0,61
3h	0,74	0,61	0,76	0,64	0,76	0,63
4h	0,81	0,64	0,85	0,65	0,83	0,64
5h	0,88	0,65	0,93	0,66	0,90	0,65
6h	0,94	0,66	1,02	0,67	0,96	0,66
7h	1,01	0,68	1,10	0,76	1,02	0,68
8h	1,10	0,74	1,17	0,87	1,10	0,75
9h	1,17	0,84	1,26	0,99	1,18	0,85
9h 30'	1,30	1,03	1,35	1,03	1,30	1,03

Fonte: Autor (2017).

O processo de elevação da perda de carga ocorre pela colmatação do leito filtrante sendo influenciado pela redução da qualidade da água afluenta ao filtro, uma vez que as águas brutas com turbidez superior a 1 uT tendem a produzir uma colmatação mais rápida resultando em uma maior perda de carga (BRAGA, 2005). Após a colmatação total do leito filtrante se observará uma perda de carga máxima projetada para o filtro. Desse modo, deverá ocorrer o processo de lavagem do mesmo para que as condições iniciais do processo sejam restauradas (NIETO *et al.*, 2017).

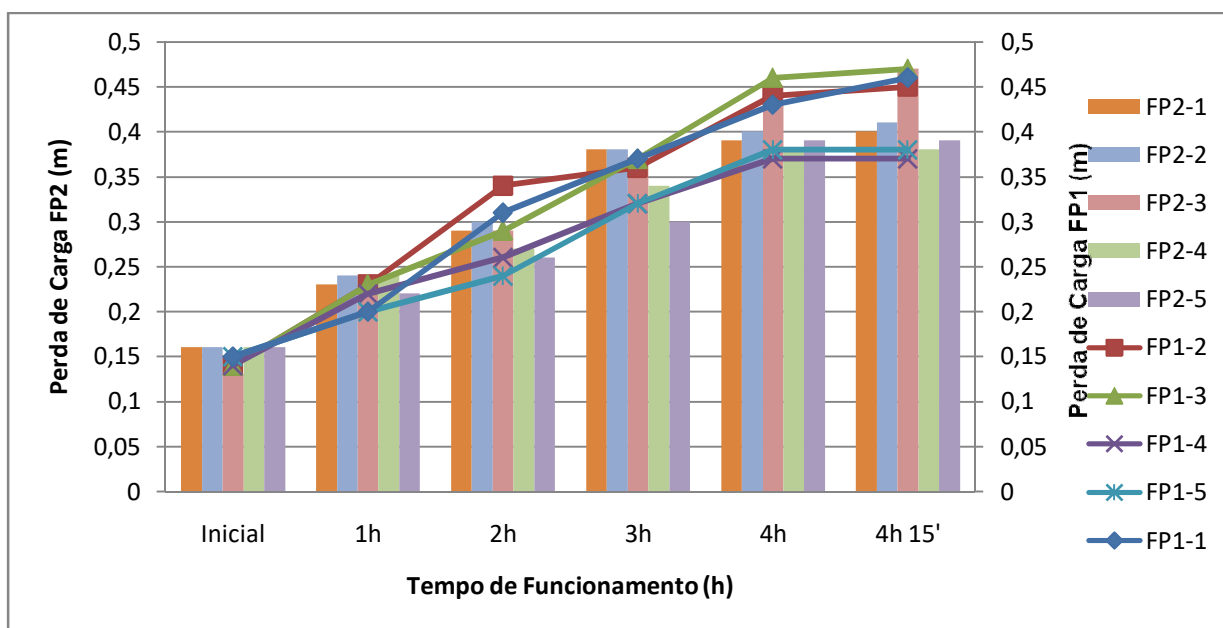
De acordo com Gusmão (2001), para sistemas de dupla filtração convencional foi observado que a perda de carga apresenta um crescimento mais intenso na unidade de filtração ascendente, por estar sujeita a um maior aporte de flocos retidos em sua matriz filtrante. Esse fato corrobora com o encontrado nesta pesquisa, uma vez que o filtro ascendente atingiu 1,35 m enquanto que o descendente atingiu 1,03 m para o tempo de 9h e 30 minutos de operação.

5.4 Perda de carga nos sistemas de dupla filtração modificado

O filtro Pressurizado 1 (FP1) iniciou as carreiras de filtração com perda de carga entre 0,14m a 0,15m (Figura 23). Essa perda de carga está associada ao leito filtrante utilizado e varia de acordo com o material e com suas características, como: granulometria e esfericidade e altura de leito filtrante. Como a altura do leito filtrante utilizado nos filtros pressurizados é inferior ao do sistema dupla filtração convencional piloto, mesmo apresentando material filtrante idêntico, a perda de carga associada a esse tornasse menor.

De acordo com Sá (2012), utilizando camadas filtrantes de areia de alturas de 2m, 1,6m e 1,2m de espessura e camadas suporte de 40cm, 80cm e 120cm em filtros ascendentes percebeu-se, através de medições com piezômetro, que quanto maior a perda de carga maior era a coluna filtrante.

Figura 23- Perda de carga na dupla filtração modificada em cinco carreiras de filtração.



Fonte: Autor (2017).

➤ FP1-filtro pressurizado 1.

➤ FP2- filtro pressurizado 2.

* A numeração final designa a carreira de filtração.

A perda de carga no filtro pressurizado 1 (FP1) se elevou em media 7cm a cada hora de funcionamento o que culminou em uma perda de carga final que variou entre 0,37m a 0,47m. Com a elevação da perda de carga no filtro ocorre a indicação de colmatção dos vazios, reduzindo a eficiência de remoção dos flocos e possibilitando desprendimento dos flocos anteriormente retidos (NIETO *et al.*, 2017).

O filtro Pressurizado 2 (FP2) iniciou as carreiras de filtração com perda de carga entre 0,13m a 0,16m, sendo o valor de 0,16m o valor mais constante. Essa perda de carga está associada ao leito filtrante e varia de acordo com o material utilizado e com suas propriedades como granulometria e esfericidade.

Por apresentar uma altura de leito filtrante menor que nos filtro descendente do sistema de dupla filtração convencional estudados, mesmo apresentando granulometria igual, sua perda de carga foi menor. A perda de carga nesse filtro se elevava em media 6cm a cada hora de funcionamento o que culminou em uma perda de carga final que variava entre 0,38m a 0,47m (Quadro 10).

Com a constante passagem de água pelo filtro vai se desenvolvendo, ao longo do tempo, a obstrução dos espaços vazios existentes no leito filtrante, provocando a elevação da perda de carga e variação da altura manométrica do sistema (PINHO e OLIVEIRA, 2016).

Quadro 10- Valores de perda de carga no sistema de dupla filtração pressurizado em cinco carreiras de filtração.

Hora de coleta	1ª Carreira		2ª Carreira		3ª Carreira		4ª Carreira		5ª Carreira	
	Perda de carga filtro 1	Perda de carga filtro 2	Perda de carga filtro 1	Perda de carga filtro 2	Perda de carga filtro 1	Perda de carga filtro 2	Perda de carga filtro 1	Perda de carga filtro 2	Perda de carga filtro 1	Perda de carga filtro 2
Inicial	0,15	0,16	0,14	0,16	0,14	0,13	0,14	0,16	0,15	0,16
1h	0,20	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23	0,22	0,24	0,2	0,22
2h	0,31	0,29	0,34	0,30	0,29	0,29	0,26	0,27	0,24	0,26
3h	0,37	0,38	0,36	0,38	0,37	0,37	0,32	0,34	0,32	0,30
4h	0,43	0,39	0,44	0,40	0,46	0,45	0,37	0,38	0,38	0,39
4h 15'	0,46	0,40	0,45	0,41	0,47	0,47	0,37	0,38	0,38	0,39

Fonte: Autor (2017).

Nos experimentos de Lima (2015), utilizando filtros pressurizados descendente como pré-filtros de um sistema ascendente com taxa de filtração de 200 m³/m².dia foram observados altos valores de turbidez mesmo nas horas iniciais, entretanto foram baixos os valores de perda de carga produzidos, sendo inicialmente observado uma perda de carga de 0,3m antes do inicio da operação.

Através dos dados obtidos foi possível observar que a perda de carga para os filtros, pressurizado 1 e 2, se elevou de forma semelhante. Esse fato pode estar associado a relação de vazios e retenção de flocos existentes no leito filtrante. O leito filtrante do FP2 apresenta menor retenção de material quando comparado ao FP1 que recebe a água bruta, porém a retenção de flocos em sua matriz eleva igualmente a perda de carga devido a granulometria do leito filtrante.

Foi observado que os filtros pressurizados apresentaram curta carreira de filtração quando comparados aos do sistema de dupla filtração convencional, e com perda de carga significativamente inferior aos do sistema convencional. Tal fato decorre da menor altura do leito filtrante nas unidades pressurizadas, que produz uma menor perda de carga e, conseqüentemente, apresenta menor capacidade de retenção de partículas, contribuindo indiretamente para a redução da duração da carreira filtração.

5.5 Variação da qualidade de água entre os sistemas de filtração

De acordo com Braga (2014), é essencial o conhecimento das características de qualidade da água bruta, pois essas influenciam de forma direta no processo de tratamento, tanto na escolha da tecnologia mais adequada como no consumo de insumos químicos.

A qualidade da água bruta utilizada nos sistemas de filtração foi avaliada de acordo com os parâmetros da Resolução 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) para corpos de água classe II, considerando devido à inexistência de enquadramento específico para a mesma (Quadro 11).

Quadro 11- Características de qualidade da água bruta do Açude Gavião.

Parâmetros	Água Bruta		Método de análise
	Valor	Valor máximo	
Clorofila a ($\mu\text{g/L}$)	45,98	30,00	Espectrofotometria
Feofitina a ($\mu\text{g/L}$)	3,83	-	Espectrofotometria
Coliformes totais (NMP/100ml)	4,5E3	-	Substrato cromogênico
Escherichia coli (NMP/100ml)	1,00	<100	Substrato cromogênico
Cor aparente (uH)	50,00	75,00	Comparação visual
Turbidez (uT)	9,05	100	Turbidímetro
pH	8,03	6 a 9,5	Potenciometria
Dureza Total (mg CaCO_3/L)	80,78	-	Complexometria com EDTA
Cloreto (mg Cl^-/L)	70,18	250,00	Argentometria
Sulfato (mg $\text{SO}_4^{2-}/100\text{ml}$)	16,00	250,00	Espectrofotometria
Nitrato (mg $\text{N-NO}_3^-/\text{L}$)	0,01	10,00	Espectrofotometria
Nitrito (mg $\text{N-NO}_2^-/\text{L}$)	ND	1,00	Espectrofotometria
Amônia (mg $\text{N-NH}_3/\text{L}$)	0,39	1,00	Espectrofotometria

Fonte: Autor (2017).

ND- Não detectável

Para o parâmetro Clorofila “a” o valor observado na água bruta excedeu ao máximo permitido em 15,98 $\mu\text{g/L}$. Valores elevados de Clorofila “a” são indicativos de presença excessiva de algas. Tais valores demonstram a suscetibilidade de colmatção precoce da matriz filtrante devido à carga excessiva de cianobactérias imposta às unidades. Segundo Tavares (2008), um aumento excessivo de clorofila pode provocar curtas carreiras de filtração inviabilizando a utilização do sistema de tratamento ou mesmo comprometer o uso de determinadas tecnologias para o tratamento de água.

Outro indicativo decorrente de concentrações elevadas de clorofila “a” é a possibilidade de geração de cianotoxinas e subprodutos da desinfecção que irá variar em relação à tecnologia de tratamento utilizada, podendo em casos extremos impossibilitar a disponibilização de água à população (WATSON, RIDAL, BOYER, 2008).

Em relação ao parâmetro cor foi observado que a concentração atual está compatível com o exigido pela tecnologia de tratamento de dupla filtração, portanto sem comprometer e sobrecarregar o sistema. Para os demais parâmetros avaliados, executando aqueles não regulamentados pela Resolução Conama 357/2005, os resultados apresentaram-se de acordo com o valor máximo permitido.

A qualidade da água tratada foi avaliada de acordo com os parâmetros previstos na Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S, para os dois sistemas de filtração (Quadro 12).

Quadro 12- Características de qualidade da água tratada e valores de potabilidade segundo Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX.

Parâmetros	Dupla Filtração Convencional				Dupla Filtração Modificada				VMP	Método de análise
	Ascendente		Descendente		Descendente 1		Descendente 2			
	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 1	Coleta 2		
Coliformes totais (NMP/100ml)	-	-	-	8.7E2	-	-	-	3.3E2	Ausência em 100ml	Substrato cromogênico
Escherichia coli (NMP/100ml)	-	-	-	<1	-	-	-	<1	Ausência em 100ml	Substrato cromogênico
Cor aparente (uH)	15,00	10,00	20,00	15,00	10,00	25,00	7,50	15,00	15,00	Comparação visual
Turbidez (uT)	0,35	0,43	0,26	0,26	1,04	1,19	0,50	0,58	0,50	Turbidímetro
pH	7,76	7,70	7,70	7,71	7,80	7,79	7,77	7,82	7,00 a 9,50	Potenciometria
Dureza Total (mg CaCO ₃ /L)	82,62	87,11	81,40	82,62	91,19	84,66	85,27	85,27	500,00	Complexometria com EDTA
Cloreto (mg Cl-/L)	69,60	71,07	68,91	71,85	70,87	70,97	71,36	71,95	250,00	Argentometria
Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /100ml)	12,00	12,00	11,00	10,00	10,00	10,00	10,00	12,00	250,00	Espectrofotometria
Nitrato (mg N-NO ₃ -/L)	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	10,00	Espectrofotometria
Nitrito (mg N-NO ₂ -/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1,00	Espectrofotometria
Amônia (mg N-NH ₃ /L)	0,22	0,33	0,23	0,25	0,45	0,24	0,36	0,26	1,50	Espectrofotometria

Fonte: Autor (2017).

ND- Não detectável.

O parâmetro Coliformes totais apresentou maior número de células presentes no sistema de dupla filtração convencional ($8.7E2$ NMP/100ml) em relação ao sistema de dupla filtração modificada ($3.3E2$ NMP/100ml). O sistema de dupla filtração modificado propiciou melhor resultado para esse parâmetro devido à colmatção do seu leito filtrante. Como a duração de sua carreira de filtração é de 4h, no momento da coleta, após 2h de funcionamento, seu leito já se encontrava parcialmente colmatado favorecendo o desenvolvimento de processos químicos e biológicos ocasionando a redução mais acentuada dos Coliformes totais presentes na amostra. Para o sistema de dupla filtração convencional, que apresentou carreira de filtração superior às 9h de funcionamento, no momento da coleta o seu leito filtrante ainda se apresentava demasiadamente limpo reduzindo assim a eficiência de remoção de Coliformes totais.

O processo de remoção de Coliformes totais em uma unidade de filtração ocorre por mecanismos físicos, químicos e biológicos, pois com a maturação do leito filtrante os mecanismos se intensificam e a remoção se torna mais acentuada (MURTHA e HELLER, 2003). Segundo Camplesi, Perez e Siqueira (2010), a concentração de Coliformes totais está diretamente associada à presença de elevados valores de turbidez com isso, a utilização de leitos filtrantes de menor granulometria no processo de filtração favorece a retenção de uma maior concentração de Coliformes totais.

Para o parâmetro cor aparente foi observado que no filtro descendente do sistema de dupla filtração convencional ocorre redução dos valores observados na saída do tratamento entre as coletas 1 e 2, mas para o sistema de dupla filtração modificado a tendência se mostra oposta, ou seja, aumentando entre as análises, indicando que o leito filtrante já se apresenta significativamente colmatado. Esse resultado pode ser comprovado através das amostras de turbidez, que para o momento da segunda coleta, já indica valor de turbidez efluente acima do permitido para águas pós-filtração no sistema de dupla filtração modificada.

O acompanhamento dos parâmetros de qualidade fornece indicativos do desempenho do processo de filtração, de modo que a redução da qualidade da água produzida nos filtros retrata a colmatção do sistema e transpasse de impurezas retidas nas unidades para a água tratada (ALCANTARA, 2010).

Para os demais parâmetros analisados os valores obtidos se apresentaram abaixo do valor máximo permitido e não apresentaram diferença significativa entre os sistemas de filtração estudados.

5.6 Produção de água e curva de saída do lodo no sistema de dupla filtração convencional

Para o sistema de dupla filtração convencional a carreira de filtração teve duração de 9h:30min e o volume total de água filtrada no sistema foi de 3.420 L.

A vazão da água de lavagem para o filtro ascendente foi de 0,67 L/s e para o filtro descendente 0,34 L/s (Quadro 13). Segundo a NBR 12216/1992 a velocidade de lavagem para filtros ascendente deve ser superior a 80 cm/min e para filtros descendentes superior a 60 cm/min. A partir das vazões de lavagem e da área dos filtros, foi possível determinar a velocidade para lavagem da unidade ascendente de (82 cm/min) e para a unidade descendente (65,8 cm/min), portanto estando de acordo com os valores recomendado pela NBR 12.216/1992.

Quadro 13- Valores de turbidez e volume de água de lavagem dos filtros do sistema de dupla filtração convencional, durante o período de uma carreira de filtração.

Tempo (s)	Dupla filtração Convencional	
	Turbidez de Lavagem (uT)	
	Ascendente	Descendente
30	0,61	0,8
60	0,65	18,1
90	56,6	18,5
120	881	13,6
150	632	8,31
180	561	3,79
210	435	2,54
240	445	2,21
270	413	2,11
300	192	1,95
330	54,5	1,80
360	24,5	1,72
390	3,76	1,56
420	1,08	1,44
450	1,05	1,32
Volume de água filtrada (L)	3420	
Vazão de água de lavagem (L/s)	0,67	0,34
Velocidade de água de lavagem (cm/min)	82,0	65,8

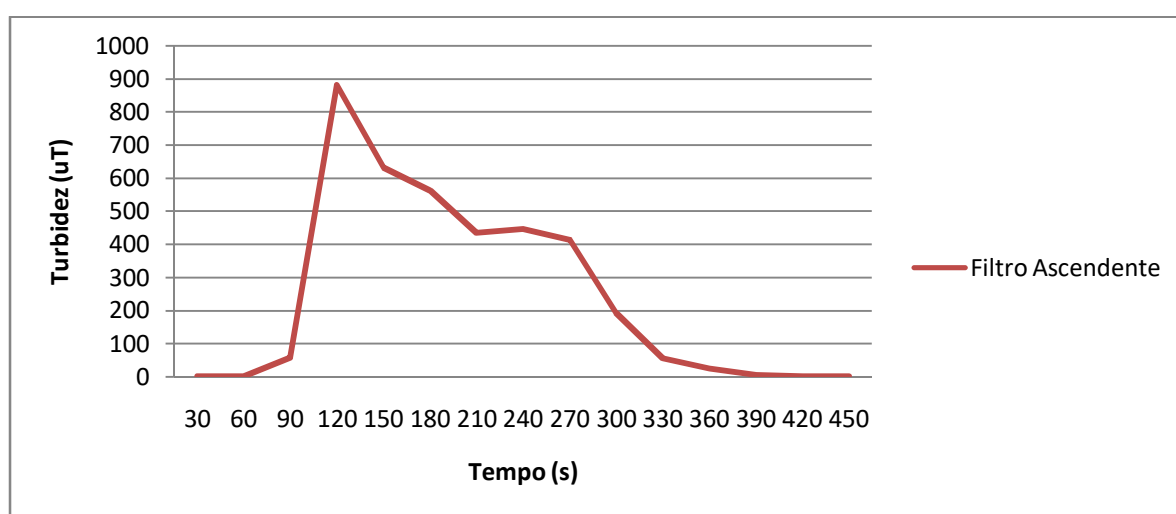
Fonte: Autor (2017).

No processo de lavagem do filtro ascendente foi observado que o ponto máximo de saída do lodo foi em 120 segundos, após o momento inicial da lavagem (Figura 24), com

valor de turbidez de 881 uT. Após 390 segundos do processo de lavagem não foi identificado redução significativa da turbidez, tornando-se mais vantajoso a interrupção do processo de lavagem, que determinava de acordo com o projeto 450 segundos, a continuação do processo tende a produzir um gasto excessivo de água, de dinheiro e de tempo.

Assim, considerando-se o tempo de lavagem de 390 segundos o volume de água consumido no processo foi de 261,3 L. Promovendo a interrupção em 390 segundos foi possível economizar um volume de água de 40,20 L em 60 segundos.

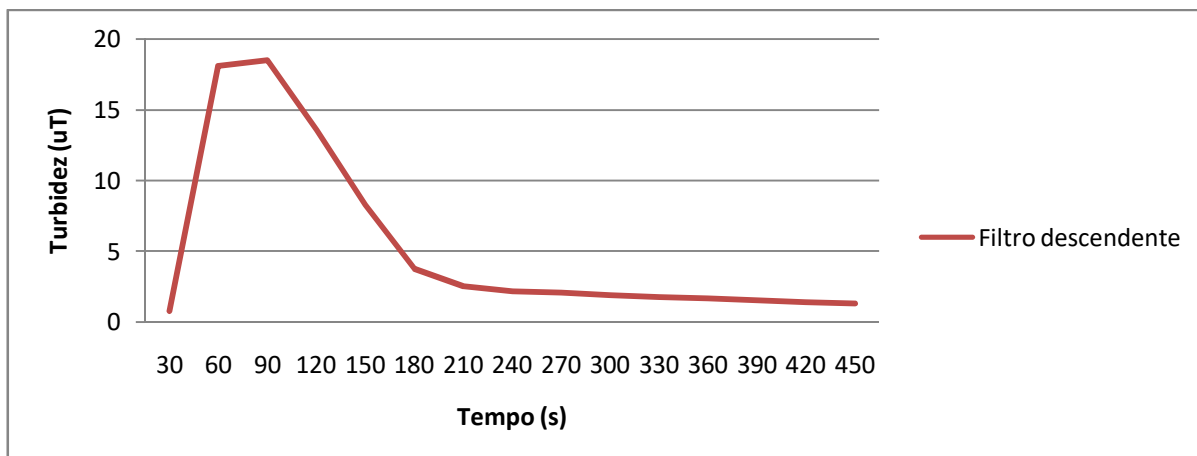
Figura 24- Gráfico de turbidez da água de lavagem do filtro ascendente.



Fonte: Autor (2017).

No processo de lavagem do filtro descendente foi observado que o ponto máximo de saída do lodo ocorreu entre 60 a 90 segundos após o momento inicial da lavagem (Figura 25), com turbidez de 18,5 uT. Após 180 segundo de lavagem não foi identificado redução significativa da turbidez, tornando-se mais vantajoso a interrupção do processo de lavagem nessa faixa de tempo. Assim, considerando-se o tempo de lavagem de 180 segundos o volume de água consumido no processo foi de 61,2 L. Interrompendo a lavagem em 180 segundos foi possível economizar 91,8 L, se comparado ao tempo de lavagem previsto em projeto 450 segundos, reduzindo um volume superior ao utilizado no processo de lavagem.

Figura 25- Turbidez da água de lavagem do filtro descendente



Fonte: Autor (2017).

Desse modo, verificou-se que para o sistema de dupla filtração convencional o volume útil de água produzido foi de 3.382,5 L, e o volume total gasto com água de lavagem foi de 322,5 L.

5.7 Produção de água e curva de saída do lodo no sistema de dupla filtração modificada

No sistema de dupla filtração modificada a carreira de filtração teve duração de 4h. O volume total de água produzido no sistema foi de 1560 litros. A vazão da água de lavagem para os filtros pressurizados (FP1) e (FP2) foi de 0,56 L/s e velocidade de 108,38 cm/min (Quadro 14). Segundo a NBR 12216/1992, a velocidade de lavagem para filtros descendentes deve ser superior a 60 cm/min. Para Deus, Testezlaf e Mesquita (2014), uma forma de se obter uma retrolavagem eficiente em filtros pressurizados é promover a expansão do leito filtrante em 25% de sua altura, mediante o ajuste da velocidade da água de lavagem.

Nos filtros do sistema de dupla filtração modificada a velocidade da água de lavagem foi ajustada para o valor de 108,38 cm/min para evitar carreamento do leito filtrante e promover a expansão adequada durante a lavagem. Em outras pesquisas utilizando filtro pressurizado com granulometria variando entre 0,55 e 1,04 mm as velocidades impostas variaram de 132,9 cm/min a 158,16 cm/min (DEUS, TESTEZLAF e MESQUITA, 2017).

Quadro 14- Valores de turbidez e volume de água de lavagem dos filtros do sistema de dupla filtração modificada, durante o período de duas carreira de filtração.

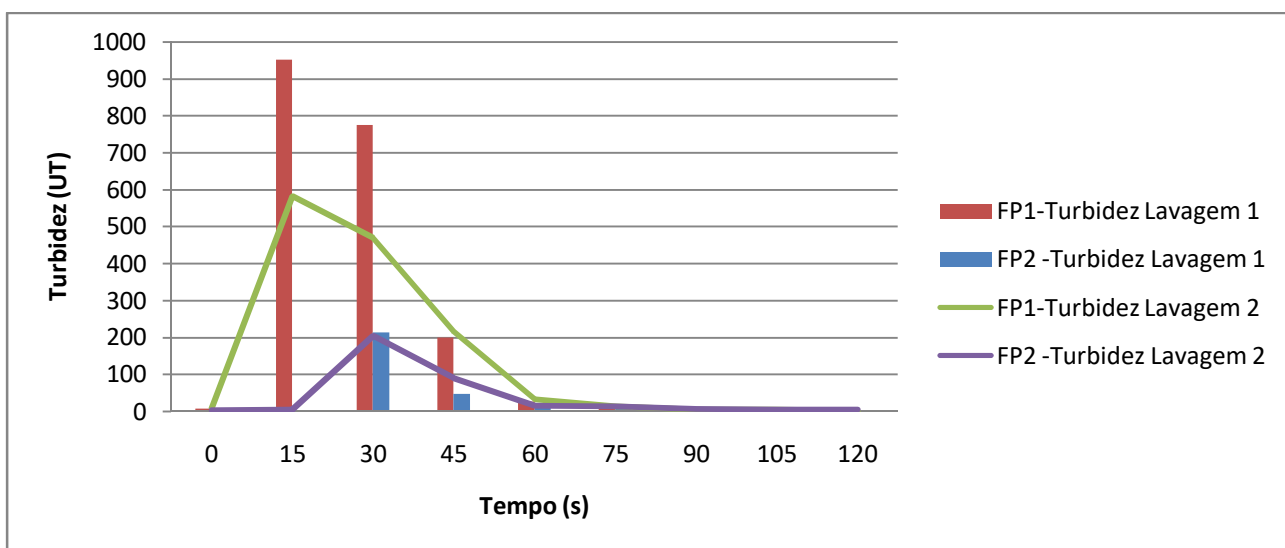
Tempo (s)	Dupla filtração Modificada			
	Turbidez Lavagem 1 (uT)		Turbidez Lavagem 2 (uT)	
	Descendente - 1	Descendente - 2	Descendente - 1	Descendente - 2
Inicial	7,75	2,93	7,94	2,5
15	951	3,59	582	3,8
30	774	214	469	204
45	199	48	217	89,5
60	26,8	16,4	32,4	15,2
75	8,63	7,7	14,1	12,3
90	4,58	3,76	5,49	6,61
105	2,08	1,18	4,14	4,42
120	1,80	1,08	1,49	3,71
Volume de água filtrada (L)	1560		1560	
Vazão de água de lavagem (L/s)	0,56	0,56	0,56	0,56
Velocidade de água de lavagem (cm/min)	108,38	108,38	108,38	108,38

Fonte: Autor (2017).

No processo de lavagem do filtro pressurizado (FP1) foi observado que o ponto máximo de saída do lodo ocorreu em 15 segundos após o momento inicial da lavagem (Figura 26), com turbidez máxima de 951 uT. Para o filtro pressurizado (FP2) foi observado que o ponto máximo de saída do lodo ocorreu em 30 segundos após o momento inicial da lavagem com turbidez máxima de 214 uT. Após 90 segundo de lavagem não foi identificado redução significativa da turbidez, tornando-se assim improdutivo a continuidade do processo de lavagem.

Desse modo, considerando-se o tempo de lavagem ótimo como 90 segundos, o volume de água consumido na retrolavagem foi de 50,4 L para o filtro pressurizado (FP1) e 50,4 L para o filtro pressurizado (FP2). No entanto, o volume útil de água produzido foi de 1459,2 L e o volume total gasto com água de lavagem foi de 100,8L. Interrompendo a lavagem a 90 segundos é possível economizar 33,6 L de água na lavagem do sistema.

Figura 26- Turbidez da água de lavagem dos filtros pressurizados



Fonte: Autor (2017).

O volume útil de água produzido em uma carreira de filtração no sistema de dupla filtração convencional foi superior ao sistema modificado em 1.860 L. Quando se compara a produção de água por hora de funcionamento, a produção do sistema de dupla filtração modificado, foi superior em 120 L, esse fato se deve a possibilidade de aplicação de uma maior taxa de filtração imposta as unidades pressurizadas. Ademais, ressalta-se que mesmo que a produtividade de água por hora de funcionamento seja superior no sistema modificado a qualidade da água produzida é inferior ao sistema convencional, apresentando valor para o parâmetro turbidez igual ou acima do valor máximo permitido pela Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S.

6 CONCLUSÕES

- A carreira de filtração do sistema de dupla filtração convencional apresentou tempo de funcionamento superior à dupla filtração modificada em mais de 5 horas de funcionamento possivelmente devido ao maior leito filtrante presente na unidade que permite retenção de flocos durante um maior tempo de operação.
- O valor de turbidez da água filtrada pelo sistema de dupla filtração convencional sempre se manteve inferior à turbidez do sistema de dupla filtração modificada, bem como de acordo com o valor máximo permitido pela Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S.
- O sistema de dupla filtração modificada apresentou dificuldade em atender os valores de turbidez exigidos pela Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S, mesmo nas horas iniciais de funcionamento.
- O sistema de dupla filtração modificada demonstrou-se ineficiente para remoção de turbidez nas concentrações exigidas na Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S, a uma taxa de filtração de $300\text{m}^3/\text{m}^2$ dia. Ademais, o mesmo sistema também demandou uma maior quantidade de produto químico para coagulação das águas filtradas quando comparado ao sistema de dupla filtração convencional.
- A perda de carga inicial para o sistema de dupla filtração modificada foi inferior à perda de carga do sistema convencional, mas o acréscimo de perda de carga a cada hora de funcionamento do sistema de dupla filtração modificado foi superior ao sistema convencional, pelo fato de seu leito filtrante colmatar em menor tempo de funcionamento.
- A água bruta apresentou elevada concentração de Clorofila “a”, indicando a presença excessiva de algas que tendem a favorecer a colmatação das unidades de filtração.
- Os resultados das análises químicas de qualidade da água filtrada, em ambos os sistemas de filtração, estão em conformidade com os valores de referencia estabelecidos na Portaria de Consolidação nº 5/2017 - anexo XX/ M.S.
- Em relação à produção de água filtrada por carreira de filtração o sistema de dupla filtração convencional apresentou maior volume de água filtrada. Entretanto, em relação ao volume de água filtrada por hora de funcionamento o sistema de dupla filtração modificada apresentou melhor resultado.

- Em relação ao tempo de retrolavagem e volume de água gasto no processo, o sistema de dupla filtração modificada apresentou melhor desempenho.
- O sistema de dupla filtração convencional foi mais eficiente no tratamento de água, tendo em vista a qualidade para o parâmetro de turbidez, o menor consumo de químicos, a melhor adaptação a picos de variação de qualidade da água bruta e a redução de custos por não necessitar de pressurização do sistema por bombas.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

- Avaliar o sistema de dupla filtração modificada alterando a granulometria do leito filtrante presente nas unidades;
- Variar as taxas de filtração impostas às unidades de dupla filtração modificadas;
- Modificar a altura do leito filtrante utilizado nos sistemas de dupla filtração modificada;
- Avaliar as características da água de lavagem produzidas no sistema de dupla filtração modificada;
- Avaliar o sistema de dupla filtração modificado para águas com elevados valores de turbidez.
- Avaliar independentemente a carreira de filtração dos filtros 1 e 2 de cada sistema.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. NBR-12216. Rio de Janeiro, RJ 2016.

ALCANTARA, F. J. V. de. **Estudo comparativo de dois leitos filtrantes com porosidades distintas em sistemas de dupla filtração para tratamento de água**. 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

ALEGRE, H. et al. **Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água**. Londres: International Water Association, 2004. 276 p.

ALTMANN, J. et al. Combination of granular activated carbon adsorption and deep-bed filtration as a single advanced wastewater treatment step for organic micropollutant and phosphorus removal. **WaterResearch**, Berlin, n. 92, p.131-139, 2016.

ALVES, D. V; NUNES, J. S; FARIA, L. P. P. Aplicabilidade do aproveitamento de águas pluviais em grandes centros urbanos: estudo de caso aplicado a uma residência de Belo Horizonte (MG). **Petra**, Belo Horizonte, v. 2, p.174-189, 2016.

ALVES, W. S. et al. Avaliação da qualidade da água do abastecimento público do município de Juazeiro do Norte, CE. **Desafios - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, [s.l.], v. 4, n. 2, p.112-119, 2017. Universidade Federal do Tocantins. <http://dx.doi.org/10.20873/uft.2359-3652.2017v4n2p112>.

ALVITO, D. L. **Sistema de potabilização da água**. 2010. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, 2010.

AMORIM, D. L. **Análise das perdas físicas de águas em um sistema de abastecimento de água: Estudo de caso no Município de Araruama- PB**. 2016. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual da Paraíba, Araruama, 2016.

ANDRADE NETO, C. O. de. **Segurança sanitária das águas de cisternas rurais**. Disponível

em:<http://www.abcmac.org.br/files/simposio/4simp_cicero_segurancasanitariasdaaguadeciserna.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2016.

ANDRADE, M. R. de. **Balanço hidroenergético de sistema de distribuição de água aplicado a um setor do Município de Cambuí - MG**. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

ARAKAWA, F.S. Modificação e caracterização de carvão ativado impregnado com Ag e Cu para utilização no tratamento de água. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 20., 2014, [s.i]. **Anais...** . Florianópolis: Cobeq, 2014. p. 1 - 8.

ARAUJO, A. D; FREITAS, M. O; BAGGIO FILHO, H. Qualidade ambiental da água superficial do córrego quatro vinténs no município de Diamantina-MG. **Revista Cerrados**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.77-96, 19 out. 2016. Revista Cerrados. <http://dx.doi.org/10.22238/rc24482692v14n12016p77a95>.

ARAÚJO, S. C de et al. Distribuição espacial de indicadores operacionais de serviço de abastecimento de água no Nordeste Brasileiro. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 11, p.20-28, 2016.

BOITRAGO, S. A. et al. Captação de água por sistema fotovoltaico para consumo humano na localidade rural Ilha Caiapós, São Romão, Minas Gerais. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Minas Gerais, v. 12, p.43-52, 2016.

BOTARI, A; DI BERNARDO, L. Modelação da perda de carga na filtração direta ascendente em meio granular de areia grossa e pedregulho. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.i], v. 14, p.245-256, 2009.

BOTARI, A; DI BERNARDO, L. Modelação matemática macroscópica da perda de carga e da remoção de sólidos suspensos totais na filtração direta ascendente. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.i], v. 12, p.149-159, 2007.

BOVÉ, J. et al. Development of a new underdrain for improving the efficiency of microirrigation sand media filters. **Agricultural Water Management**, Girona, n. 179, p.296-305, 2017.

BOVÉ, J. et al. Pressure drop across sand and recycled glass media used in micro irrigation filters. **Biosystems Engineering**, Catalonia, v. 127, p.55-63, 2015.

BOVÉ, J. et al. Reducing energy requirements for sand filtration in microirrigation: Improving the under drain and packing. **Biosystems Engineering**, Catalonia, n. 140, p.67-78, 2015.

BRAGA, F. M. G. **Dupla filtração em filtros ascendentes de pedregulho e filtros descendentes de areia aplicada à remoção de algas: influência da taxa de filtração e granulometria do filtro de areia**. 2005. 203 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

BRAGA, F. P. **Avaliação de desempenho de uma estação de tratamento de água do município de Juiz de Fora–MG**. 2014, 70f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.

BRASIL. Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde, de 28 de setembro de 2017. **Dispõe sobre condições das normas sobre ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde**. Brasília.

BRASIL. Resolução nº 357, de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Brasília.

BRINCK, N. C. P. **Avaliação do tipo de material filtrante no comportamento hidráulico de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento**. 2013. 393 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BRITO, L. L. A. de et al. Amadurecimento de filtros lentos de areia e remoção de microrganismos indicadores de qualidade da água ao longo da profundidade do leito: uma

avaliação em instalação piloto. **Artigo Técnico**, [s.i], v. 10, p.307-317, 2005.

BURGARDT, T. **Técnicas de filtração de água destinadas ao abastecimento público – Estudo de Caso Lagoa do Peri**. 2015. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2015.

BUSQUETS, R. et al. Carbon-cryogel hierarchical composites as effective and scalable filters for removal of trace organic pollutants from water. **Journal of Environmental Management**, [s.i], n. 182, p.141-148, 2016.

CAETANO, G. M; FRANCISCO, R. R. S. **Projeto de tratamento de água de abastecimento para uma cidade de 50.000 habitantes**. 2016. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

CAMPLESI, D. C. F; PEREZ, W. E; SIQUEIRA, E. Q. Remoção de coliformes totais e *Escherichia coli* utilizando a filtração em múltiplas etapas (FIME) em períodos de alta turbidez da água bruta. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.i], n. 1, p14-18, 2010.

CASTRO, I. L. R. de. **Elaboração de ferramentas para avaliar a eficiência de tratamento de uma ETA – ETA de São Jorge**. 2015. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de Trás os montes e Alto Douro, Vila Real, 2015.

CASTRO, L. M. de. Avaliação da influência da sazonalidade na qualidade das águas de poços de abastecimento da comunidade fê em deus situada no Município de Presidente Figueiredo – AM. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 18., 2014, Manaus. **Anais...** [s.i]: ABAS, 2014. p. 1 - 13.

CERQUEIRA, D. A. **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**. 2008. 214 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CHEW, C. M. et al. A practical hybrid modelling approach for the prediction of potential fouling parameters in ultrafiltration membrane water treatment plant. **Journal Of Industrial And Engineering Chemistry**, Kuala Lumpur, v. 45, p.145-155, 2017.

CIRNE, J. R. R. **Influência da granulometria e taxas de filtração no tratamento de água utilizando dupla filtração**. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

Companhia de Água e Esgoto do Ceará. **Qualidade da água**. 2018. Disponível em: <<https://www.cagece.com.br/abastecimento-de-agua/qualidade>>. Acesso em: 05 mar. 2018.

Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos Ceará. **Qualidade das Águas dos Açudes Monitorados pela Cogerh – Campanha de Novembro/2015**. Fortaleza: Cogerh, 2016. 15 p.

CONCEIÇÃO, E. T. da. **Avaliação da contaminação das águas superficiais e subterrâneas por necrochorume na Fazenda Vale Verde em Silva Jardim/RJ**. 2015. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal do Fluminense, Niterói, 2015.

CORRÊA, N. F. Contribuição do comitê de bacias hidrográficas PCJ para a gestão das águas subterrâneas: 1996 a 2013. In: RESAG, 2., 2015, São Paulo. **Anais...** . Aracaju: RESAG, 2015. p. 1 - 7.

CORREIO, L. N. C. et al. Análise temporal da qualidade da água de um arroio no sul do Rio Grande do Sul. **Revista Thema**, Pelotas, v. 14, p.109-119, 2016.

COSTA, M. C. et al. Potabilidade da água em poço artesiano na comunidade campanha na Cidade de Campo Grande – RN. **Global Science And Technology**, Rio Verde, v. 8, p.95-100, 2015.

COSTA, P. S. F. et al. Avaliação da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do rio Capivari no município de Chapada do Norte – MG. **Caderno de Geografia**, [s.i], v. 26, p.197-213, 2016.

COX, M. R; BUDHU, M. A practical approach to grain shape quantification. **Engineering Geology**, Tucson, n. 96, p. 1-16, 2008.

DALSASSO, R. L. **Estudo de diferentes materiais para floculação em meio granular precedendo a filtração rápida descendente no tratamento de água para abastecimento**. 2005. 272 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2005.

DEUS, F. P. de; TESTEZLAF, R; MESQUITA, M. Eficiência de filtros de areia pressurizados na remoção de diferentes tamanhos de partículas da água de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, p. 940-950, 2015.

DEUS, F. P. de; TESTEZLAF, R; MESQUITA, M. Assessment methodology of backwash in pressurized sand filters. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. p. 600-605, 2017.

DI BERNARDO, L.; KURODA, E. K; PAULA, D. de. Tratamento de águas com picos de turbidez utilizando a filtração direta ascendente em pedregulho e em areia grossa como pré-tratamento em sistemas de dupla filtração. In: congresso iberoamericano de ingeniería sanitaria y ambiental, 28., 2002, Cancún. **Anais...** . Cancún: Aidis, 2002. p. 1 - 9.

DI BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2010. p. 868.

DINIZ, M. O. B. **Avaliação da eficácia de medidores proporcionais de vazão para controle do volume distribuído no sistema de abastecimento de água da Cidade de Araguaína – TO**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

DURIS, M. et al. Prediction of bed expansion of polydisperse quartz sand mixtures fluidized with water. **Powder Technology**, Belgrade, n. 289, p. 95-103, 2016.

DURIS, M. et al. Segregation in water fluidized beds of sand particles. **Powder Technology**, Belgrade, n. 235, p. 173-179, 2013.

ELBANA, M; CARTAGENA, F. R de; BARGUÉS, J. P. Effectiveness of sand media filters for removing turbidity and recovering dissolved oxygen from a reclaimed effluent used for micro-irrigation. **Agricultural Water Management**, Girona, n. 111, p. 27-33, 2012.

FARIA, D. F. G. de M. **Estudo da relação entre o consumo de água e energia ao nível do utilizador final**. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Trás-os-montes e Alto Douro, Vila Real, 2016.

FIRMINO, M. B. M. et al. Método de eficiência energética no bombeamento de água, via programação linear e inteira. In: Seminário Iberoamericano Sobre Sistemas de Abastecimento Urbano, 6, 2006, Campina Grande. **Anais...** . João Pessoa: Serea, 2006. p. 1 - 11.

FLORESCU, C; PODOLEANU, C. E. Studies Regarding Water Clarification by Fast Ascending and Descending Filter in Multiple Homogeneous Layers. **Series of Chemistry And Environmental Engineering**, Timisoara, n. 55, p. 201-204, 2010.

FRANCO, C. S. **Sistema alternativo de tratamento de água em escala descentralizada**. 2015. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

FREITAS, D. de B. **Estudo de melhorias dos sistemas de cloração de água de abastecimento na CORSAN pela instalação de evaporadores de cloro e lavadores de gases**. 2011. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAs**. Brasília: FUNASA, 2014. 112 p.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. Brasília: FUNASA, 2006. 404 p.

FUNCEME - Fundação cearense de meteorologia e recursos hídricos. **Projeto estudo da qualidade das águas em reservatórios superficiais da bacia metropolitana**. Fortaleza: Srh/funceme/prourb-rh, 2002. 580 p.

GARDIMAN JUNIOR, B. S.; SIMOURA, L. T. Cobertura florestal e qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Jucu, Estado do Espírito Santo, Brasil. **Scientia Plena**, [s.i], v. 12, p. 1-15, 2015.

GHISI, D. B. **Proposta de um modelo de projeto de filtro rápido bifluxo para tratamento de água de abastecimento**. 2016. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

GIATTI, L. L. Reflexões sobre Água de Abastecimento e Saúde Pública: um estudo de caso na Amazônia Brasileira. **Saúde e Sociedade**, [s.i], v. 16, p.134-144, 2007.

GUSMÃO, P. T. R. de. **Utilização de filtração direta ascendente como pré tratamento à filtração rápida descendente para tratamento de água para abastecimento**. 2001. 370 f. Tese (Doutorado) - Curso de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

HUISMAN, L. Slow sand filtration: Research and Demonstration. Project on Slow Sand Filtration. AIDIS Congres Held in Panamá. **Anais...** AIDIS 1982, p. 99.

JACOBSEN, N. G; VAN GENTA, M. R. A; FREDSOE, J. Numerical modelling of the erosion and deposition of sand inside a filter layer. **Coastal Engineering**, Deltare, n. 120, p.47-63, 2017.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodos de estação de tratamento de ciclo completo: uma análise crítica.** 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

KAWAMURA, S. **Preliminary studies In: integrated desing and operation of water treat facilities.**2.ed.USA: John Wiley and Sons, 2000b.

KELLNER, E; AKUTSU, J; REIS, L. F. R. Avaliação da rugosidade relativa dos tubos de PVC com vistas ao dimensionamento das redes de distribuição de água. **Artigo Técnico**, [s.i], v. 21, p.347-355, 2016.

KERAMARIS, E; PECHLIVANIDIS, G. Effects of different porous beds on turbulent characteristics in an open channel above the porous bed. **Flow Measurement And Instrumentation**, Volos, n. 54, p.20-26, 2017.

KLINDEIN, Camila Ports Mann. **Determinação do teor de nitratos e nitritos na agua de abastecimento no município de nova santa rita.** 2010. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Química, Centro Universitario La Salle, Canoas, 2010.

KURODA, E. K. **Avaliação da filtração direta ascendente em pedregulho como pré tratamento em sistema de dupla filtração.** 2002. 242 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

LEIRA, M. H. et al. Qualidade da água e seu uso em pisciculturas. **Pubvet**, [s.i], v. 11, p.11-17, 2017.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos da qualidade e tratamento da água.** 2. ed. Campinas: Átomo, 2008. 444 p.

LIMA, J. A. P; CAPELO NETO, J. Dupla filtração modificada utilizando filtro de pressão a montante de filtro ascendente no tratamento de águas eutrofizadas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Fortaleza, v. 20, p.89-102, 2015.

LIMA, R. F. de. **Influencia do leito de contato na eficiência de remoção de ferro de águas subterrâneas.** 2006. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Para, Belém, 2006.

LINHARES, H. P. et al. Remoção de cianobactérias em eta piloto de dupla filtração modificada CP.2016.PJ.0221. In: encontro de extensão, 25., 2016, Fortaleza. **Anais...** . Fortaleza: Ufc, 2016. p. 4102 - 4102.

LOPES, G. J. R. **Avaliação da turbidez e do tamanha de partículas como parâmetro indicador da remoção de oocistos de cryptosporidium spp. nas etapas de clarificação no**

tratamento de água em ciclo completo. 2008. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

LU, Y; WEI, L; WEI, J. A numerical study of bed expansion in supercritical water fluidized bed with a non-spherical particle drag model. **Chemical Engineering Research And Design**, Shaanxi, n. 104, p.164-173, 2015.

MACHADO, B. C; SENS, Mo L. Remoção de cianobactérias utilizando dupla filtração ascendente. **Revista Dae**, [s.i], n. 190, p.21-26, 2012.

MELO FILHO, L. C. de. **Avaliação da ozonização como pré ou póstratamento à filtração direta descendente na remoção de cianobactérias e saxitoxinas.** 2006. 283 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2006.

MENDEZ, I. M. R. et al. Removal of Cryptosporidium oocyst-like particles by direct upward filtration using a natural coagulant: pilot scale study. **Revista de Investigacion Agraria y Ambiental**, Brasília, v. 7, p.1-16, 2016.

MENDEZ, I. M. R. **Remoção de microesferas de poliestireno, em substituição a oocistos de cryptosporidium, por filtração direta ascendente no tratamento de água usando o coagulante quitosana.** 2014. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

MESQUITA, M; TESTEZLAF, R; RAMIREZ, J. C. S. The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss. **Agricultural Water Management**, Campinas, n. 115, p.178-185, 2012.

MOREIRA, F. M. **Avaliação da Capacidade Adsorptiva de Materiais Filtrantes Através da Adsorção do Corante Azul de Metileno.** 2015. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

MULLER, L. C. **Tratamento de água para abastecimento utilizando elementos filtrantes de madeira.** 2016. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina,, Florianópolis, 2016.

MURTHA, N. A. **Avaliação da influência de variáveis hidráulicas, parâmetros de projeto e das características da água bruta na eficiência de filtros lentos de areia.** 1998. 227 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.

MURTHA, N.A., HELLER, L. Avaliação da influência de parâmetros de projeto e das características da água bruta no comportamento de filtros lentos de areia. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.8, n.4, p.267-277, 2003.

NCUBE, P. et al. The effect of high hydraulic loading rate on the removal efficiency of a quadruple media filter for tertiary wastewater treatment. **Water Research**, Bedfordshire, v. 107, p.102-112, 2016.

NIETO, P. J. G. et al. A new predictive model for the filtered volume and outlet parameters in micro-irrigation sand filters fed with effluents using the hybrid PSO–SVM-based approach. **Computers And Electronics In Agriculture**, Oviedo, v. 125, p.74-80, 2017.

NUNEZ-GÓMEZ, D. et al. Potencial dos resíduos do processamento de camarão para remediação de águas contaminadas com drenagem ácida mineral. **Polímeros**, [s.i], n. 26, p.1-7, 2016.

OLIVEIRA, M. L. de. **Desenvolvimento de método para avaliação de desempenho de sistemas de abastecimento de água: aplicação ao caso da ride df e entorno**. 2016. 255 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

PAIXÃO, R. M; SILVA, L. H. B. R. da; ANDREOLA, R. Avaliação da presença de trialometanos na água destinada ao abastecimento público na Cidade de Maringá-Paraná. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, [s.i], v. 7, p.235-242, 2015.

PINHO, E. M. de; OLIVEIRA, C. F. de. Filtros utilizados para melhorias da qualidade da água na irrigação localizada. **Jornada Acadêmica UEG**, Santa Helena, v. 5, p.3968-3973, 2016.

PINTO, P. E. F. **Condutância longitudinal aplicada à análise da vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos confinados**. 2016. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenheiro Ambiental, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2016.

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

Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Filtração direta aplicada a pequenas comunidades**. São Carlos: PROSAB, 2003. 491 p.

QIN, Z; PLETCHER, R. H. A statistical model of pressure drop increase with deposition in granular filters. **Advanced Powder Technology**, Cedarville,, n. 26, p.49-55, 2015.

QUARESMA, J. L. P. L. **Estudo experimental do desempenho de um sistema coagulação / filtração de água**. 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho Escola de Engenharia, Braga, 2013.

RADOICIC, T. K. et al. Particle characterization of polydisperse quartz filtration sand. **Power Technology**, Belgrade, n. 254, p.63-71, 2014.

RAMOS, A. M. **Determinação de metais em águas de abastecimento público: um estudo de caso, município de Ouro Preto**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

REIS, C. G. **Análise dos processos de clarificação e filtração da água para consumo**

humano estações de tratamento de água do Rio Grande do Sul. 2016. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ROCHA, S. M; NISHIO, F. Y. Contaminação por Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) em Mananciais: evidências de risco à saúde no Município de São Paulo. **Interfacehs**, São Paulo:, v. 11, p.74-92, 2016.

ROLLAND, L. et al. Influence of the physical and mechanical characteristics of sands on the hydraulic and biological behaviors of sand filters. **Desalination**, France, n. 248, p.998-1007, 2009.

SÁ, M. A. de. **Avaliação do desempenho de uma estação de tratamento de água com sistema de filtração direta ascendente em escala real.** 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

SALATI, D. S. **Desempenho da filtração lenta com diferentes períodos de amadurecimento no tratamento de água contendo elevadas densidades de células tóxicas de microcystis aeruginosa.** 2010. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

SALCEDO, J. C; TESTEZLAF, R; MESQUITA, M. Processo da retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v.31, p.1226-1237, 2011.

SANTOS, A. L. V; CALDEIRA, A. B. Análise coleta de esgoto de Contagem/MG: Uma realidade da situação sanitária do município entre os anos de 2010-14. **Caderno de Geografia**, [s.i], v. 26, p.50-60, 2016.

SANTOS, Gemmelle Oliveira; SAMPAIO, Glória Maria Marinho Silva. Interrelações entre as chuvas, a qualidade da água bruta e o tratamento da água: estudo de caso. **Revista Tecnológica**, Fortaleza, v. 30, p.163-174, 2009.

SCHÖNTAG, J. M. et al. Water quality produced by polystyrene granules as a media filter on rapid filters. **Journal of Water Process Engineering**, Florianópolis, n. 5, p.118-126, 2015.

SENS, M. L. et al., **Influência de algas na filtração direta ascendente e descendente – estudo de caso.** XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - AIDIS. **Anais...** .Cancún, México (2002).

SHEN, H. et al. Generation of soluble microbial products by bio-activated carbon filter during drinking water advanced treatment and its influence on spectral characteristics. **Science of The Total Environment**, [s.i], n. 569, p.1289-1298, 2016.

SILVA, F. A. **Alternativa para redução do consumo de combustível fóssil em uma fabrica de celulose kraft de eucalipto.** 2010. 38 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Celulose e Papel, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SILVA, J. R. L.da et al. Remoção de cianobactérias e outros compostos por meio de uma instalação piloto de dupla filtração. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 21., 2015, Brasília. **Anais...** . Brasília: ABRH, 2015. p. 1 - 8.

SILVA, J. R; SÁ, O. R. de; FRANÇA, N. Avaliação do tratamento simplificado de água para abastecimento em três comunidades de um Município do Sudoeste Mineiro. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [s.i], v. 10, p.134-144, 2014.

SILVA, L. D; TOZI, S. C. Gestão dos recursos hídricos na zona urbana do Município de Santa Helena-MA. **Boletim Amazônico de Geografia**, Belém, v. 2, p.110-120, 2016.

SILVA, S. R. da; MONTEIRO, A. B; FRANÇA, A. E. O gerenciamento das águas subterrâneas no Estado de Pernambuco. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13., 1999, Recife. **Anais...** . Belo Horizonte: ABRH, 1999. p. 1 - 15.

SILVA, V. A. da. **Avaliação de sustentabilidade ambiental dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário de Uberaba - MG**. 2016. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

SILVA, W. T. P. et al. Otimização multiobjetivo de sistema de abastecimento de água rural. **Ingeniería del Agua**, Brasília, n. 20, p.217-232, 2016.

SILVA, W. T. P; CAMPOS, M. M; SANTOS, A. Previsão de consumo diário de água: estudo de caso de Nobres (Brasil). **Ingeniería del Agua**, Cuiabá, v. 20, p.73-85, 2016.

SILVEIRA, A. A. **Remoção de algas da água da Lagoa do Peri através de filtração direta descendente com pré - filtração mecânica em micropeneiras**. 2003. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SILVEIRA, A. C. H. **Caracterização dos resíduos gerados em estação de tratamento de água de dupla filtração com o uso de polímeros**. 2014. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2014.

SILVEIRA, L. R. da; COUTINHO, M. M. Utilização de Filtro de Múltiplas Camadas para remoção de Turbidez. **Revista Tecnica**, [s.i], v. 1, p. 65-79, 2016.

SLAVIK, I; JEHLICH, A; WOLFGANG U. H. L. Impact of backwashing procedures on deep bed filtration productivity in drinking water treatment. **Water Research**, Dresden, n. 47, p. 6348-6357, 2013.

SOARES, I. M. N; BRARYMI, T. O. de L; PALHARES, J. M. A distribuição de água no município de Oiapoque-AP, BRASIL. **Boletim Amazônico de Geografia**, Belém, v. 2, p.34-44, 2015.

SOARES, S. S. et al. Avaliação de métodos para determinação de cloro residual livre em águas de abastecimento público. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, [s.l.], v. 37, n. 1, p.119-12, 16 mar. 2016. Universidade Estadual de Londrina. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0375.2016v37n1p119>.

SORIANO, A. A. **Qualidade da água de abastecimento distribuída por rede confinada: estudo de caso**. 2016. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2016.

SOUSA, G. B. **Sistema computacional de pré dimensionamento das unidades de tratamento de água: floculadores, decantadores e filtro.** 2011. 103 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SOUSA, L. M. de; SILVA, I. L. de S.; OLIVEIRA, L. L. de. Influência das águas pluviais locais na recarga de água do poço de abastecimento público em Santarém - Pa. In: Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas, 18., 2014, Santarém. **Anais...** [s.i]: ABAS, 2014. p. 1 - 9.

SOUZA, A. C. de. **Influência de manobras de válvulas na identificação de vazamentos em redes de distribuição de água utilizando dados transientes e algoritmo genético.** 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SOUZA, A. L. et al. Software Web para simulação do modelo dinâmico inercial rígido em sistemas hidráulicos. **Revista de Informática Aplicada**, [s.i], v. 11, p.58-71, 2015.

SOUZA, A. S. F. de. **Desenvolvimento de indicador da complexidade operacional da manutenção de redes de distribuição de água aplicado a uma empresa de saneamento.** 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meio Ambiente Urbano e Industrial, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SOUZA, W. A. de. **Tratamento de água.** Rio Grande do Norte: Cefet-Rn, 2007. 151 p.

STEVENSON, D. G. Process conditions for the backwashing of filters with simultaneous air and water. **Pergamo**, London, v. 29, p.2594-2597, 195.

SUNDEFELD JUNIOR, G. C. **Pós tratamento e desinfecção de efluentes de reatores uasb e de lagoas de estabilização visando o uso agrícola.** 2012. 229 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

TANG, T; MCDONOUGH, J. M..A theoretical model for the porosity-permeability relationship. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, Lexington, n. 103, p.984-996, 2016.

TATARI, K ; SMETS, B. F.; ALBRECHTSEN, H. J. Depth investigation of rapid sand filters for drinking water production reveals strong stratification in nitrification biokinetic behavior. **Water Research**, Lyngby, n. 101, p.402-410, 2016.

TAVARES, M. B. **Utilização de colunas verticais de filtração em manta e areia como pré-tratamento de filtro lento.** 2008. 129 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, 2008.

TEXEIRA, A. R. et al. Comparação do tratamento de água com baixa turbidez por filtração direta ascendente e descendente. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23. 2005, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: ABES, 2005. p. 1 – 10.

TEXEIRA, A. R. et al. **Tratabilidade de água com baixa turbidez por filtração direta ascendente e descendente.** Disponível em:
<<http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/libanio.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2017.

THOMAS, V. L. Avaliação da contaminação da água e do solo por coliformes em área adjacente a aplicação de dejetos líquidos de suínos (dls) no Município de Três Passos/Rs. In: Jornada de Pesquisa, 21., 2016, [s.i]. **Anais...** . [s.i]: Unijuí, 2016. p. 1 - 5.

VARGAS, L. C. Filtración lenta - Teoría e Evaluación, 1 ed. Lima: CEPIS/OPAS, 1992. 62p. Manual I.

VIEIRA, C. C. **Aproveitamento de águas pluviais: influência do volume de descarte e da filtração na qualidade da água.** 2013. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

WAJSMAN, E. N. **Concepção de estação piloto de tratamento de água no centro experimental de saneamento ambiental da UFRJ - CESA/UFRJ.** 2014. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

WATER TREATMENT. **Granular filtration.** Disponível em: <<https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Granular-filtration-1.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2017.

WATSON, S. B., RIDAL, J; BOYER. G. L. Taste and odour and cyanobacterial toxins: impairment, prediction, and management in the Great Lakes. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.** n 65. p. 1779-1796. 2008.

WEBER, C. C; CYBIS, L. F; BEAL, L. L. Reúso da água como ferramenta de revitalização de uma estação de tratamento de efluentes. **Engenharia Sanitária Ambiental**, Farropilha, v. 15, p. 119-128, 2010.

WIECHETECK, G. K; BENINI, B. D. da S; DI BERNARDO, L. **Utilização da dupla filtração com filtro ascendente de areia grossa para a remoção de substâncias húmicas.** Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes22/cclxxxvii.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2017.

YOSHIMOTO, M. K. **Diagnóstico e proposição de medidas para o controle das perdas de água no sistema de abastecimento de Guaratinguetá (SP).** 2015. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ZAMANI, A; MAINI, B. Journal of Petroleum Science and Engineering. **Journal of Petroleum Science And Engineering**, Alberta, n. 69, p.71-88, 2009.

ZIPF, M. S. **Caracterização e estudo de reúso da água de lavagem dos filtros de uma estação de tratamento de água (ETA) de uma indústria têxtil de Blumenau-SC.** 2010. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.