



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA**

**GUSTAVO MARQUES CALAZANS DUARTE**

**SIMULAÇÃO EM INSTALAÇÃO PILOTO DA ADEQUAÇÃO DE ETA  
CONVENCIONAL PARA DUPLA FILTRAÇÃO**

**Natal**  
**2018**

GUSTAVO MARQUES CALAZANS DUARTE

**SIMULAÇÃO EM INSTALAÇÃO PILOTO DA ADEQUAÇÃO DE ETA  
CONVENCIONAL PARA DUPLA FILTRAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Profa. Dra. Ada Cristina Scudelari

Co-orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Calazans Duarte

Natal  
2018

Duarte, Gustavo Marques Calazans.

Simulação em instalação piloto da adequação de ETA convencional para dupla filtração / Gustavo Marques Calazans Duarte. - 2018. 65f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Natal, 2018.

Orientador: Ada Cristina Scudelari.

Coorientador: Marco Antonio Calazans Duarte.

1. Dupla filtração - Dissertação. 2. Oxidação - Dissertação. 3. Tecnologia de tratamento de água - Dissertação. 4. Taxa de filtração - Dissertação. 5. Granulometria - Dissertação. I. Scudelari, Ada Cristina. II. Duarte, Marco Antonio Calazans. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628

GUSTAVO MARQUES CALAZANS DUARTE

## **SIMULAÇÃO EM INSTALAÇÃO PILOTO DA ADEQUAÇÃO DE ETA CONVENCIONAL PARA DUPLA FILTRAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Ada Cristina Scudelari (UFRN) – Orientador

---

Prof. Dr. Marco Antonio Calazans Duarte (IFRN) – Co-orientador

---

Prof. Dr. André Luís Calado Araújo (IFRN/UFRN) – Examinador Interno

---

Prof. Dr. Rui de Oliveira (UEPB) – Examinador Externo

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Marco e Conceição, e aos meus irmãos, Mateo e Rafael, pela compreensão, apoio e incentivo durante toda minha vida.

A minha orientadora, Ada Scudelari, por toda paciência, dedicação, ensinamentos e apoio durante toda a realização desse trabalho.

Ao meu coorientador Marco Antonio Calazans Duarte por todas as dicas e ensinamentos passados.

Ao professor André Calado por todo auxílio e opiniões valiosas.

Aos colegas, Thiago, Jodrânia, Bruno, Jullyene, Pryscila, Ana Paula, Raíssa e Fernanda que tanto me ajudaram nos ensaios e análises realizadas.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte e a todos os professores do mestrado em Engenharia Sanitária, pela oportunidade e por todo conhecimento adquirido.

Ao Instituto Federal do Rio Grande do Norte, pelo espaço concedido para realização da minha pesquisa.

À Companhia de Águas e Esgotos do Estado do Rio Grande do Norte, pela disponibilidade e oportunidade de realizar a pesquisa em uma de suas estações de tratamento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior e Conselho e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo suporte financeiro.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Localização da ETA Extremoz em relação à Lagoa de Extremoz	22
Figura 3.2 – Fluxograma das operações de tratamento da ETA Extremoz. ....	23
Figura 3.3 – Croqui da ETA Extremoz.....	24
Figura 3.4 – Posicionamento da ETA Extremoz em relação à área de implantação do segundo módulo de tratamento .....	25
Figura 3.5 – Desenho esquemático dos filtro descendente de areia .....	29
Figura 3.6 – Desenho esquemático dos Filtro ascendente de pedregulho .....	30
Figura 4.1 – Vista geral das unidades de floculação associadas aos decantadores da ETA Extremoz .....	32
Figura 4.2 – Vista dos filtros de areia da ETA Extremoz .....	34
Figura 4.3 – Calha Parshall da ETA Extremoz .....	35
Figura 4.4 – Fluxograma das operações de tratamento da ETA Extremoz após adequação proposta .....	37
Figura 4.5 – Croqui da ETA Extremoz após adequação .....	37
Figura 4.6 – Influência da granulometria do FAP na remoção de turbidez e cor aparente dos FDA .....	42
Figura 4.7 – Influência da taxa de filtração e granulometria na remoção da turbidez, cor aparente, ABS <sub>254</sub> e MON .....	46
Figura 4.8 – Resultados da remoção da turbidez, cor aparente, ABS <sub>254</sub> e MON pelo FAP3 .....	47
Figura 4.9 – Resultados da remoção da turbidez, cor aparente, ABS <sub>254</sub> e MON pelo FDA1 .....	48
Figura 4.10 – Resultados da remoção da turbidez, cor aparente, ABS <sub>254</sub> e MON pelo FDA2. ....	48
Figura 4.11 – Resultados da remoção da turbidez, cor aparente, ABS <sub>254</sub> e MON pelo FDA3 .....	49
Figura 4.12 – Influência da granulometria na remoção da turbidez, cor aparente, ABS <sub>254</sub> e MON pelo FDA3 para taxa de filtração 230/310 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> .....	50

Figura 4.13 – Influência da granulometria na remoção da turbidez, cor aparente, ABS <sub>254</sub> e MON pelo FDA3 para taxa de filtração 255/340 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> .....	50
Figura 4.14 – Turbidez remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de 230/310 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E1) .....	51
Figura 4.15 – Cor aparente remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de 230/310 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E1) .....	51
Figura 4.16 – Turbidez remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de 230/310 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E2) .....	52
Figura 4.17 – Cor aparente remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de 230/310 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E2) .....	52
Figura 4.18 – Turbidez remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de 255/340 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E3) .....	53
Figura 4.19 – Cor aparente remanescente das unidades filtrantes com taxas	53
Figura 4.20 – Turbidez remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de 255/340 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E4) .....	54
Figura 4.21 – Cor aparente remanescentes das unidades filtrantes com taxas de filtração de 255/340 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E4) .....	54
Figura 4.22 – Variação das perdas de carga nas camadas do pré-filtro e filtros descendentes de areia, com taxa de filtração de 230/310 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E1) .....	56
Figura 4.23 – Variação das perdas de carga nas camadas do pré-filtro e filtros descendentes de areia, com taxa de filtração de 230/310 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E2) .....	56
Figura 4.24 – Variação das perdas de carga nas camadas do pré-filtro e filtros descendentes de areia, com taxa de filtração de 255/340 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E3) .....	58
Figura 4.25 – Variação das perdas de carga nas camadas do pré-filtro e filtros descendentes de areia, com taxa de filtração de 255/340 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E4) .....	58
Figura 4.26 – Perda de carga laminar e turbulenta no meio filtrante (camada de areia) dos FDA com taxas de filtração de 230 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E1 e E2) .....	59
Figura 4.27 – Perda de carga laminar e turbulenta no meio filtrante (camada de areia) dos FDA com taxas de filtração de 255 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> (E3 e E4) .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características da água bruta da Lagoa de Extremoz no período de julho a setembro de 2016 (mínimos-máximos).....	22
Tabela 3.2 –Parâmetros de qualidade da água bruta, de projeto e operação recomendados para o emprego da tecnologia de dupla filtração. ....	26
Tabela 3.3 – Características das camadas suporte e filtrantes dos pré-filtros FAP. ....	27
Tabela 3.4 – Características da camada suporte dos FDA1, FDA2 e FDA3 ..	27
Tabela 3.5 – Características das camadas filtrantes dos FDA .....	28
Tabela 3.6 – Metodologias analíticas para medição de variáveis de controle dos processos de tratamento e caracterização de água bruta .....	31
Tabela 4.1 – Características dos ensaios na fase 1 e fase 2 .....	38
Tabela 4.2 – Vazões afluentes na IPDF correspondentes para cada taxa de filtração dos FAP e FDA e tempos de contato na pré-oxidação .....	40
Tabela 4.3 – Características gerais da água bruta dos ensaios da fase 1 com carreira de filtração de 8h (N= 64) .....	40
Tabela 4.4 – Características da água bruta nos ensaios da fase 2 com carreira de filtração de 24h .....	42
Tabela 4.5 – Taxas médias de filtração nos ensaios da fase 2, com carreira de filtração de 24h .....	44
Figura 4.6 – Influência da taxa de filtração e granulometria na remoção da turbidez, cor aparente, $ABS_{254}$ e MON .....	44
Tabela 4.7 - Valores médios remanescentes nos efluentes do pré-filtro (FAP) e filtros descendentes de areia (FDA) para taxas de filtração de $230/310 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (E1 e E2) e $255/340 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (E3 e E4).....	45
Tabela 4.8 – Desempenho do pré-filtro (FAP) e filtros descendentes de areia (FDA) para taxas de filtração de $230/310 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (E1 e E2) e $255/340 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (E3 e E4) .....	45
Tabela 4.9 – Perdas de carga no meio filtrante limpo nos filtros de areia ( $C_e= 0,81$ e $\varepsilon =0,4$ ). .....	55
Tabela 4.10 – Perdas de carga no meio filtrante limpo nos filtros de areia ( $C_e= 0,81$ e $\varepsilon =0,4$ ).....	57

## RESUMO

Existem estações de tratamento de água (ETA) que operam com sobrecarga hidráulica, exemplo disso é a ETA Extremoz, situada no estado Rio Grande do Norte, opera com sobrecarga hidráulica de 30% em relação a vazão de projeto. Apesar do projeto indicar a tecnologia de ciclo completo, a ETA Extremoz opera com a tecnologia de filtração direta e as estruturas dos floculadores e decantadores funcionam como caixas de passagem e nesse cenário, a construção do segundo módulo na tecnologia de ciclo completo não é viável econômica e tecnicamente. A reforma das estruturas atualmente inoperantes para funcionarem como câmaras de pré-oxidação (floculadores) e filtros ascendentes de pedregulho (FAP) (decantadores) ou seja, a adaptando da tecnologia de ciclo completo para dupla filtração (DF) com pré-filtro de pedregulho e filtro rápido de areia (FDA), é alternativa que resulta em significativa economia financeira e espacial para uma possível ampliação da ETA. O objetivo deste trabalho é avaliar em instalação piloto as condições operacionais para adequação da ETA Extremoz para a tecnologia de dupla filtração, mantendo e aproveitando a estrutura existente da ETA e verificar a tecnologia de tratamento para a vazão de água atual e futura. A pesquisa consistiu em duas fases, a primeira avaliou o comportamento do tratamento pela tecnologia de DF nas taxas de filtração de 190, 210, 230 e 255  $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para os FAP e 250, 280, 310 e 340  $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para os filtros de areia em ensaios em instalação piloto com ensaios com oito horas de duração. Os resultados obtidos na primeira fase indicaram o FAP 3 como o de melhor desempenho e que as taxas de filtração estudadas não impactaram significativamente na qualidade do efluente filtrado. A partir daí, procedeu-se investigação mais detalhada no comportamento do FAP 3 e nos filtros rápidos de areia, em ensaios em instalação piloto com taxa de filtração de 230 e 255  $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para o FAP e 310 e 340  $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para os FDA e ensaios com 24h de duração. A partir das análises dos dados obtidos concluiu-se que apesar do desempenho semelhante aos demais FAP, o pré-filtro FAP3 apresentou melhor eficiência e as menores médias de turbidez e cor aparente remanescentes e o FAP1 foi o de pior desempenho. Os desempenhos dos FDA foram estaticamente equivalentes, porém, por ter carreira de filtração superior aos demais, o FDA3 foi o filtro com granulometria mais adequada ao tratamento da água bruta. Foram verificados picos de turbidez na água pré-filtrada após as descargas de fundo intermediária (DFI) e na água filtrada após a lavagem dos filtros de areia. Em todos os ensaios realizados, a perda de carga final do FAP foi inferior a 0,60m (carga máxima disponível de 240 cm), resultado que indica que a carga hidráulica prevista para o pré-filtro poderia ser menor que o indicado na literatura. A elevação da taxa de filtração não influenciou o desempenho dos pré-filtros, entretanto taxas de filtração entre 200 e 300  $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  foi a faixa escolhida. O maior influenciador na perda de carga total do FAP3 é o fundo falso. As camadas mais baixas do FAP3 não contribuíram para a remoção de turbidez e cor. O FAP se mostrou equalizador na qualidade da água afluente dos filtros de areia. Para as taxas de filtração estudadas a granulometria dos FDA não gera efluentes distintos entre si.

**Palavras-chave:** Dupla filtração, oxidação, tecnologia de tratamento de água, taxa de filtração, granulometria.

## ABSTRACT

There are water treatment plants (ETA) that operate with hydraulic overload, for example ETA Extremoz, located in the state of Rio Grande do Norte, operates with hydraulic overload of 30% in relation to the project flow. Although the project indicates full-cycle technology, ETA Extremoz operates with direct filtration technology and the structures of the flocculators and decanters act as junction boxes and in this scenario, the construction of the second module in full cycle technology is not feasible economically and technically. The reform of structures currently inoperative to function as pre-oxidation chambers (flocculators) and upflow gravel filters (FAPs), ie, adapting it from full-cycle to double filtration (DF) technology with gravel pre-filter and rapid sand filter (FDA), is an alternative that results in significant financial and spatial savings for a possible expansion of ETA. The objective of this work is to evaluate the operational conditions for the adaptation of ETA Extremoz to double filtration technology in a pilot plant, maintaining and taking advantage of the existing ETA structure and verify the treatment technology for current and future water flow. The research consisted of two phases, the first one evaluated the treatment behavior by the DF technology with flow rates of 190, 210, 230 and 255  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  for FAP and 250, 280, 310 and 340  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  for the rapid sand filters in pilot-plant trials with eight-hour trials. The results obtained in the first phase indicated the FAP 3 as the one with the best performance and that the filtration rates studied did not significantly affect the quality of the filtered effluent. From then on, a more detailed investigation was carried out on the behavior of FAP 3 and fast sand filters, in pilot tests with a filtration rate of 230 and 255  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  for FAP and 310 e 340  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  for the FDA and 24-hour trials. From the analysis of the obtained data, it was concluded that despite the performance similar to the other FAP, the pre-filter FAP3 showed better efficiency and the lower averages of turbidity and apparent color remaining and the FAP1 was the worse performance. The performance of the FDA was statically equivalent, however, because of having a filtration career superior to the others, the FDA3 was the filter with granulometry more appropriate to the treatment of raw water. Turbidity peaks were recorded in the prefiltered water after the intermediate bottom discharges (DFI) and in the filtered water after washing the sand filters. In all tests, the final load loss of the FAP was less than 0.60 m (maximum available load of 240 cm), a result indicating that the hydraulic load expected for the pre-filter could be lower than that indicated in the literature. The elevation of the filtration rate did not influence the performance of the pre-filters, however filtration rates between 200 and 300  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  were the chosen range. The major influencer in the total charge loss of FAP3 is the false bottom. The lower layers of FAP3 did not contribute to the removal of turbidity and color. The FAP proved to be an equalizer in the quality of the influent water of the sand filters. For the studied flow rates the grain size of the FDA does not generate different effluents from each other.

Keywords: Double filtration, oxidation, water treatment technology, filtration rate, granulometry.

## 1 INTRODUÇÃO

A filtração é uma operação física unitária de separação líquido-sólido usada largamente na indústria e também em estações de tratamento de água (ETA). A separação das partículas suspensas e coloidais e de microrganismos presentes ocorre ao passo que a água escoar através do meio filtrante, o qual pode ser composto de uma ou várias camadas de areia de diferentes granulometrias, carvão mineral (antracito), dupla camada de areia e carvão ou tripla camada formada por areia, carvão e granada.

O fluxo de água nos filtros pode ser ascendente ou descendente, sendo que na dupla filtração (DF), o filtro ascendente é utilizado na primeira etapa do sistema (pré-filtração) e posteriormente o efluente é encaminhado ao filtro descendente. A DF é composta de duas unidades de filtração associadas para compor uma instalação que consegue somar as características particulares de cada uma delas: a filtração direta ascendente e a filtração descendente.

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2008), dentre as principais tecnologias disponíveis para o tratamento de água, a filtração direta ascendente demanda menor área e apresenta menor custo de implantação e operação, em relação à tecnologia de ciclo completo. Apesar dessa vantagem, a filtração direta ascendente possui limitações relativas à capacidade de tratamento de água com baixa qualidade hidrobiológica, requerendo tratamento complementar por meio de filtro adicional, ou seja, requer o emprego da DF. A utilização da DF possibilita o tratamento de água de pior qualidade, tem maior tolerância às variações de qualidade da água bruta, alcança maior remoção global de microrganismos e dispensa o descarte de água pré-filtrada no início da carreira de filtração (RIBAS; BERNAL; PERRAMÓN, 2000).

Kuroda (2002) realizou estudos com variações de taxas de filtração no filtro ascendente de 60 a 240  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  e no filtro descendente de 100 a 240  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ . A turbidez resultante nos efluentes dos filtros descendentes dos dois sistemas apresentou valor menor que 1,0 uT nas 19 horas de duração da carreira de filtração. As descargas de fundo intermediárias com esvaziamento total do filtro apresentaram melhor eficiência na recuperação da carga hidráulica. O efluente final apresentou valores dentro dos limites de potabilidade permissíveis pela Portaria 1469/2000 (vigente na época).

Gusmão e Di Bernardo (2003) avaliaram a dupla filtração e concluíram que para turbidez de água bruta até 12 uT não seria necessária a filtração descendente, porque o Filtro Ascendente de Pedregulho - FAP, por si só, atendia aos padrões de potabilidade. No estudo, os autores avaliaram taxas de 195 e 375  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$  no filtro ascendente e 190 e 490  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$  no filtro descendente.

Paula (2003) avaliou a tecnologia de dupla filtração com água bruta com turbidez variando entre 8,5 e 21 uT e taxas variando de 120 a 360  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$  nos filtros ascendentes de areia grossa e de 200 a 400  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$  nos FDA e concluiu que os filtros ascendentes de areia grossa foram eficientes na remoção da turbidez, obtendo valores inferiores a 1 uT e observou ainda que quando executado as descargas de fundo intermediária (DFI) nos filtros de areia grossa as carreiras de filtração dos Filtro Descendente de Areia - FDA mais longas.

Wiecheteck *et al.* (2004) também estudaram dupla filtração, utilizando sistema com filtro ascendente de areia grossa e o outro utilizando FAP, acompanhados por filtração descendente de camada única de areia. O trabalho objetivou a remoção de substâncias húmicas e a água bruta apresentava valores de cor verdadeira entre 90 e 110 uH. As taxas de filtração utilizadas nos filtros ascendentes variavam de 80, 120 e 180  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$  e nos descendentes de 80, 120, 150, 160, 180, 200, 240 e 280  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ . Os efluentes dos FDA apresentaram cor aparente média inferior a 1 uH. A remoção de substâncias húmicas também foi significativa em termos de absorbância 254 nm, alcançando remoção de 93%.

Braga *et al.* (2007) avaliaram o processo de dupla filtração, utilizando FAP com taxa de 90  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ , seguido de dois filtros descendentes de areia em paralelo, com granulometrias diferentes, esses filtros funcionaram com taxa de 350  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ . O sistema apresentou resultados satisfatórios de turbidez e clorofila nos filtros descendentes de areia, chegando a valores de 0,30 uT para turbidez e 0,9  $\mu\text{g}/\text{L}$  para clorofila a.

Silva *et al.* (2012), avaliaram o tratamento de água bruta utilizando instalação piloto de dupla filtração, composta por FAP e FDA, seguida de unidade de pós-tratamento com carvão ativado granulado. Para execução das carreiras de filtração foram adotadas taxas de filtração de 120  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$  para o FAP e de 180  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$  para o FDA. Os autores concluíram que pelas

características da água bruta em estudo, somente a tecnologia da DF atenderia à Portaria nº 2.914/2011 (vigente na época), evidenciando que nem sempre a pré ou a intercloração são necessárias.

Lima e Capelo-Neto (2015), avaliaram unidade de pré-tratamento a montante de filtro ascendente (FA), a qual tinha o objetivo de condicionar água bruta eutrofizada à capacidade de tratamento do FA. Essa solução esbarrou na necessidade de se instalar essa unidade de pré-tratamento com cota mais elevada que o filtro a jusante. Optou-se então pela instalação de um filtro de pressão de fluxo descendente o qual possibilitou a eliminação do problema do desnível geométrico e a adequação da água bruta com elevada presença de fitoplâncton às limitações da filtração direta ascendente. O pré-filtro de pressão (PFP) com taxa de  $300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  apresentou remoção de 50% de cor aparente e 80% de turbidez. A eficiência global do sistema PFP/FA foi satisfatória, apresentando turbidez final inferior a 0,5 uT, cor aparente em torno de 5 uH, além de reduzir o consumo de água para as lavagens em 40%.

Sabogal-Paz et al. (2015) avaliaram a dupla filtração visando definir os critérios de seleção de tecnologias de tratamento. A literatura é unânime em afirmar que na dupla filtração é necessário realizar o anteprojeto dos dois tipos de instalações (filtro ascendente em pedregulho - FAP e filtro ascendente em areia grossa - FAAG) e, em seguida, fazer um estudo técnico-econômico para determinar a melhor alternativa a ser implantada. Os resultados indicaram que o gerenciamento dos resíduos, a escavação e o consumo de energia elétrica na DF com FAAG podem incrementar o valor presente em até 33% quando comparado à DF com FAP; o resultado é válido para sistemas com vazões entre 10 e 100  $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ . Concluíram que a DF com filtro de pedregulho é mais viável economicamente.

A ETA Extremoz foi projetada para operação com vazão de início de plano de 500  $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ , podendo ser ampliada para até 1.000  $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$  mediante o aproveitamento hídrico da Lagoa de Extremoz, está em operação desde 1992. O manancial de superfície se enquadra na Classe 2, segundo a Resolução CONAMA Nº 357/2005, segundo Brito (2018).

O objetivo desse trabalho é avaliar em instalação piloto as condições operacionais para adequação da ETA Extremoz para a tecnologia de dupla filtração com pré-oxidação, mantendo e aproveitando a estrutura existente da

ETA e verificar a tecnologia de tratamento para vazão atual ( $700 \text{ L.s}^{-1}$ ) e futura ( $1000 \text{ L.s}^{-1}$ ).

Trata-se de investigação realizada no contexto do projeto de pesquisa intitulado “Caracterização de resíduos líquidos gerados em instalação piloto de dupla filtração e em ETA de ciclo completo em escala real”, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - processo 467848/2014-9), tendo como instituição executora o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) e como parceiras a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN). Nesse projeto ainda foram desenvolvidos estudos concomitantes sobre oxidação e adsorção, filtração direta em linha e caracterização das águas de lavagem e descargas de fundo de filtros da IPDF e da ETA em escala real.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo são apresentados conceitos de operações unitárias importantes em no tratamento de água para consumo humano com DF como: oxidação, coagulação e filtração.

### 2.1 Oxidação

O cloro por sua excelente ação como oxidante é amplamente utilizado nacional e internacionalmente em tratamento de água. O maior problema da sua aplicação é sua reatividade com matéria orgânica natural (MON) e a consequente formação de subprodutos da oxidação (SINGER & RECKHOW, 1999).

A maioria dos subprodutos da oxidação é tóxica ou resulta em problemas de gosto e sabor na água. A formação dos subprodutos da oxidação é função da dosagem de cloro (C) e do tempo de contato (T); como as duas variáveis são interdependentes, é preferível conhecer o produto CxT do que cada uma isoladamente. A formação de clorofórmio ( $\text{CHCl}_3$ ) durante a oxidação com cloro é um processo de dois estágios, após uma fase inicial de rápido crescimento, observa-se crescimento linear quando relacionado com a exposição da dose de cloro em um tempo de contato, CxT (VON GUNTEN et al., 2001). A MON presente em águas naturais é uma mistura complexa de vários compostos – substâncias húmicas, aminoácidos e ácidos carboxílicos – em tão baixas concentrações que dificultam a determinação analítica qualitativa e quantitativa das espécies químicas constituintes, em particular por laboratórios operacionais de ETA (THURMAN & MALCOLM, 1981).

A parcela remanescente de MON reage com cloro e forma trialometanos. (HAMBSCHE & WERNER, 1993; HAMBSCHE et al., 1993; FRIAS et al., 1995; KOTT, RIBAS & LUCENA, 1997, apud PAGE et al., 2002). Anteriormente, o controle da concentração de MON em águas de abastecimento tinha como objetivo remover cor verdadeira de modo que o efluente final estivesse esteticamente adequado para fins de consumo humano. Entretanto, no início do século XXI, verificou-se crescente interesse de pesquisadores em tratamento de água e operadores de ETA não só em relação à presença de MON em água bruta como nas condições de sua degradação em água tratada destinada ao consumo humano. Entre outros efeitos, a presença de MON (total ou dissolvida)

em água tratada constitui substrato para o crescimento de microrganismos no sistema de distribuição (ROCHA, 2007).

A remoção efetiva de MON em águas de abastecimento torna-se necessária devido aos efeitos adversos de subprodutos resultantes de reações com o cloro e outros oxidantes, além de redução da qualidade organoléptica pelo sabor e odor alterados (O'CONNOR *et al.*, 1975). Além do mais, MON eleva a demanda de cloro e afeta a taxa de corrosão de canalizações do sistema de distribuição (LEE *et al.*, 1981).

A partir da década de 1970, com a descoberta de que determinados compostos orgânicos identificados em águas de abastecimento eram formados pela reação do cloro com MON presente na água bruta, novos objetivos tiveram de ser considerados na operação de ETA. Nesta época, pesquisas mostraram que a reação do cloro com determinadas espécies de MON poderia formar compostos organohalogenados (ROOK, 1976; BELLAR *et al.*, 1976 *apud* Duarte, 2011). Dentre estes, os que estão presentes em maiores concentrações em águas de abastecimento, quando submetidas ao processo de desinfecção com o cloro, são TAM (clorofórmio, bromofórmio, diclorobromometano, clorodibromometano) e ácidos haloacéticos (ácido monocloroacético, dicloroacético, tricloroacético, monobromoacético e dibromoacético) (SYMONS *et al.*, 1975; ROOK, 1976; KRASNER *et al.*, 1989; ARORA *et al.*, 1997 *apud* Duarte, 2011).

Pesquisa realizada por RODRIGUEZ & SÉRODES (2005) destaca que TAM e ácidos haloacéticos (AHA) são os dois grupos mais comuns de subprodutos da desinfecção e oxidação encontrados em águas de abastecimento. Na maioria dos países desenvolvidos e em desenvolvimento existe regulamentação para os níveis de trihalometanos - TAM na água potável, inclusive o Brasil, entretanto para AHA esta regulamentação é mais rara. Estudos desenvolvidos sugerem possíveis correlações entre a presença de subprodutos da oxidação e agravos à saúde humana. Algumas espécies de subprodutos da oxidação são consideradas potencialmente cancerígenas com possibilidade de efeitos adversos na fase de reprodução e durante a gravidez (KÄLLÉN & ROBERT, 2000).

Nos processos convencionais de tratamento de água, grande parcela de MON é removida na coagulação química, floculação, sedimentação ou flotação e filtração em areia.

## 2.2 Coagulação

Para a maioria das tecnologias de tratamento, o processo de coagulação da água bruta é processo essencial para assegurar níveis adequados de qualidade do efluente, tal como turbidez inferior a 1,0 uNT e ausência de microrganismos patogênicos como oocistos de *Cryptosporidium parvum*. Falhas nesse processo inicial resultam em falhas ao longo do sistema de tratamento por meio de filtração rápida (HURST et al., 2004).

A maioria das substâncias coloidais das águas naturais são carregadas negativamente daí a tendência de serem estáveis como resultado das forças de repulsão entre estas partículas.

Os coagulantes mais utilizados para tratamento de água são o sulfato de alumínio e formas pré-polimerizadas como hidroxicloreto de alumínio (HCA) ou sulfato de polialumínio (SPA).

O HCA é um complexo poli-nuclear de íons de alumínio polimerizados, um tipo de polímero inorgânico de peso molecular medido em várias centenas de unidades. Ele é geralmente formulado como  $Al_n(OH)_m$  combinado com pequenas quantidades de outros compostos, também apresentado nas formas de complexos hidroxílicos monoméricos ou poliméricos, tais como  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^{2+}$ ,  $Al_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Al_3(OH)_2^{5+}$  e  $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$  (ou  $Al_{13}$ ) como detalhado por Duarte (2011). A utilização de HCA, em vez de SPA provoca uma menor variação do pH da água e conseqüentemente menor consumo de neutralizante para ajuste fino de pH da água (CONSTANTINO & YAMAMURA, 2009).

A principal vantagem de uso do HCA é a sua maior efetividade em faixa mais ampla de pH e em temperaturas mais baixas que o sulfato de alumínio. Além disso, a dose requerida é normalmente mais baixa devido à maior densidade de cargas das espécies de HCA o que resulta em menor volume de lodo produzido. As soluções de HCA contêm espécies poliméricas que são mais estáveis e mais efetivas na neutralização de cargas quando comparadas às espécies monoméricas.

A dosagem ótima de coagulante depende de uma ampla faixa de parâmetros físico-químicos como força iônica da solução, pH, carga elétrica

específica do substrato e coagulante, concentração de substrato e área superficial específica (EISENLAUER & HORN, 1987 *apud* Duarte 2011.)

O sistema de mistura rápida é parte importante na coagulação e tem o objetivo de dispersar rápida e uniformemente o coagulante por todo o meio líquido por meio de agitação e altos gradientes de velocidade. A eficiência da coagulação depende do tipo de coagulante, da dosagem do coagulante, e de mistura rápida com gradientes de velocidades adequados, visto que a coagulação está relacionada com a formação dos primeiros complexos de cátions metálicos hidrolisados. Essa reação de hidrólise é rápida e, para haver a desestabilização dos coloides, é indispensável a dispersão de coagulante sobre a massa de água em curto período de tempo, o que justifica o sistema de mistura rápida (AZEVEDO NETTO, 1976).

### **2.3 Filtração**

O processo de filtração no qual ocorre retenção de partículas sólidas suspensas na água durante o fluxo em meio poroso e objetiva remoção de microrganismos e substâncias orgânicas e inorgânicas contidas no meio líquido. A filtração rápida consiste na passagem de água pré-condicionada, através de uma camada de material granular com velocidade de aproximação entre  $8,3 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  e  $42 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  que correspondem a taxas de filtração entre  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$  e  $600 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ , respectivamente. Os sólidos removidos da água e acumulados nos vazios intergranulares caracterizam a filtração rápida com efeito de profundidade e quando a retenção ocorre preponderantemente na camada superficial do meio filtrante, tem-se a filtração de superfície, característica principal da filtração lenta, embora possa ocorrer em filtros rápidos descendentes de camada única de areia. O pré-condicionamento de águas superficiais por coagulação química é essencial para se obter eficiente remoção de partículas; às vezes faz-se necessária a adição de polímeros auxiliares de coagulação antes da filtração para garantir efetiva retenção das partículas no meio filtrante (CLEASBY & LOGSDON, 1999).

A eficiência da filtração está diretamente relacionada com o desempenho de processos antecedentes como coagulação (dose e tipo de coagulante, pH de coagulação, tempo e gradiente de mistura rápida).

Outros fatores intervenientes no processo são o nível de controle operacional, tipo de meio filtrante, execução de lavagem e grau de capacitação

de operadores, dentre outros. O tipo de material e granulometria do meio filtrante constituem as principais variáveis de projeto que interferem no desempenho de filtros; areia, carvão mineral antracitoso, granada e CAG são materiais mais empregados para esta finalidade (VAHALA, 2002).

A areia quartzosa é o material mais empregado não só por sua elevada resistência à abrasão e densidade que evita desgaste e perdas durante a lavagem, mas também pelo preço acessível e facilidade de obtenção (RICHTER, 2009). A dupla filtração é aplicada como alternativa tecnológica a fim de maximizar as vantagens das tecnologias de filtração direta ascendente e descendente e reduzir desvantagens e possibilitar maior eficiência de remoção de sólidos, algas e substâncias precursoras de subprodutos da oxidação da matéria orgânica. Pode também ser aplicada quando a água bruta apresenta suspeita de presença de vírus, protozoários e variações bruscas de qualidade (DI BERNARDO et al., 2006). A dupla filtração exhibe as seguintes vantagens sobre a filtração direta ascendente: i) capacidade de tratamento de águas de qualidade inferior, ii) maior taxa de filtração no filtro ascendente, iii) maior segurança operacional em face a variações bruscas da água bruta e iv) eliminação do descarte do efluente pré-filtrado no início da carreira de filtração (DI BERNARDO, 2006).

A quantificação da perda de carga no meio filtrante limpo é importante no projeto da unidade de filtração. A equação publicada por Ergun (1952) tendo sido modificada para utilização em meios granulares estratificados (para granulometria variável ao longo da profundidade da camada ou meio filtrante). Essa modificação pode apresentar-se como na forma da Equação 2.1 (DI BERNARDO; DANTAS, 2005):

$$\Delta h = 150 \left[ \frac{\mu}{\rho f g} \right] \left[ \frac{(1-f)^2}{f^3} \right] \left[ \frac{\Delta L}{\psi^2} \right] U \left( \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{(d g_i)^2} \right) + 1,75 \left[ \frac{1}{g} \right] \left[ \frac{(1-f)}{f^3} \right] \left[ \frac{\Delta L}{\psi} \right] U^2 \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{d g_i} \quad (\text{Eq.2.1})$$

Na qual:

$\Delta h$  = perda de carga no leito,  $\Delta L$  = espessura do leito,  $U$  = velocidade relativa a seção transversal vazia do leito, e  $\rho$  = densidade do fluido,  $\mu$  = viscosidade do fluido;  $f$  = porosidade média do meio filtrante;  $\psi$  : coeficiente de esfericidade do

grão coletor;  $X_i$ : fração correspondente da camada  $i$ ;  $d_{g_i}$  : média geométrica entre os tamanhos das aberturas de duas peneiras consecutivas (ensaio de granulometria) da camada  $i$ .

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Lagoa de Extremoz

A lagoa de Extremoz situa-se no município de Extremoz (5° 42' 20" S, 35° 18' 26" W), 20 km a noroeste de Natal/RN, e de um modo geral, pode-se considerar essa lagoa como medianamente impactada, porém com tendência desse impacto crescer progressivamente, tendo em vista a lagoa estar situada nos limites da região metropolitana de Natal. A Figura 3.1 mostra a localização da Lagoa de Extremoz bem como a da ETA Extremoz.

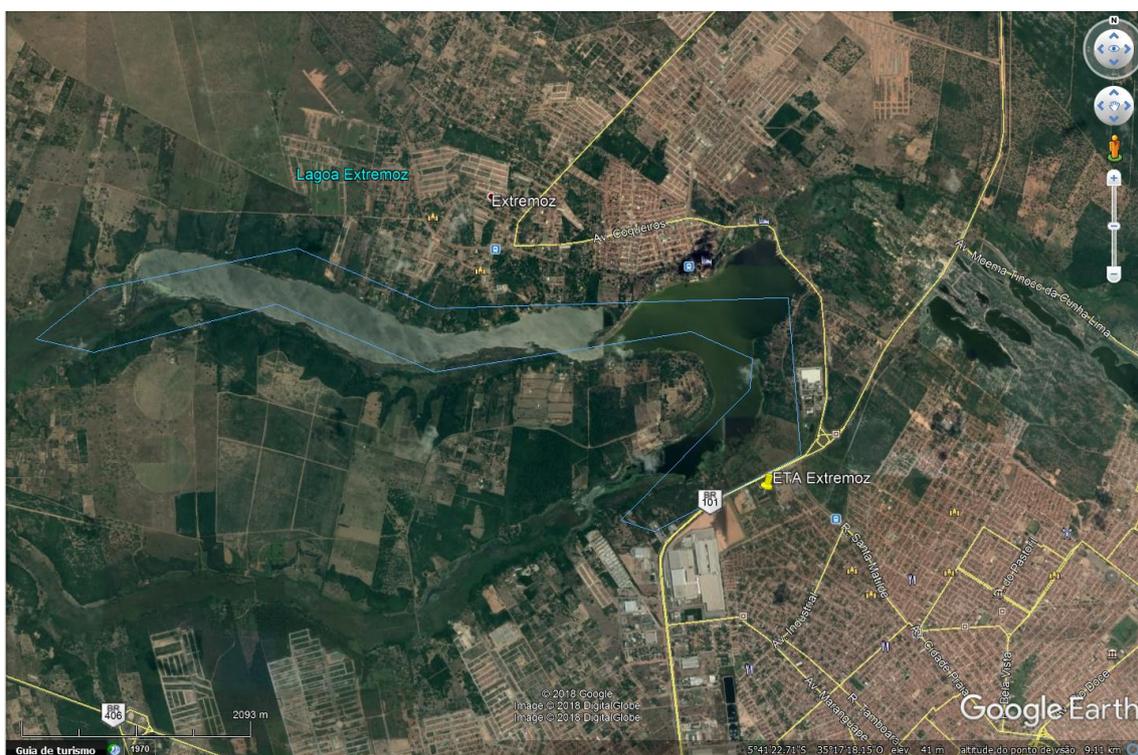


Figura 3.1 – Localização da ETA Extremoz em relação à Lagoa de Extremoz.

Fonte: Google Earth®.

Freitas (2017) realizou ensaios de tratabilidade com água da lagoa e obteve características (valores máximos e mínimos) as quais são mostradas na Tabela 3.1. Esse estudo norteou a dose de coagulante e de oxidante na pré-oxidação utilizados nos ensaios realizados nesta pesquisa.

Tabela 3.1 – Características da água bruta da Lagoa de Extremoz no período de julho a setembro de 2016 (mínimos-máximos).

Cor aparente (uH)	Turbidez (uNT)	SST (mg/L)	pH
19 - 24	1,28 - 2,37	1,0 - 4,0	7,36 - 7,72

Fonte: FREITAS (2017).

### 3.2 ETA Extremoz

A ETA Extremoz foi projetada para operação com vazão de início de plano igual a  $500 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , podendo ser ampliada para até  $1.000 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  mediante o aproveitamento hídrico da Lagoa de Extremoz.

Atualmente, a ETA Extremoz trata vazão da ordem de  $700 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , isto é, apresenta uma sobrecarga hidráulica em relação à sua vazão nominal de cerca de 30%. A implantação da ETA foi concebida com dois módulos de tratamento, sendo cada módulo dotado de dois floculadores mecanizados com quatro câmaras de floculação em série, seguidas de dois decantadores de fluxo laminar e quatro filtros rápidos por gravidade de fluxo descendente, trabalhando hidráulicamente com taxa declinante. A Figura 3.2 mostra o fluxograma das operações de tratamento de água da ETA Extremoz.

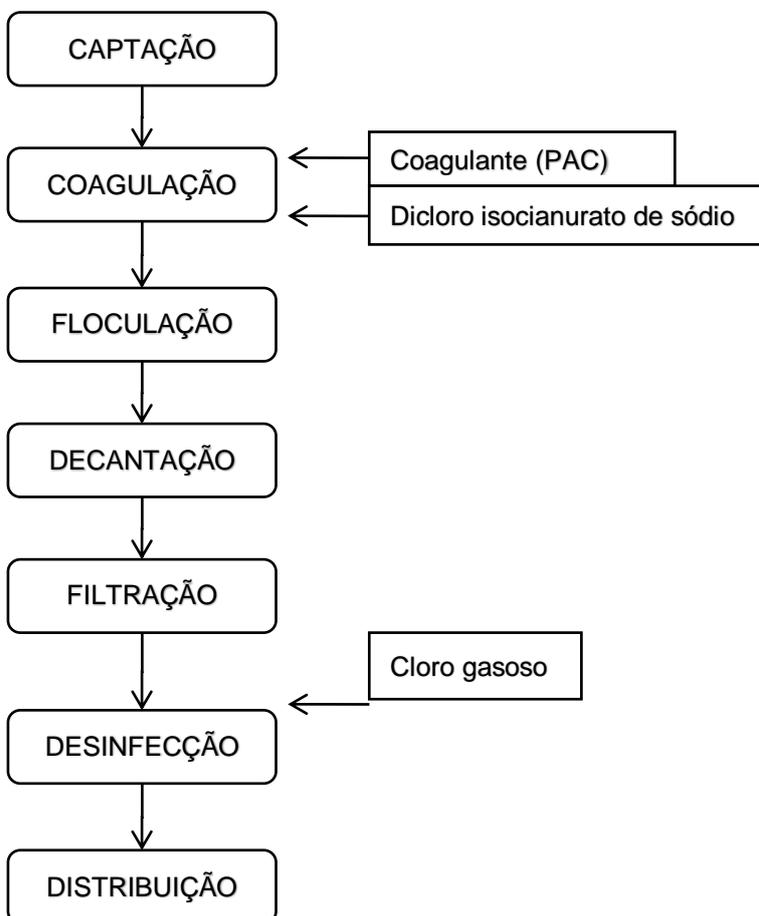


Figura 3.2 – Fluxograma das operações de tratamento da ETA Extremoz.  
Fonte: Adaptado de Gerentec (2010)

A Figura 3.3 é o croqui da ETA Extremoz com as unidades de tratamento de água e de resíduos.

O primeiro módulo de tratamento foi implantado em setembro de 1992 com capacidade hidráulica para 500 L.s<sup>-1</sup>, tendo sido prevista a implantação do segundo módulo com capacidade também de 500 L.s<sup>-1</sup>, totalizando vazão nominal de 1.000 L.s<sup>-1</sup>. A Figura 3.4 mostra imagem aérea da ETA Extremoz e destaca a área de tratamento em operação e área de implantação do segundo módulo de tratamento.

Apesar de o projeto optar pela tecnologia de ciclo completo, desde o ano 2000 a ETA Extremoz opera com a tecnologia de filtração direta, devido a água bruta ser de baixa turbidez e de difícil decantação, e as estruturas dos floculadores e decantadores funcionam como simples caixas de passagem. Nesse cenário, a construção do segundo módulo na tecnologia do ciclo completo não constitui alternativa viável tanto do ponto de vista econômico como do técnico. A reforma das estruturas atualmente inoperantes para funcionarem como câmaras de pré-oxidação (floculadores) e filtros ascendentes de pedregulho (FAP) (decantadores) ou seja, adaptando a tecnologia de ciclo completo para dupla filtração para vazão de 1.000 L.s<sup>-1</sup>, é alternativa que resulta em significativa economia financeira e espacial para uma possível ampliação da ETA.

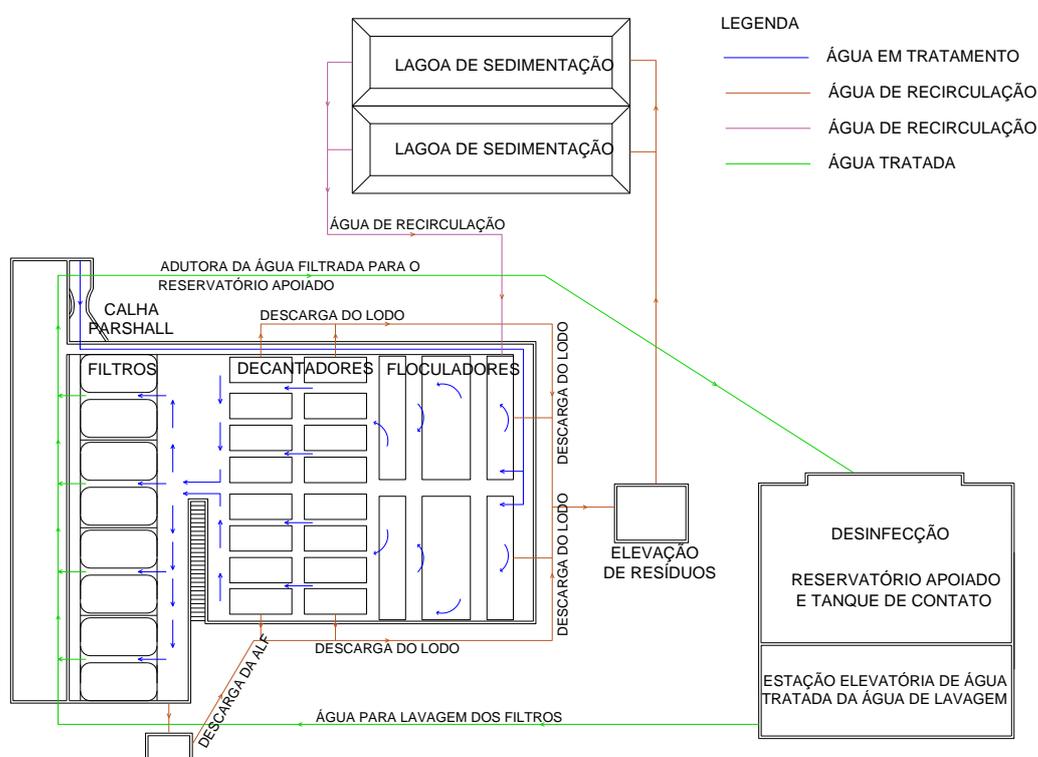


Figura 3.3 – Croqui da ETA Extremoz.

Fonte: Fornecido pela CAERN.



Figura 3.4 – Posicionamento da ETA Extremoz em relação à área de implantação do segundo módulo de tratamento.

Fonte: Adaptado de Gerentec (2010)

Nota-se que a tecnologia de DF é adequada à qualidade da água bruta, como mostrado na Tabela 3.2. Apesar do valor máximo recomendado para taxa de filtração ascendente, os estudos apresentados neste trabalho, mostram bons resultados para taxas em FAP de até  $360 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ .

Tabela 3.2 –Parâmetros de qualidade da água bruta, de projeto e operação recomendados para o emprego da tecnologia de dupla filtração.

Parâmetros		Dupla filtração
Turbidez (uT)	90% do tempo ≤	100
Cor verdadeira (uH)	90% do tempo ≤	100
Taxa de filtração ascendente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia)		24 a 144
Taxa de filtração descendente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia)		200 a 400

Fonte: Adaptada de DI BERNARDO E ISAAC (2001).

### 3.3 Caracterização da instalação piloto

A Instalação Piloto de Dupla Filtração - IPDF na qual foram realizados os estudos, foi montada na ETA Extremoz, em área coberta de 110 m<sup>2</sup>, sendo composta por quatro câmaras de pré-oxidação, quatro câmaras de adsorção com carvão ativado pulverizado, quatro FAP, três câmaras de interoxidação, três FDA e três colunas de adsorção com carvão ativado granulado. A IPDF dispõe de seis bombas dosadoras de diafragma para dosagem de carvão ativado pulverizado, coagulante, polímero auxiliar de coagulação e oxidante. O sistema de dupla filtração além de poder ser operado com diferentes taxas de filtração e granulometrias, possibilita diferentes arranjos de processos de tratamento tais como filtração direta em linha, filtração direta ascendente e dupla filtração. Além disso, permite a introdução das etapas de oxidação (pré ou inter) e adsorção (CAP e CAG). Mais informações e detalhes da IPDF podem ser obtidos em (Duarte, 2011).

Os FAP e FDA têm diâmetros internos de 200 mm e 100 mm, respectivamente e foram construídos em fibra de vidro revestida com resina de poliéster, semitransparente. Para minimizar o efeito de parede no escoamento da água nos filtros foi impregnada na superfície interna dos mesmos uma camada de areia com grãos entre 0,60 e 1,00 mm sobre a resina fresca, conferindo rugosidade equivalente à superfície de concreto sem acabamento, Duarte (2011).

As características granulométricas das camadas filtrantes e suporte dos filtros FAP e FDA estão descritas nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5. Os filtros FAP e FDA eram dotados de piezômetros – derivações em latão  $\phi 1/4"$  roscadas em buchas de PVC fixadas na parede do filtro por laminação em fibra de vidro e resina, ligadas a mangueiras em polipropileno cristal – nas interfaces das camadas suporte e filtrante, para a verificação da variação das perdas de carga

laminares devido ao acúmulo de impurezas e consequente diminuição da porosidade. A altura da camada de areia nos FDA era de 70 cm da camada de areia e 35 cm de camada suporte; nos FAP a altura do leito era de 120 cm, sendo 60 cm de camada suporte e 60 cm de pedregulho estratificado em quatro granulometrias.

Tabela 3.3 – Características das camadas suporte e filtrantes dos pré-filtros FAP.

Filtro	Camada filtrante	Tamanho dos grãos (mm)	Espessura (cm)
FAP 1	1 (fundo/suporte)	19,0- 25,4	15
	2	12,7- 19,0	15
	3	7,9- 12,7	30
	4 (topo)	4,8- 7,9	60
FAP 2	1 (fundo/suporte)	19,0- 25,4	15
	2	12,7- 19,0	15
	3	6,4- 12,7	30
	4 (topo)	3,2- 6,4	60
FAP 3	1 (fundo/suporte)	15,9- 25,4	15
	2	9,6- 15,9	15
	3	4,8- 9,6	30
	4 (topo)	2,4- 4,8	60
FAP 4	1 (fundo/suporte)	12,7- 19,0	15
	2	6,4- 12,7	15
	3	3,2- 6,4	30
	4 (topo)	2,0-3,2	60

Fonte: Adaptado de Duarte (2011)

Tabela 3.4 – Características da camada suporte dos FDA1, FDA2 e FDA3.

Camada	Tamanho dos grãos (mm)	Espessura (cm)
1 (fundo)	19,0 – 12,7	5
2	12,7 – 6,4	5
3	6,4 – 3,4	5
4	3,4 – 2,0	5
5	6,4 – 3,4	5
6	12,7 – 6,4	5
7 (topo)	19,0 – 12,7	5
Espessura total		35

As características da Tabela 3.4 foram estabelecidas visando adequar o sistema de drenagem dos FDA (placa perfurada com furos de Ø 9m, com densidade de furos de 190 furos/m<sup>2</sup>) ao sistema em escala real, atualmente blocos universais em plástico polipropileno.

Tabela 3.5 – Características das camadas filtrantes dos FDA.

Filtro	Camada filtrante	Tamanho dos grãos (mm)
FDA 1	1	0,35 – 0,42
	2	0,42 – 0,50
	3	0,50 – 0,59
	4	0,59 – 0,84
	5	0,84 – 1,00
$D_0=0,3$ mm; $D_{10}=0,50$ mm; $D_{60}=0,81$ mm; $D_{100}=1,0$ mm; $CD=1,62$ .		
FDA 2	1	0,35 – 0,42
	2	0,42 – 0,50
	3	0,50 – 0,59
	4	0,59 – 0,84
	5	0,84 – 1,00
	6	1,00 – 1,19
$D_0=0,3$ mm; $D_{10}=0,57$ mm; $D_{60}=1,05$ mm; $D_{100}=1,2$ mm; $CD=1,84$		
FDA 3	1	0,42 – 0,50
	2	0,50 – 0,59
	3	0,59 – 0,84
	4	0,84 – 1,00
	5	1,00 – 1,19
	6	1,19 -1,65
$D_0=0,4$ mm; $D_{10}=0,87$ mm; $D_{60}=1,45$ mm; $D_{100}=1,7$ mm; $CD=1,67$		

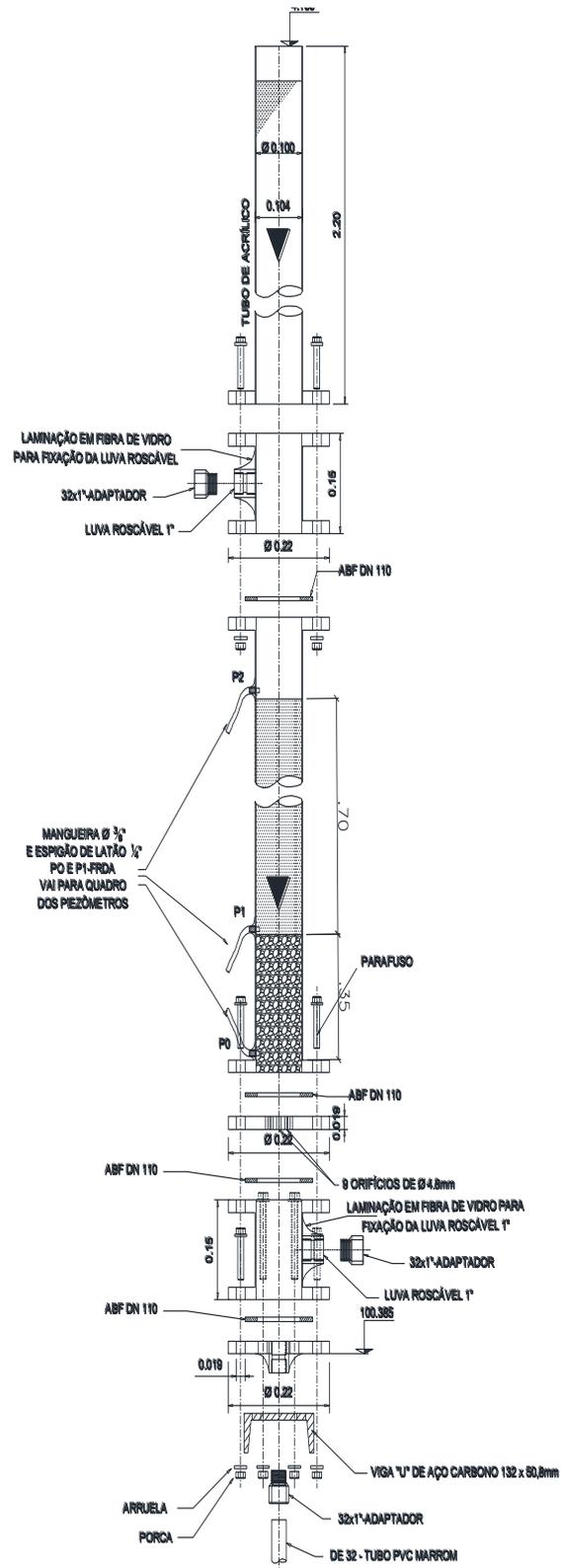
LEGENDA:  $D_0$ : diâmetro do menor grão;  $D_{10}$ : diâmetro efetivo;  $D_{60}$ : diâmetro tal que 60% do solo, em massa, têm diâmetros inferiores (mm);  $D_{100}$ : diâmetro do maior grão;  $CD$ : coeficiente de desuniformidade.

Para filtros rápidos de areia, recomenda-se que a grandeza  $L/d_{10}$  (sendo  $L$  a espessura da camada de areia) seja superior a 1.000 (KAWAMURA, 2000). Para os filtros de areia da IPDF, tem-se que para o FDA1, FDA2 e FDA3,  $L/d_{10}$  são 1.400, 1.200 e 800, respectivamente.

Apesar do valor de  $L/d_{10}$  do FDA3 ser inferior a 1.000, foi observado desempenho equivalente do FDA3 quando comparado aos demais filtros, como detalhado no capítulo 4 desse trabalho.

### 3.3.1 Medição das perdas de carga nos filtros FAP e FDA

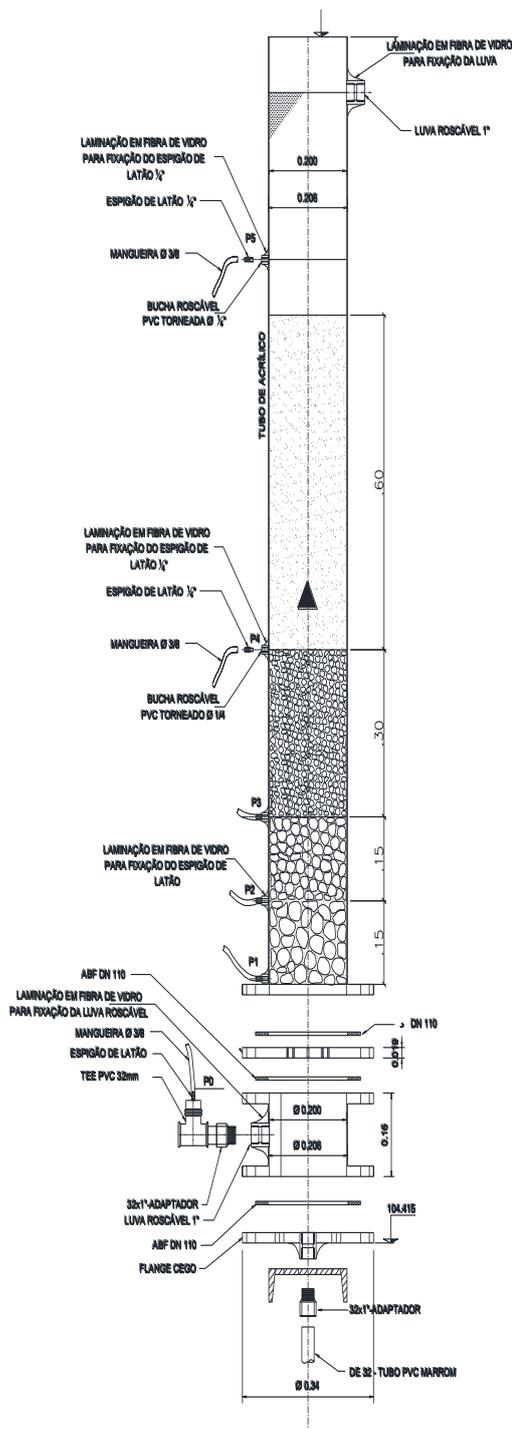
A medição da perda de carga foi realizada ao longo das carreiras de filtração através da verificação da pressão estática nos piezômetros instalados nos filtros. A Figura 3.9 detalha e identifica as posições dos piezômetros nos FAP no sentido ascendente por  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  e  $P_4$  e nos FDA, também no sentido ascendente por  $P_0$ ,  $P_1$  e  $P_2$  (base, interface camada suporte e camada filtrante e acima da camada filtrante).



### Filtros rápidos descendentes de areia (FDA) Corte Vertical

esc 1:20

Figura 3.5 – Desenho esquemático dos filtros descendentes de areia.  
Fonte: Adaptado de Duarte (2011).



### Filtros de fluxo ascendentes de pedregulho (FAP) Corte Vertical

esc 1:20

Figura 3.6 – Desenho esquemático dos filtros ascendentes de pedregulho.  
Fonte: Adaptado de Duarte (2011)

### 3.4 Qualidade da água bruta e tratada

O monitoramento da qualidade do efluente tratado foi realizado com frequência horária e com determinação de cor aparente e verdadeira, turbidez e

pH, alcalinidade, clorofila a, sólidos totais, matéria orgânica natural (MON) e absorvância em 254 nm ( $ABS_{254}$ ), tanto na água bruta como nos efluentes de cada unidade de filtração.

Os parâmetros físico-químicos e metodologias analíticas utilizadas estão resumidos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Metodologias analíticas para medição de variáveis de controle dos processos de tratamento e caracterização de água bruta.

Variável de Controle	Metodologia de análise	Referência
$ABS_{254}$ nm	Espectrofotometria	APHA, AWWA e WEF (1999)
Alcalinidade	Titulometria potenciométrica	APHA, AWWA e WEF (1999)
Cloro residual	Colorimetria com DPD	APHA, AWWA e WEF (1999)
Clorofila a	Extração a quente com metanol 100%	Jones (1979)
Cor	Fotometria método tristimulus	APHA, AWWA e WEF (1999)
OC/MON	Titulometria (oxidação a quente com $KMnO_4$ )	ABNT (1990)
pH	Potenciometria (eletrodo combinado)	APHA, AWWA e WEF (1999)
SST	Gravimetria	APHA, AWWA e WEF (1999)
Temperatura	Potenciometria (eletrodo combinado)	APHA, AWWA e WEF (1999)
Turbidez	Nefelometria	APHA, AWWA e WEF (1999)

Fonte: Adaptado de Duarte (2011).

### 3.5 Análises estatísticas dos dados obtidos

Foram calculados, computacionalmente com auxílio do *Statsoft* STATISTICA® e do *Microsoft* Excel®, parâmetros da estatística descritiva, tais como, médias, aritmética e geométrica para estimar tendência central, intervalo máximo e mínimo, mediana como valor central do conjunto de dados.

Para evidenciar a eficácia da tecnologia de tratamento, relações entre as características físicas do meio filtrante, das taxas de filtração e qualidade do efluente, foram feitos testes de hipóteses, com nível de significância de 5% e análise de variância ANOVA.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Estudo de adequação

Nessa seção expõem-se as estruturas existentes da ETA Extremoz e as adequações necessárias para se estabelecer a DF, bem como os cálculos para obtenção do tempo de detenção hidráulica das câmaras da pré-oxidação e taxas de filtração dos FAP e FDA para as vazões atual ( $700 \text{ L.s}^{-1}$ ) e futura ( $1000 \text{ L.s}^{-1}$ ).

A reforma/adaptação da ETA é um tipo de Solução Baseada na Natureza (SbN) que apoia uma economia circular, restauradora e regenerativa por sua própria essência e promove uma maior produtividade dos recursos, visando reduzir os desperdícios e evitar a poluição, inclusive por meio do reuso e da reciclagem. A utilização da SbN no setor hídrico também gera benefícios nos campos social, econômico e ambiental, incluindo a melhoria da saúde humana e dos meios de subsistência, o crescimento econômico sustentável, empregos dignos, a reabilitação e a manutenção de ecossistemas, e a proteção/desenvolvimento da biodiversidade. O valor de alguns desses benefícios pode ser significativo e direcionar as decisões de investimentos em prol da SbN (CONNOR, 2018).

A Figura 4.1 mostra uma vista das unidades de floculação e decantação as quais serão detalhadas a seguir.



Figura 4.1 – Vista geral das unidades de floculação associadas aos decantadores da ETA Extremoz.

Fonte: Gerentec (2010)

#### 4.1.1 Floculadores

Foram construídos dois floculadores com quatro câmaras de floculação cada um e as dimensões de cada câmara de floculação são 5,80 m de largura por 5,80 m de comprimento e 3,50 m de profundidade. Portanto, tem-se que o volume de cada unidade de floculação é aproximadamente 471 m<sup>3</sup>.

Adaptando-se os floculadores para funcionarem como unidades de pré-oxidação e para uma vazão de 1,0 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, tem-se que o tempo de detenção hidráulica estimado foi de 15 min para vazão de 1.000 L.s<sup>-1</sup> e de 22 min para a vazão atual de 700 L.s<sup>-1</sup>, utilizando a Equação 4.1.

$$\theta = \frac{V_f}{Q_f} \quad (\text{Eq.4.1})$$

Na qual:

$\theta$  é o tempo de detenção hidráulico;  $V_f$  é o volume da câmara de oxidação;  $Q_f$  é a vazão afluyente à câmara de oxidação.

Nos ensaios de tratabilidade realizados por Freitas (2017), o tempo ótimo de oxidação com cloro obtido foi de 5 min, assim os tempos de detenção hidráulica dos floculadores para as duas situações são suficientes para a pré-oxidação.

#### 4.1.2 Decantadores

Existem dois decantadores de fluxo laminar vertical tendo cada um 11,60 m de largura por 12,40 m de comprimento e aproximadamente 6,40 m de profundidade, o que perfaz uma área superficial total de sedimentação igual a 287,68 m<sup>2</sup>.

Adaptando-se os decantadores para funcionarem como quatro FAP, cada um medindo 5,80x12,40 m, resulta em área de filtração de 71,92 m<sup>2</sup> por unidade e 287,68 m<sup>2</sup> como área total de filtração. Para estas dimensões, tem-se as seguintes taxas de filtração, calculadas pela Equação 4.2.

Para vazão atual de 0,7 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> a taxa de filtração do FAP resulta em 210 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>. Para a vazão futura de 1,0 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, a taxa de aplicação superficial seria 300 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>:

$$q_{FAP} = \frac{Q_{FAP}}{A_{FAP}} \quad (\text{Eq.4.2})$$

Na qual

$q_{FAP}$  é a taxa de filtração para o FAP;  $Q_{FAP}$  é a vazão afluyente ao FAP e  $A_{FAP}$  é a área da seção transversal do FAP.

Em caso de adequação para a tecnologia de DF deve-se planejar a elevação da altura da água a montante dos FAP, que pode ser solucionado com a instalação de equipamento de recalque, através do qual a água será bombeada para câmara de carga com altura suficiente para suprir a carga hidráulica para operação do FAP. Também deve-se planejar unidade de mistura rápida a qual deverá seguir projeto específico.

#### 4.1.3 Filtros descendentes

São quatro filtros formados por duas células de filtração, dotados de uma calha central de coleta de água de lavagem e largura de 80 cm e introdução de água decantada para filtração. Cada célula de filtração possui 7,50 m de comprimento e 3,05 m de largura, o que perfaz uma área filtrante total de 45,75 m<sup>2</sup>.

A Figura 4.2 mostra as oito células de filtração dos quatro filtros de areia da ETA Extremoz.



Figura 4.2 – Vista dos filtros de areia da ETA Extremoz.  
Fonte: Gerentec (2010).

Para as vazões de  $0,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e admitindo-se uma distribuição equitativa de vazões entre as unidades, são esperados os valores de taxas de

filtração de  $330 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  para a vazão de  $700 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  e  $470 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  para a vazão de  $1.000 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , obtidos pela Equações 4.3.

$$q_{\text{FDA}} = \frac{Q_{\text{FDA}}}{A_{\text{FDA}}} \quad (\text{Eq.4.3})$$

Na qual

$q_{\text{FDA}}$  é a taxa de filtração para o FDA;  $Q_{\text{FDA}}$  é a vazão afluente ao FDA e  $A_{\text{FDA}}$  é a área da seção transversal do FDA.

Em caso de parada de um filtro para fins de manutenção, tem-se que as taxas de filtração são da ordem de  $440 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  e  $630 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  obtidos por meio das Equações 4.3.

Os FDA podem ser bem operados com taxas de filtração da ordem de  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ , desde que as condições de pré-tratamento sejam plenamente satisfatórias, isto é, condições de coagulação e pré-filtração adequadas. Os valores de taxas de filtração observadas na adaptação para os FDA da ETA Extremoz não são adequados para a vazão de  $1000 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  e muito arrojadas para a vazão de  $700 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , neste caso, é importante a implantação de mais duas unidades para que a taxa de filtração esteja em valores mais adequados.

Sugere-se o aproveitamento do espaço ocupado pela calha Parshall, que mede 9 m no plano transversal aos filtros, ao noroeste dos filtros de areia para a construção de duas unidades de filtro rápido de areia: uma a noroeste e outra unidade a sudeste dos filtros, totalizando seis filtros descendentes de areia. A calha Parshall deve ser removida e a adutora prolongada até o canal próximo aos flocladores (câmaras de pré-oxidação). A Figura 4.3 mostra a calha Parshall que deverá ser removida para a construção de um novo filtro de areia.

Com a construção desses dois filtros adicionais e vazão de  $700 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  as taxas de filtração passam a ser  $220 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ , como calculado na Equação 4.3, quando operado com as seis unidades de filtração e quando em operação de lavagem ou manutenção, operaria com taxa de filtração de  $265 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$ . Esses valores são mais adequados quando comparados aos da operação com quatro filtros de areia.



Figura 4.3 – Calha Parshall da ETA Extremoz.

Fonte: Gerentec (2010).

Para vazão de  $1.000 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  as taxas de filtração passariam a ser  $315 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ , quando operado com seis unidades de filtração e quando em operação de lavagem ou manutenção, teria taxa de filtração de  $380 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ . Analogamente, esses valores são mais adequados quando comparados aos da operação com quatro filtros de areia.

O sistema de lavagem dos filtros foi projetado originalmente como sendo do tipo água em contracorrente e a água para lavagem em contracorrente é oriunda de reservatório elevado localizado em área externa da ETA.

Se seguidas as recomendações feitas por esse trabalho, o fluxograma da ETA Extremoz pós-reforma deve ser o mostrado na Figura 4.4.

A Figura 4.5 mostra o croqui da ETA Extremoz com as unidades de tratamento de água após a adequação proposta, os FDA hachurados são os quais representam a adequação proposta.

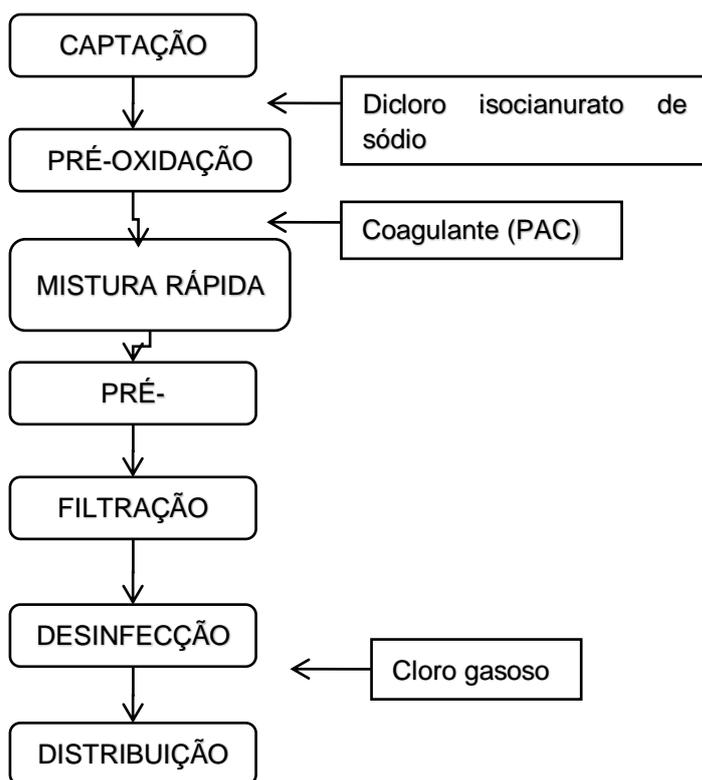


Figura 4.4 – Fluxograma das operações de tratamento da ETA Extremoz após adequação proposta.

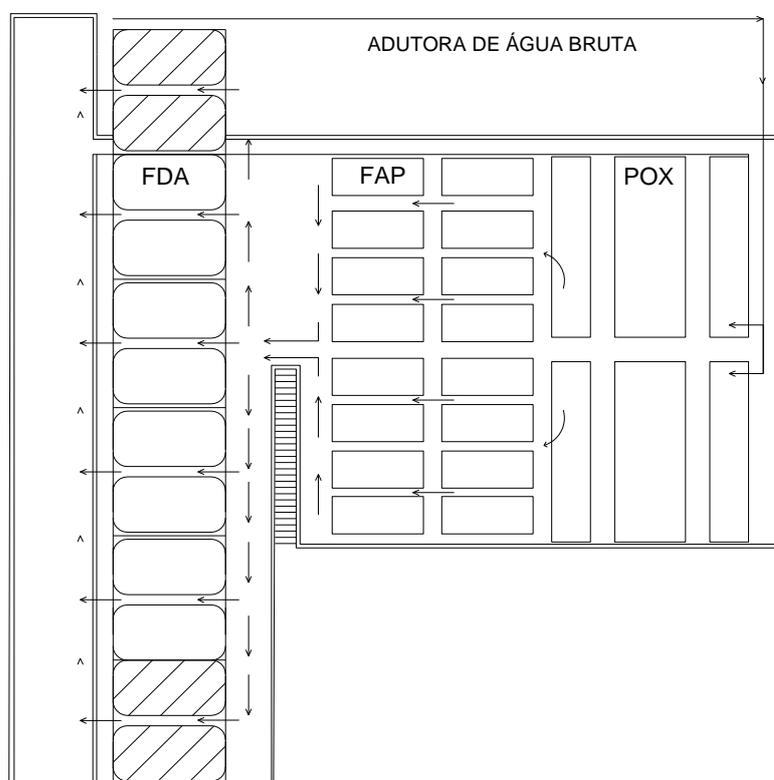


Figura 4.5 – Croqui da ETA Extremoz após adequação.

Legenda: POX: Câmaras de pré-oxidação; FAP: Filtros ascendentes de pedregulho; FDA: Filtros descendentes de areia.

Fonte: Projeto básico da ETA Extremoz (adaptado).

## 4.2 Ensaios na instalação piloto

Tendo em vista que a IPDF permite flexibilidade no modo de operação das unidades constituintes, os ensaios foram realizados com um filtro FAP alimentando três filtros FDA. As taxas de filtração experimentadas foram 190, 210, 230 e 255  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  para os FAP, as quais resultaram para os FDA taxas de 250, 280, 310 e 340  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ . Os ensaios foram divididos em duas fases.

Na fase 1 (março/2017 a agosto/2017), para cada taxa de filtração foi realizado ensaio em duplicata, ou seja, dois ensaios para cada taxa de filtração, assim para cada arranjo realizaram-se oito experimentos, resultando em 32 ensaios. Os ensaios tiveram duração média de 8h e foram realizados durante o dia.

A fase 2 (outubro/2017 a novembro/2017), depois de definidas as melhores condições baseado na fase 1, foram realizados quatro ensaios com 24h de duração sendo dois com taxas de 230/310  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (taxa para: FAP/FDA) e dois 255/340  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ , ambos com o FAP3, resultando em 4 ensaios ao final da pesquisa.

A Tabela 4.1 mostra os arranjos e quantidades de ensaios nas fases 1 e 2.

Tabela 4.1 – Características dos ensaios na fase 1 e fase 2.

Fase	Arranjo	Quant. de ensaios
Fase 1: ensaios com 8h de duração	FAP1 + 3 FDA	2 para cada taxa: 32
	FAP2 + 3 FDA	
	FAP3 + 3 FDA	
	FAP4 + 3 FDA	
Fase 2: ensaios com 24h de duração	FAP3 + 3 FDA	2 para cada taxa: 4

O coagulante utilizado foi o hidroxiclreto de alumínio, com dose média de 6 mg/L antes da mistura rápida mecanizada com gradiente de velocidade de 1000  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , a rotação do motor foi controlada por inversor de frequência em aproximadamente 430 rpm.

No início do ensaio, os FDA eram lavados com expansão da altura do meio filtrante em 25% por 8 minutos, assim como os FAP eram lavados também por 8 minutos e, durante a lavagem, preparavam-se as soluções de coagulante (HCA – dose de 6 mg/L) e de oxidante para a pré-oxidação (POX) (dicloro isocianurato de sódio – dose de 3 mg/L). A bomba de recalque de água bruta era ligada e ajustava-se a rotação da bomba ( $\text{CMB}_{\text{AB}}$ ) para a vazão nominal do ensaio. Assim que ligada a  $\text{CMB}_{\text{AB}}$ , ativava-se a bomba dosadora do oxidante ( $\text{BD}_{\text{POX}}$ ). A partir

daí, aguardava-se a água pré-oxidada encher as duas câmaras de pré-oxidação que possuíam cerca de 110 L de capacidade cada. Com as câmaras cheias, era ativada a bomba dosadora de coagulante ( $BD_{COAG}$ ) e ligado o motor da mistura rápida mecanizada.

No momento que a água coagulada preenchia o FAP era considerado o início da pré-filtração. A vazão instantânea afluenta do FAP era medida através de rotâmetro de seção variável, sendo controlada a cada hora. A água pré-filtrada fluía até uma tubulação feita em PVC DN 100mm que distribuía aos três FDA, cuja vazão era controlada por meio de um registro de esfera. A abertura e fechamento do registro de entrada de cada FDA era necessária na tentativa na distribuição equitativa na distribuição de vazão. Pelo fato da resposta da alteração no ângulo de abertura do registro demorar para ser observada no rotâmetro do efluente do FDA, as taxas de filtração dos FDA tornaram-se de difícil controle. A vazão efluente dos FDA era medida também por meio de rotômetros de seção variável e anotadas com frequência horária.

Os níveis dos piezômetros do FAP ( $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  e  $P_4$ ) e dos FDA ( $P_0$ ,  $P_1$  e  $P_2$ ), eram verificados a cada hora e anotados para posteriores cálculos das perdas de carga no meio filtrante devido à retenção de impurezas.

As coletas de água filtrada foram efetuadas a cada hora e eram feitas através de torneiras na saída de cada filtro. As amostras eram identificadas e levadas ao laboratório para análises de turbidez, cor aparente, pH e temperatura. Ao final do ensaio, as amostras refrigeradas eram conduzidas ao laboratório de saneamento ambiental do IFRN, onde eram realizadas as análises de cor vendedeira, clorofila a, MON e ABS254.

O encerramento da carreira de filtração e lavagem do FDA era definido pela ocorrência de perda de carga superior ao limite estabelecido pelo sistema.

As descargas de fundo intermediárias (DFI) do FAP eram realizadas assim que a turbidez remanescente do FAP se elevava 50% quando comparada a turbidez da coleta anterior.

A Tabela 4.2 relaciona as vazões ensaiadas e as taxas de filtração aplicadas no FAP e FDA e também os tempos de contato da pré-oxidação com cloro.

Tabela 4.2 – Vazões afluentes na IPDF correspondentes para cada taxa de filtração dos FAP e FDA e tempos de contato na pré-oxidação.

Taxa de filtração (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia) - FAP	Taxa de filtração (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia) - FDA	Vazão na IPDF (L/h)	Tempo de contato (POX) (min)	TMR (s)
190	250	249	26	30
210	280	275	24	27
230	310	301	22	24
255	340	333	20	22

LEGENDA: TMR: tempo de mistura rápida.

A Tabela 4.3 apresenta resumo das características gerais da água bruta dos ensaios com 8h de duração: máximo e mínimo observados, média aritmética e desvio padrão da turbidez, cor aparente, temperatura, pH, cor verdadeira, absorvância 254nm, matéria orgânica natural, alcalinidade, clorofila a e sólidos totais.

Tabela 4.3 – Características gerais da água bruta dos ensaios da fase 1 com carreira de filtração de 8h (N= 64).

Parâmetro	Máx.	Mín.	Méd.	DP
Turbidez (uT)	8,3	1,7	3,9	1,2
Cor aparente (uH)	42	20	30	5
Temperatura (°C)	32,9	23,8	27,7	1,4
pH	8,3	7,3	7,8	0,2
Cor verdadeira (uH)	26	7	14	6
ABS <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	0,21	0,02	0,16	0,03
MON (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> );	8,3	3,6	6,1	1,1
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup> )	55,2	32,2	44,8	4,5
Clorofila a	0,01	0	0	0
Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	0,4	0,1	0,16	0,0729

Legenda: Máx.: valor máximo observado; Mín.: valor mínimo observado; Méd.: média aritmética dos valores observados, DP: desvio padrão dos valores observados.

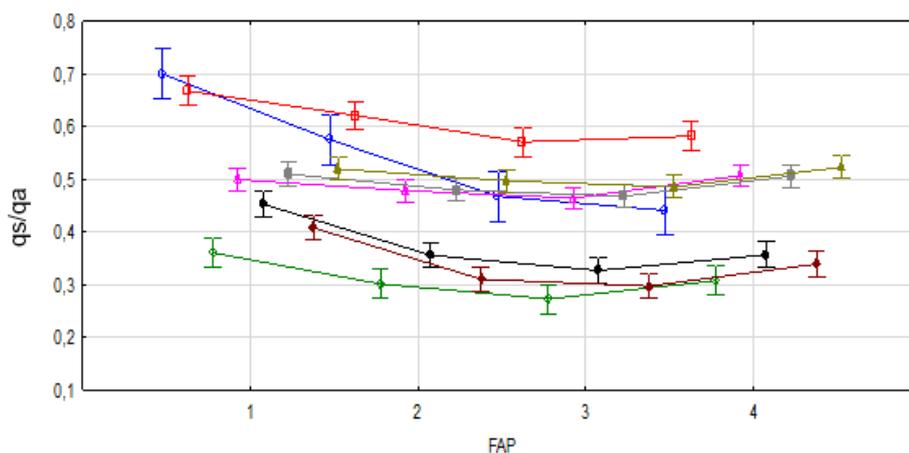
Percebe-se, analisando a Tabela 4.3, que os valores das variáveis analisadas condizem com os valores da Tabela 3.1, porém os valores médios de cor aparente e turbidez foram mais elevados, 2,37 uT e 24 uH nos ensaios de tratabilidade 3,9 uT e 30 uH no experimento. Analisando a série de dados da qualidade da água bruta, é possível ver que ao longo dos meses de ensaio os valores de cor aparente e turbidez são crescentes, o que reflete nos resultados iniciais com relação a qualidade da água tratada, decaindo ao longo dos demais ensaios, visto que foram mantidas as mesmas condições operacionais e dose dos produtos químicos.

Na fase 2 (outubro/2017 a novembro/2017) iniciada após a conclusão dos 32 ensaios com duração de 8h, os resultados obtidos foram analisados a fim de definir qual arranjo de FAP-FDA apresentava melhor eficiência no tratamento da água bruta. Com o auxílio de programas computacional (*Statsoft STATISTICA®* e do *Microsoft Excel®*) e utilizando o procedimento da análise de variância (ANOVA) e teste T de Tukey, definiu-se que o FAP3 apresentava melhores resultados em relação aos demais FAP e que a taxa de filtração estudada não apresentava influência significativa na redução dos valores dos parâmetros estudados. A Figura 4.6 mostra o resultado dessas análises.

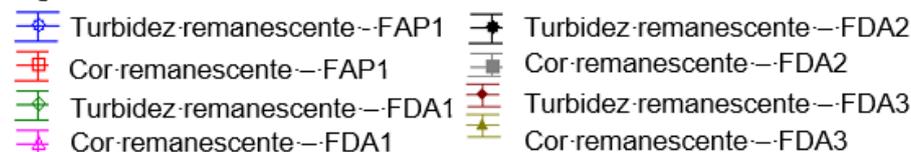
No gráfico de análise de variância, as barras verticais indicam os intervalos mínimos e máximos com nível de significância de 5%. A hipótese nula ( $H_0$ ) é de que não existe diferença entre as médias de desempenho com o nível de significância considerado. Como regra prática visual, há equivalência estatística entre a mesma curva quando o limite superior ou inferior de um dado cruza horizontalmente com o dado anterior ou posterior dessa curva, confirmando a hipótese  $H_0$ .

A Figura 4.6 mostra o gráfico da análise de variância que compara o FAP com a fração qualidade do efluente pela qualidade do afluente para turbidez e cor verdadeira ( $p=0,0000$ ). Quanto menor o valor dessa fração, mais eficiente foi o processo. Percebe-se que as médias para remoção de turbidez e cor verdadeira dos FAP3 e FAP4 são próximas, e para o FAP3 as médias de remoção dos conjuntos FAP3/FDA são menores quando comparadas com os outros arranjos de FAP/FDA. Diante disso, foi escolhido o FAP3 para estudo mais aprofundado na fase 2 desse trabalho que consistiu em realização de quatro ensaios (dois ensaios para cada taxa de filtração) com duração de 24h com a operação do FAP3 e taxas de filtração de 230-310 e 255-340  $m^3.m^{-2}.dia^{-1}$  (FAP-FDA), para coleta de dados durante toda a carreira do FDA3, o qual não atingiu a carga máxima em nenhum ensaio de 8h e analisar o comportamento dos demais filtros em uma operação mais prolongada.

A Tabela 4.4 apresenta resumo das características gerais dos ensaios com 24h de duração, os valores das colunas são máximos e mínimo observados, média aritmética está entre parênteses e após a barra (/) o valor do desvio padrão.



Legenda:



qs/qa: Qualidade do efluente/qualidade do afluente.

Figura 4.6 – Influência da granulometria do FAP na remoção de turbidez e cor aparente dos FDA.

Tabela 4.4 – Características da água bruta nos ensaios da fase 2 com carreira de filtração de 24h.

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Tur	17 - 10,2 (12,4/1,9)	16 - 12 (14/1,5)	15 - 11 (12/1,1)	90 - 11 (21/21,9)
CA	42 - 33 (37/2,8)	49 - 39 (43/2,8)	48 - 33 (42/3,6)	105 - 34 (44/19,4)
Temp.	29,5 - 25,9 (27,2/1,2)	27,7 - 25,1 (26,5/0,8)	28,4 - 24,3 (26,6/1,3)	29 - 25 (26,5/1)
pH	8,6 - 8 (8,3/0,2)	8,4 - 7,8 (8,2/0,2)	8,4 - 7,2 (8,2/0,3)	8,4 - 8,1 (8,3/0,1)
CV	22 - 12 (15/2,9)	12 - 10 (11/0,5)	14 - 6 (11/2)	14 - 8 (11/1,3)
ABS <sub>254</sub>	0,187 - 0,169 (0,178/0,006)	0,175 - 0,163 (0,168/0,004)	0,178 - 0,163 (0,169/0,004)	0,162 - 0,14 (0,157/0,006)
MON	8,97 - 6,38 (7,59/0,97)	8,95 - 7,09 (7,71/0,49)	6,91 - 46 (6,91/0)	8,49 - 6,32 (7,44/0,63)
Alc	48,3 - 46 (47/1,2)	48,3 - 36,8 (45,8/2,9)	48,3 - 46 (46,2/0,6)	52,9 - 46 (49,2/1,8)
Cl a	0,28 - 0,04 (0,19/0,1)	0,21 - 0,03 (0,13/0,04)	0,25 - 0,12 (0,18/0,04)	0,48 - 0,09 (0,19/0,11)
ST	0,0191 - 0,0052 (0,0138/0,0043)	0,0218 - 0,0112 (0,017/0,0025)	0,0507 - 0,0091 (0,0192/0,0108)	0,0534 - 0,0155 (0,0251/0,0099)

LEGENDA/UNIDADES: Tur – turbidez (uNT); Alc – alcalinidade total (mg CaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>); T – temperatura (°C); CA – cor aparente (uH); CV – cor verdadeira (uH); ABS<sub>254</sub> – absorvância em 254 nm (cm<sup>-1</sup>); MON – matéria orgânica natural (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Cl a – clorofila a (µg.L<sup>-1</sup>); ST – sólidos totais (mg.L<sup>-1</sup>).

Analisando os dados das Tabelas 3.1, 4.3 e 4.4, percebe-se alteração na qualidade da água bruta desde os ensaios de tratabilidade realizados no ano de 2016 por Freitas (2017). Pela escassez de tempo para realização de outro estudo de tratabilidade e como o zetâmetro disponível estava em manutenção, optou-se pelo aumento da dose de coagulante e manutenção da dose do oxidante, visto que nos ensaios que a qualidade da água bruta era diferente dos estudos de Freitas (2017), não era possível o tratamento para obtenção de valores recomendados na PRC nº 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX. Mais detalhes sobre a variação temporal da qualidade da água bruta da ETA Extremoz podem ser encontrados no trabalho de Brito (2018).

Tomando como base a dose de coagulante aplicada na ETA Extremoz, decidiu-se que a nova dose de coagulante para os ensaios com duração de 24h seria de 8 mg/L. Ensaio de Jar Test realizado depois dos ensaios com duração de 24h indicaram a dosagem ótima de HCA de 10 mg/L. Apesar do controle na concentração da solução, devido à flutuação da vazão de recalque da bomba dosadora de coagulante -  $BD_{COAG}$  e da bomba dosadora de oxidante -  $BD_{POX}$ , as doses médias dos quatro ensaios foram de 7,14 e 2,32 mg/L, de coagulante e de oxidante, respectivamente, inferiores ao planejado, fato que contribuiu para os resultados desse trabalho.

Fator importante para os resultados é que não foi possível controle operacional fino das vazões afluentes nos filtros de areia, ou seja, houve imprecisão na taxa teórica de planejamento e a taxa real de cada ensaio, como analisado na Tabela 4.5. Casos de destaque são a taxa média do FDA3 (ensaio 4) que operou com taxa cerca de 14% superior à nominal ( $340 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ) para esse ensaio, e o FDA1 operou com taxa cerca de 7% menor que a nominal para o ensaio 2 ( $310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

Outra dificuldade operacional se deu pela pequena diferença de altura do topo do leito expandido durante a operação de lavagem e a calha de coleta de água de lavagem, o que ocasionou por algumas vezes a perda de material filtrante, principalmente os grãos mais finos, o que pode ter alterado a composição granulométrica dos FDA e conseqüentemente a qualidade do efluente dos filtros. A Tabela 4.6 mostra as composições granulométricas dos filtros no início dos ensaios da fase 1 e ao final dos ensaios da fase 2.

Tabela 4.5 – Taxas médias de filtração nos ensaios da fase 2, com carreira de filtração de 24h.

Taxas médias de filtração ( $m^3.m^{-2}.dia^{-1}$ )				
	E1	E2	E3	E4
FAP3	236 (2,5%)	233 (1,1%)	262 (2,73%)	271 (6,2%)
FDA1	304 (-1,8%)	286 (-7,6%)	326 (-4%)	337 (-0,8%)
FDA2	343 (10,4%)	341 (10,1%)	374 (9,89%)	360 (6,0%)
FDA3	297 (-4,3%)	303 (-2,3%)	356 (4,58%)	386 (14%)

Tabela 4.6 – Características do meio filtrante dos filtros de areia no início dos ensaios e ao final dos ensaios da fase 2.

Filtro	Características fase 1	Características fase 2	Diferença (%)
FDA1	D <sub>10</sub> =0,50 mm	D <sub>10</sub> =0,60 mm	17
	D <sub>60</sub> =0,81 mm	D <sub>60</sub> =0,90 mm	10
	CD=1,62	CD=1,50	-7
FDA2	D <sub>10</sub> =0,57 mm	D <sub>10</sub> =0,65 mm	12
	D <sub>60</sub> =1,05 mm	D <sub>60</sub> =1,01 mm	-4
	CD=1,84	CD=1,55	-16
FDA3	D <sub>10</sub> =0,87 mm	D <sub>10</sub> =0,92 mm	5
	D <sub>60</sub> =1,45 mm	D <sub>60</sub> =1,42 mm	-2
	CD=1,67	CD=1,54	-8

LEGENDA: D<sub>10</sub>: diâmetro efetivo; D<sub>60</sub>: diâmetro tal que 60% do solo, em massa, têm diâmetros inferiores (mm); CD: coeficiente de desuniformidade.

Fonte: Autoria própria.

Pela análise da Tabela 4.6, percebe-se que os grãos mais finos foram perdidos principalmente no FDA1 e FDA2. A reposição do material filtrante perdido era feita com a areia da mesma fonte, porém com as faixas granulométricas misturadas que efetivamente não repôs exatamente a faixa granulométrica de material que havia sido perdido, alterando a composição granulométrica de cada filtro.

### 4.3 Desempenho dos pré-filtros e sistema de dupla filtração e características dos efluentes

A Tabela 4.7 resume os resultados dos ensaios da fase 2 para todas as unidades de filtração para os valores remanescentes de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, ABS<sub>254</sub> e MON. A turbidez e cor aparente remanescentes dos pré-filtros estiveram quase sempre acima de 2,00 uT e 15 uH superiores aos valores máximos estabelecidos na PRC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX.

A Tabela 4.8 resume os desempenhos das unidades de filtração quanto à remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, ABS<sub>254</sub> e MON. As eficiências para o pré-filtro variaram de 13% até 63%.

Tabela 4.7 - Valores médios remanescentes nos efluentes do pré-filtro (FAP) e filtros descendentes de areia (FDA) para taxas de filtração de 230/310 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> (E1 e E2) e 255/340 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> (E3 e E4).

Ensaio	Filtro	Tur	DP	CA	DP	CV	DP	ABS <sub>254</sub>	DP	MON	DP
1	FAP3	4,81	0,99	16	2,18	7	0,44	0,12	0,0037	6,26	0,38
	FDA1	3,71	0,78	11	1,40	8	1,30	0,12	0,0047	5,88	0,56
	FDA2	3,87	1,05	12	1,87	8	0,95	0,13	0,0047	5,88	0,43
	FDA3	3,90	1,27	12	2,26	8	1,41	0,13	0,0058	5,88	0,37
2	FAP3	4,84	0,99	24	2,72	5	1,83	0,11	0,0117	6,05	0,42
	FDA1	2,15	0,69	18	1,46	7	2,44	0,12	0,0104	5,95	0,51
	FDA2	2,61	0,76	19	2,23	6	0,99	0,11	0,0085	6,30	0,56
	FDA3	3,35	1,89	19	1,59	6	0,00	0,12	0,0097	5,91	0,29
3	FAP3	5,98	0,75	28	3,51	8	2,34	0,13	0,0057	6,01	0,51
	FDA1	4,34	0,64	22	2,75	7	2,14	0,13	0,0111	5,71	0,75
	FDA2	4,25	0,67	22	2,32	6	1,37	0,13	0,0128	6,04	0,63
	FDA3	4,82	0,83	22	2,69	8	0,00	0,13	0,0056	5,87	0,76
4	FAP3	6,66	1,19	23	1,96	7	1,32	0,12	0,0044	6,25	0,44
	FDA1	5,51	1,76	18	3,80	7	1,78	0,12	0,0066	5,92	0,66
	FDA2	5,34	2,02	19	2,35	6	1,22	0,12	0,0042	6,17	0,38
	FDA3	5,93	2,52	19	3,11	6	0,00	0,12	0,0023	6,32	0,44

LEGENDA/UNIDADES: Tur – turbidez (uNT); CA – cor aparente (uH); CV – cor verdadeira (uH); ABS<sub>254</sub> – absorvância em 254 nm (cm<sup>-1</sup>); MON – matéria orgânica natural (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); DP – desvio padrão.

Tabela 4.8 – Desempenho do pré-filtro (FAP) e filtros descendentes de areia (FDA) para taxas de filtração de 230/310 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> (E1 e E2) e 255/340 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> (E3 e E4).

Variável	Remoção média (%)							
	E1				E2			
	FAP3	FDA1	FDA2	FDA3	FAP3	FDA1	FDA2	FDA3
Tur	61	22	20	20	63	55	46	30
CA	55	30	28	30	45	26	22	20
CV	49	-6	-1	-13	52	-32	-31	-21
ABS <sub>254</sub>	32	-3	-3	-5	33	-3	1	-2
MON	16	6	6	6	21	1	-4	2
Variável	E3				E4			
	FAP3	FDA1	FDA2	FDA3	FAP3	FDA1	FDA2	FDA3
Tur	50	27	29	20	56	18	22	13
CA	34	21	22	19	42	22	19	17
CV	22	13	15	1	36	-11	7	9
ABS <sub>254</sub>	23	-2	8	2	23	-1	0	0
MON	13	5	-1	2	15	5	1	-1

LEGENDA/UNIDADES: Tur – turbidez (uNT); CA – cor aparente (uH); CV – cor verdadeira (uH); ABS<sub>254</sub> – absorvância em 254 nm (cm<sup>-1</sup>); MON – matéria orgânica natural (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); DP – desvio padrão.

As Figuras 4.6, são resultados gráficos elaborados por análise de variância (ANOVA) para avaliar a possível influência da taxa de filtração na eficiência de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, ABS<sub>254</sub> e MON para cada unidade de filtração estudada.

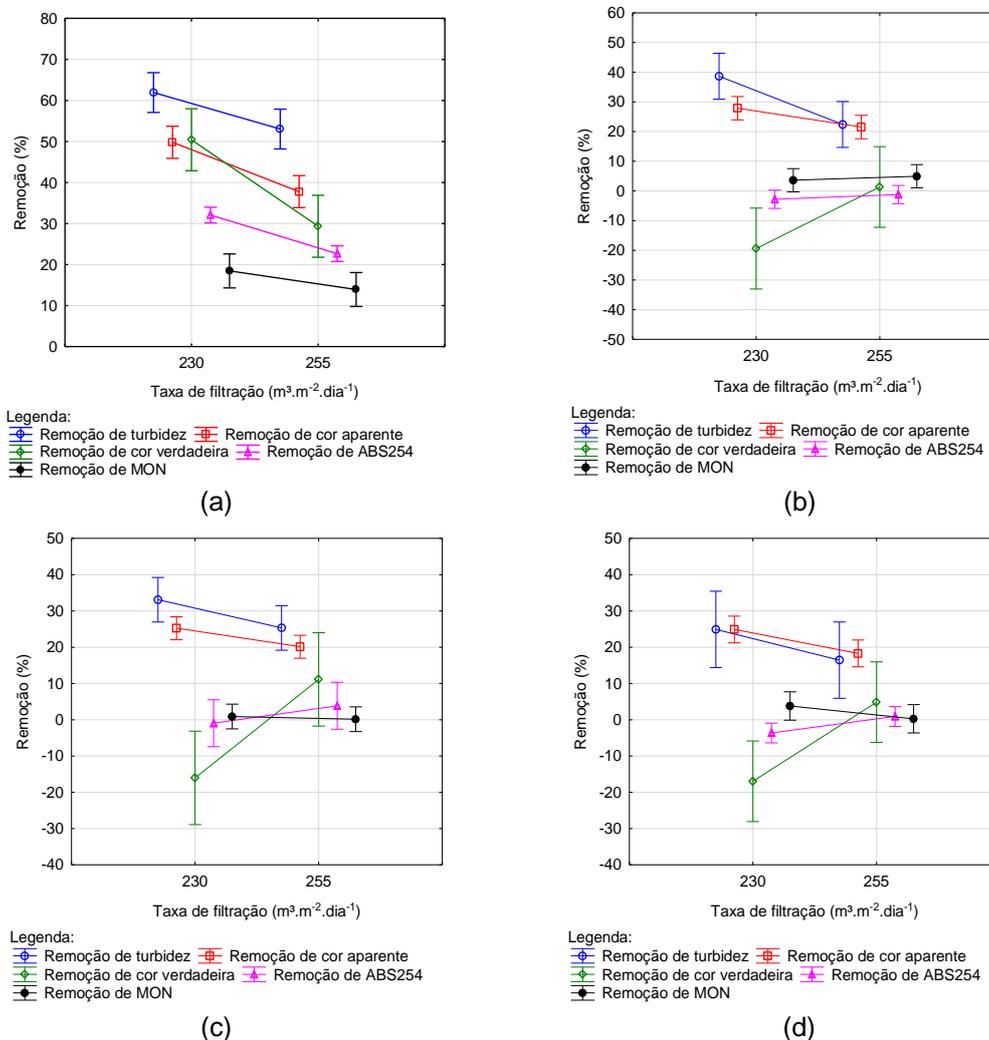


Figura 4.7 – Influência da taxa de filtração e granulometria na remoção da turbidez, cor aparente, ABS<sub>254</sub> e MON: (a) FAP3 (b) FDA1 (c) FDA2; (d) FDA3.

A taxa de filtração afetou o desempenho de FAP3 que consistentemente mostrou diminuição nas remoções, com o crescimento da velocidade de aproximação. Com taxa de filtração de 230 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> (E1 e E2) as remoções médias de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, ABS<sub>254</sub> e MON resultaram em médias de 62%, 50%, 50%, 32% e 19%, respectivamente, e operando na taxa de 255 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> (E3 e E4) o rendimento do FAP3 diminuiu para 53%, 38%, 29%, 23% e 14%, respectivamente.

As Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 são resultados gráficos do tipo diagrama de caixa e mostram as eficiências de remoção média da turbidez, cor aparente, cor verdadeira, ABS<sub>254</sub> e MON para cada unidade de filtração e taxa de filtração estudada.

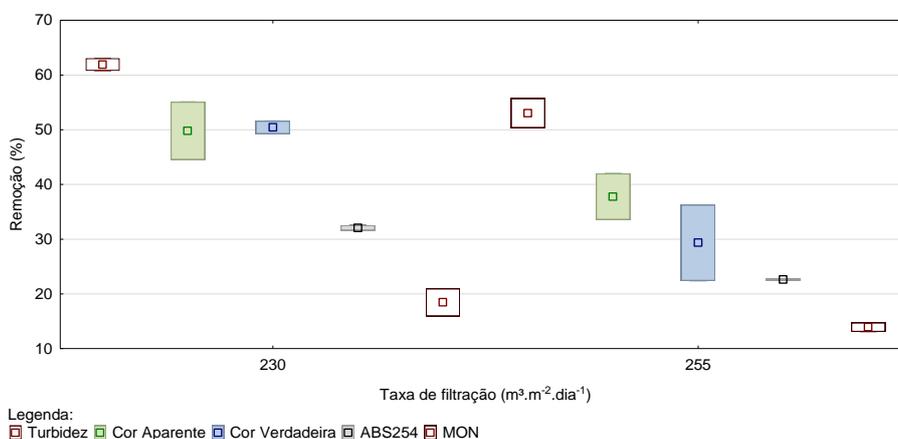


Figura 4.8 – Resultados da remoção da turbidez, cor aparente, ABS<sub>254</sub> e MON pelo FAP3.

Analisando a Figura 4.7 (a), pode-se perceber que de um modo geral o aumento da taxa de filtração no FAP alterou significativamente ( $p=0,000000$ ) a remoção de cor aparente, cor verdadeira e ABS<sub>254</sub>. As remoções de turbidez e MON não foram afetadas pela variação da taxa de filtração.

A taxa de filtração afetou o desempenho de FDA1 que consistentemente mostrou diminuição nas remoções, com elevação dela. Com taxa de filtração de 310 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> (E1 e E2) as remoções de turbidez, cor aparente e MON atingiram 39%, 28% e 4% e operando na taxa de 340 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> (E3 e E4) o rendimento do FDA1 diminuiu para 22% para turbidez e cor aparente e praticamente não variou a remoção de MON. Os resultados para o desempenho com relação à cor verdadeira e ABS<sub>254</sub> foram valores negativos, o que indica que o FDA1 aumentou os valores de cor verdadeira e absorvância 254nm.

Analisando a Figura 4.7 (b), pode-se perceber que o aumento da taxa diminuiu significativamente ( $p=0,00885$ ) a remoção de turbidez. As remoções de MON, cor aparente, cor verdadeira e ABS<sub>254</sub> não foram afetadas pela variação da taxa de filtração.

De modo semelhante ao FDA1, a taxa de filtração afetou o desempenho de FDA2 que consistentemente mostrou diminuição nas remoções, com o

crescimento dela. Com taxa de filtração de  $310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E1 e E2) as remoções de turbidez, cor aparente e MON atingiram 33%, 25% e 1% e operando na taxa de  $340 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E3 e E4) o rendimento do FDA2 diminuiu para 25% e 20% e manteve-se quase nulo para MON.

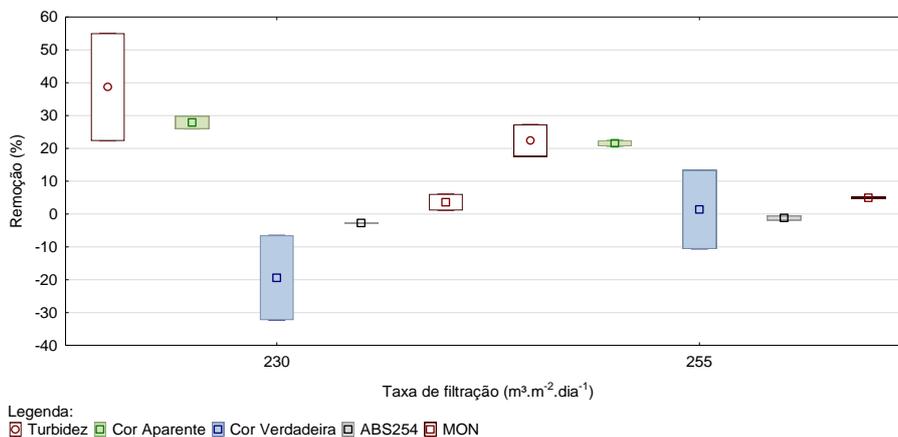


Figura 4.9 – Resultados da remoção da turbidez, cor aparente,  $\text{ABS}_{254}$  e MON pelo FDA1.

Os resultados para o desempenho com relação à cor verdadeira e  $\text{ABS}_{254}$  foram valores negativos, o que indica que o FDA2 aumentou os valores de cor verdadeira e absorvância 254nm nos ensaios de menor taxa e removeu 11,1% e 3,9% para os ensaios de maior taxa.

Analisando a Figura 4.7 (c), pode-se perceber que o aumento da taxa de filtração não alterou significativamente ( $p=0,02316$ ) a remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e  $\text{ABS}_{254}$  e MON.

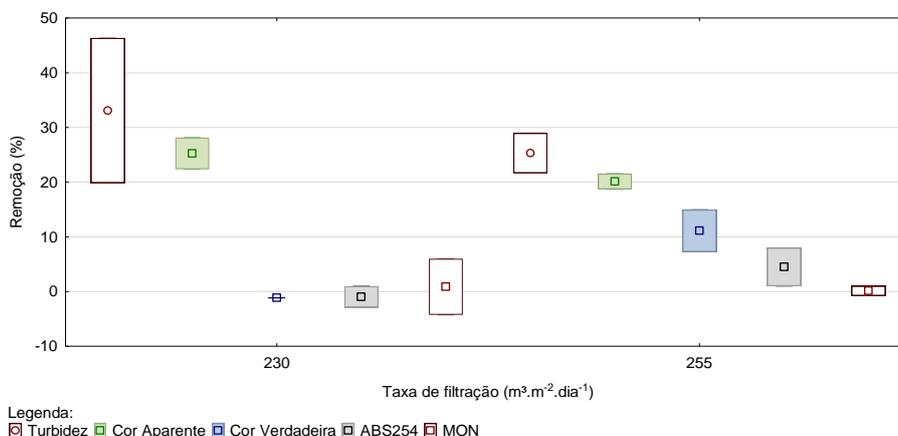


Figura 4.10 – Resultados da remoção da turbidez, cor aparente,  $\text{ABS}_{254}$  e MON pelo FDA2.

A taxa de filtração afetou o desempenho de FDA3 que consistentemente mostrou diminuição nas remoções, com crescimento dela. Com taxa de filtração de  $310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E1 e E2) as remoções de turbidez, cor aparente e MON atingiram 25%, 25% e 4% e operando na taxa de  $340 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E3 e E4) o rendimento do FDA3 diminuiu para 17%, 18% e 0%, respectivamente.

Os resultados para o desempenho com relação à cor verdadeira e  $\text{ABS}_{254}$  foram valores negativos, o que indica que o FDA3 aumentou os valores de cor verdadeira e absorbância  $254\text{nm}$  nos ensaios de menor taxa e removeu 5% e 1% para os ensaios de maior taxa.

Analisando a Figura 4.7 (d), pode-se perceber que o aumento da taxa de filtração não alterou significativamente ( $p=0,00319$ ) a remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e  $\text{ABS}_{254}$  e MON.

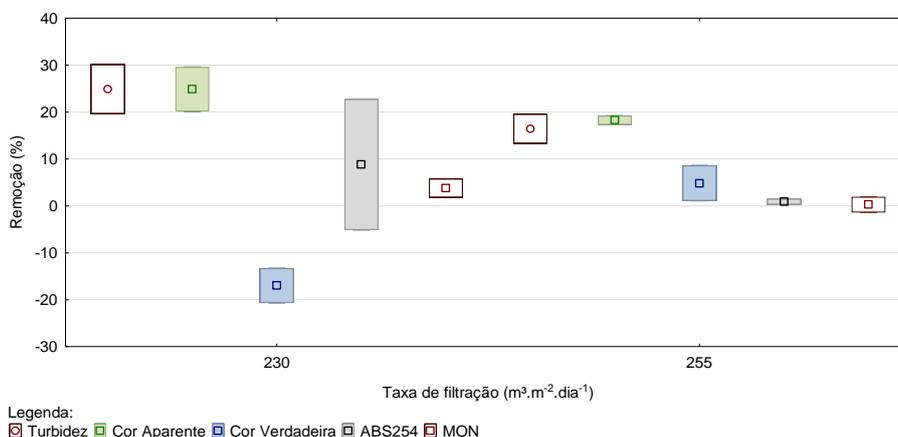


Figura 4.11 – Resultados da remoção da turbidez, cor aparente,  $\text{ABS}_{254}$  e MON pelo FDA3.

De acordo com o resultado das ANOVA, não há diferença significativa ( $p=0,0000$  para as duas taxas de filtração) dos filtros de areia em relação a remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e  $\text{ABS}_{254}$  e MON. Mas entre o FAP e os FDA existe diferença significativa. Ou seja, para as taxas de filtração estudadas a granulometria dos FDA não gera efluentes com qualidades estatisticamente distintas entre si. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram os resultados em forma gráfica da análise de variância a qual avalia a influência da granulometria no desempenho do FAP e FDA.

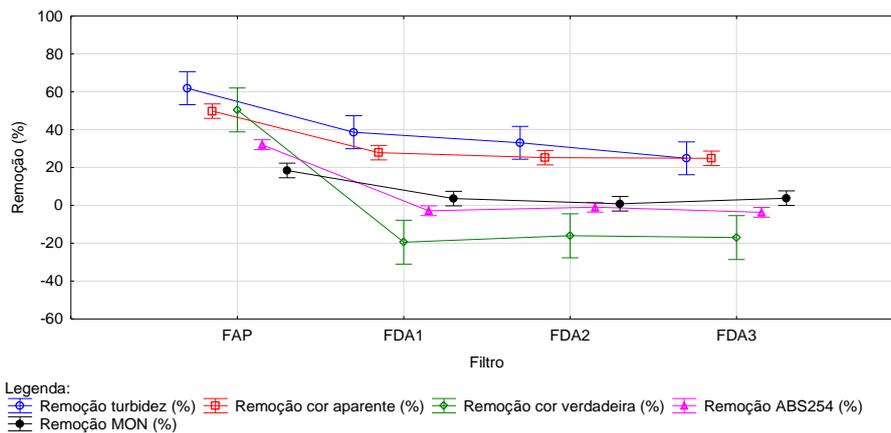


Figura 4.12 – Influência da granulometria na remoção da turbidez, cor aparente, ABS<sub>254</sub> e MON pelo FDA3 para taxa de filtração 230/310 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>.

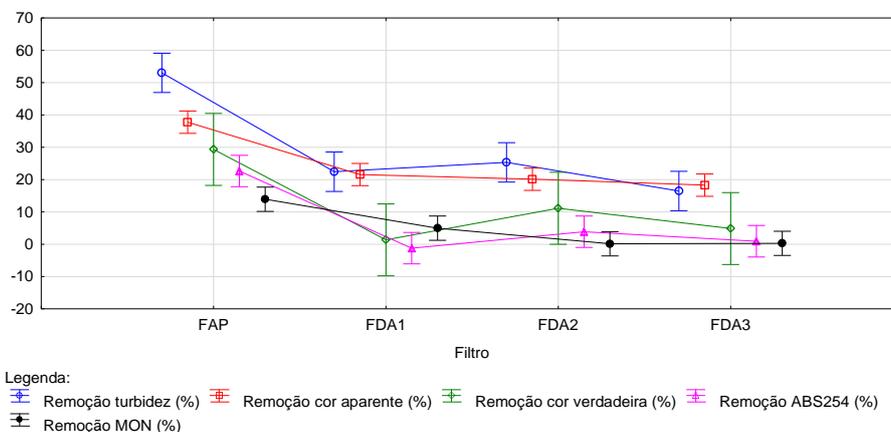


Figura 4.13 – Influência da granulometria na remoção da turbidez, cor aparente, ABS<sub>254</sub> e MON pelo FDA3 para taxa de filtração 255/340 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>.

As Figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21 ilustram em forma de gráfico os dados da Tabela 4.7. Nelas são apresentados resultados dos 4 ensaios em termos de turbidez e cor aparente da água pré-filtrada, filtrada e da água bruta.

No E2, na sexta hora de ensaio, notou-se um aumento abrupto na turbidez remanescente do FDA3, provavelmente resultante de sobrecarga hidráulica momentos antes da coleta do efluente do FDA 3 a qual foi corrigida e não afetou resultados posteriores.

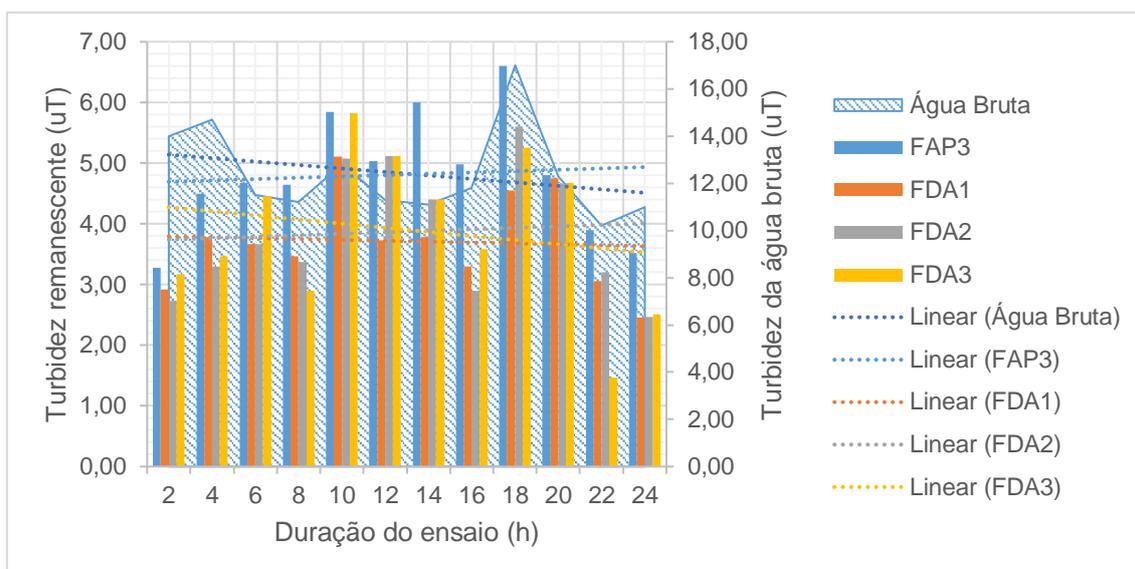


Figura 4.14 – Turbidez remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de  $230/310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E1).

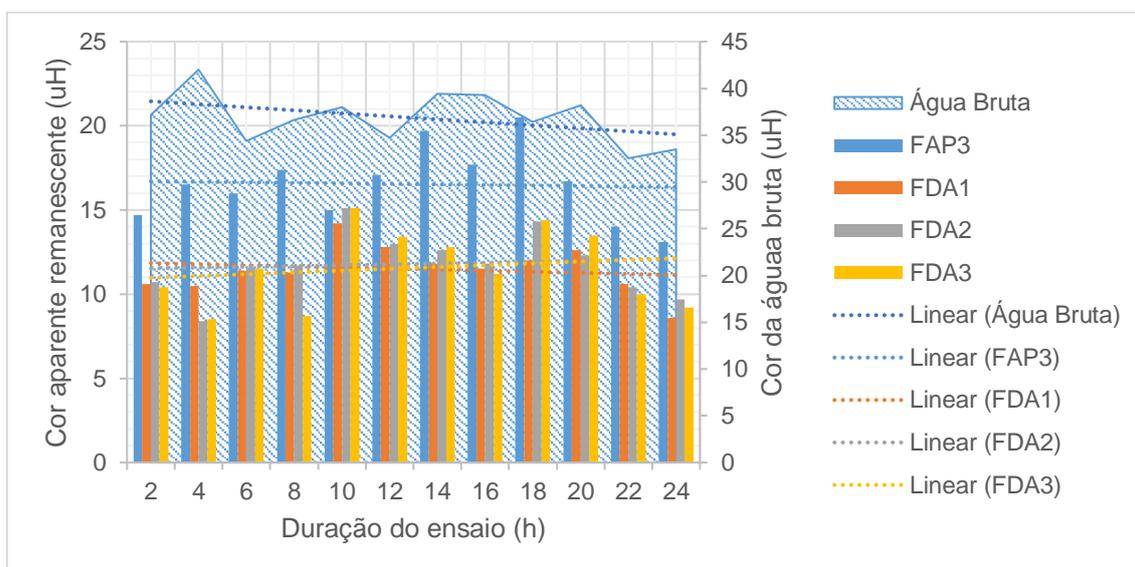


Figura 4.15 – Cor aparente remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de  $230/310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E1).

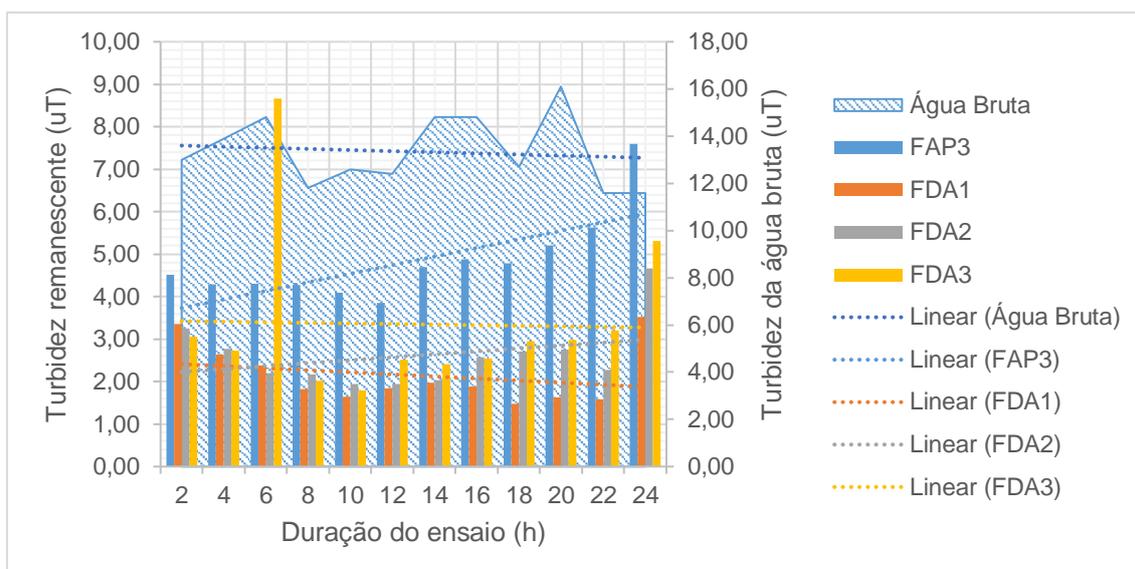


Figura 4.16 – Turbidez remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de  $230/310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E2).

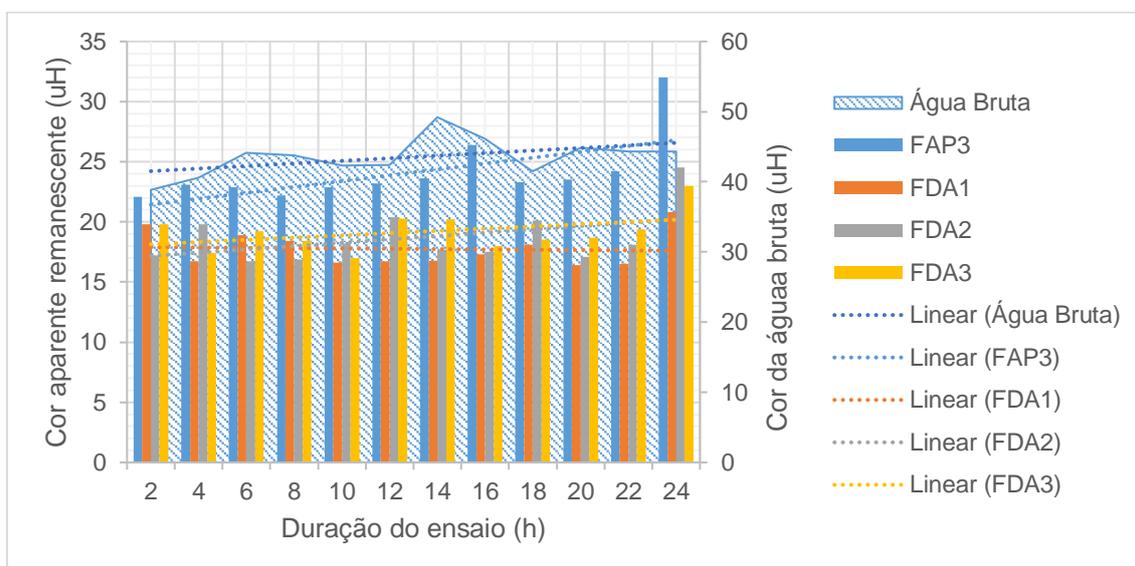


Figura 4.17 – Cor aparente remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de  $230/310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E2).

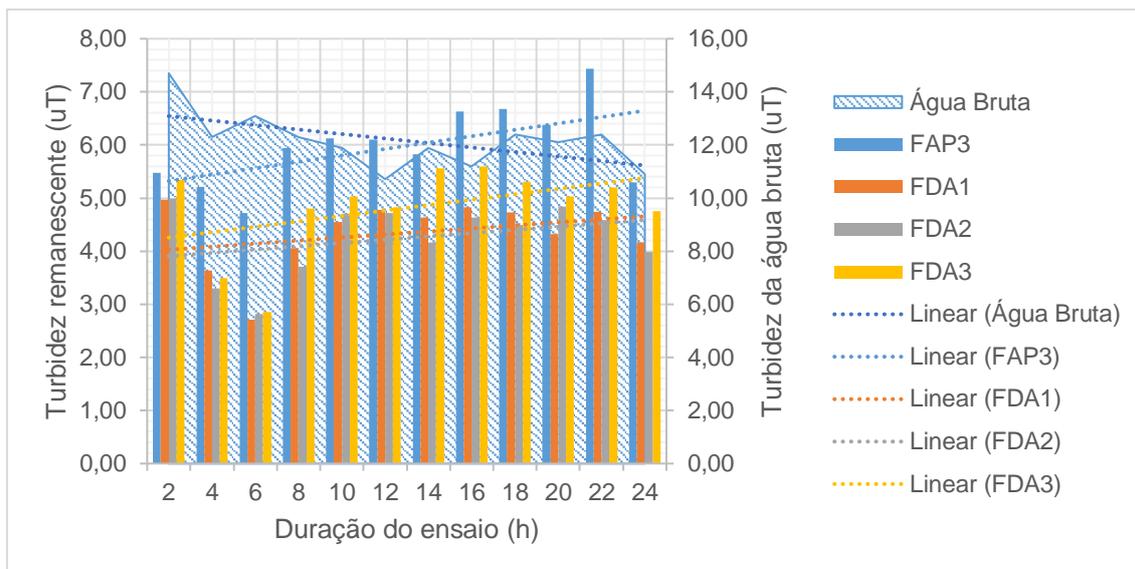


Figura 4.18 – Turbidez remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de  $255/340 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E3).

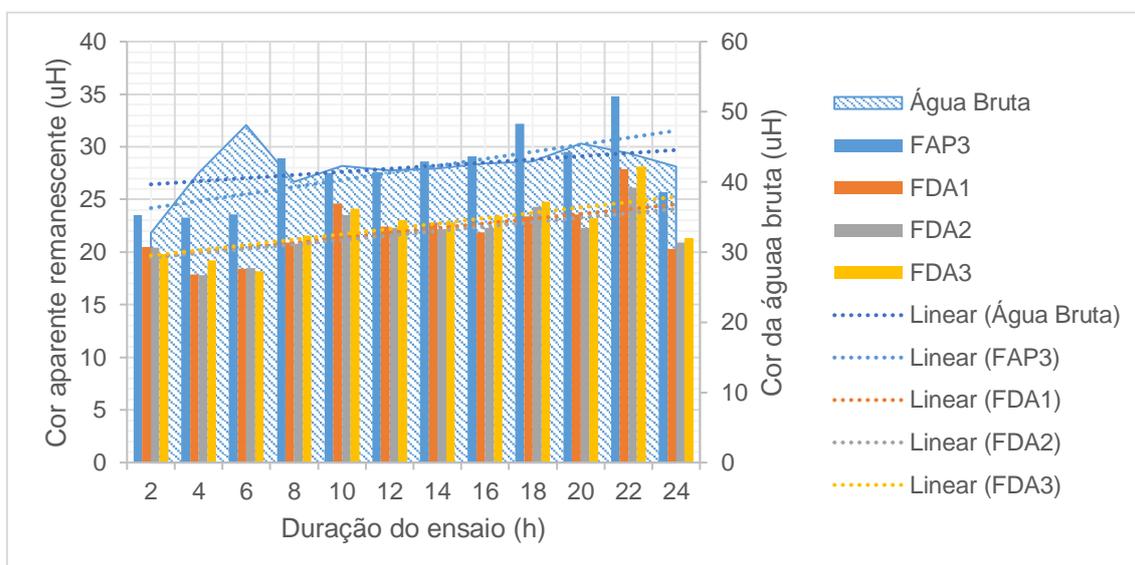


Figura 4.19 – Cor aparente remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de  $255/340 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E3).

No E4, nas duas primeiras horas iniciais, a água bruta apresentou um comportamento anômalo com turbidez  $>85 \text{ uT}$  e cor aparente  $>100 \text{ uH}$ . Isso deveu-se à formação de algas na câmara de sucção do conjunto moto-bomba que recalca água pré-oxidada até a câmara de mistura rápida. O início da formação de algas na Lagoa de Extremoz durante os ensaios influenciou negativamente os resultados.

É interessante observar a importância do FAP para absorver as alterações da qualidade da água bruta. Mesmo com a mudança significativa na qualidade

da AB, a turbidez e a cor aparente remanescentes resultaram na mesma ordem de grandeza dos demais ensaios.

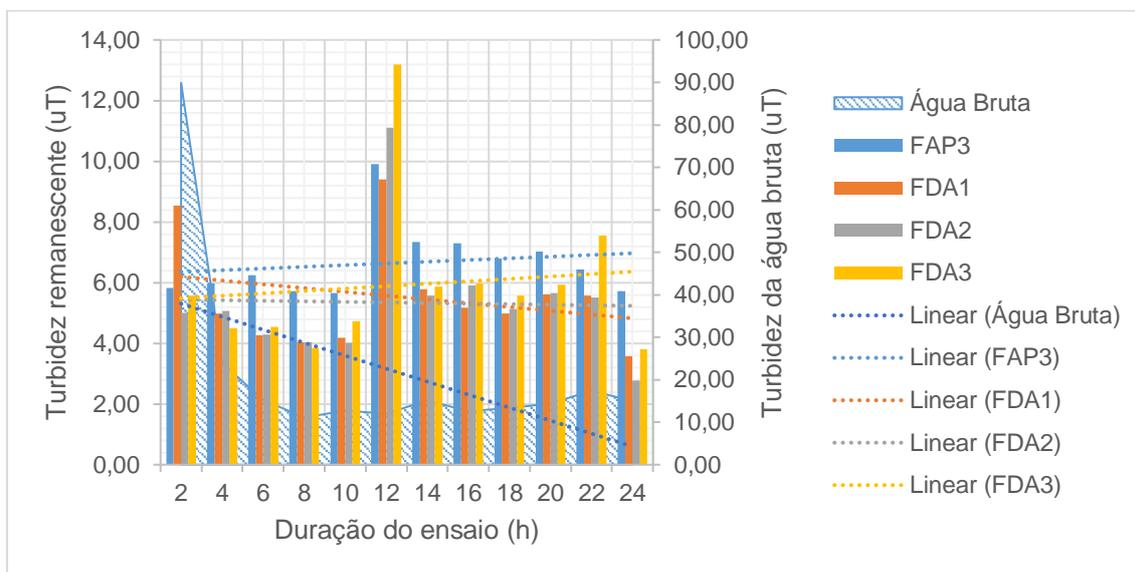


Figura 4.20 – Turbidez remanescente das unidades filtrantes com taxas de filtração de  $255/340 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E4).

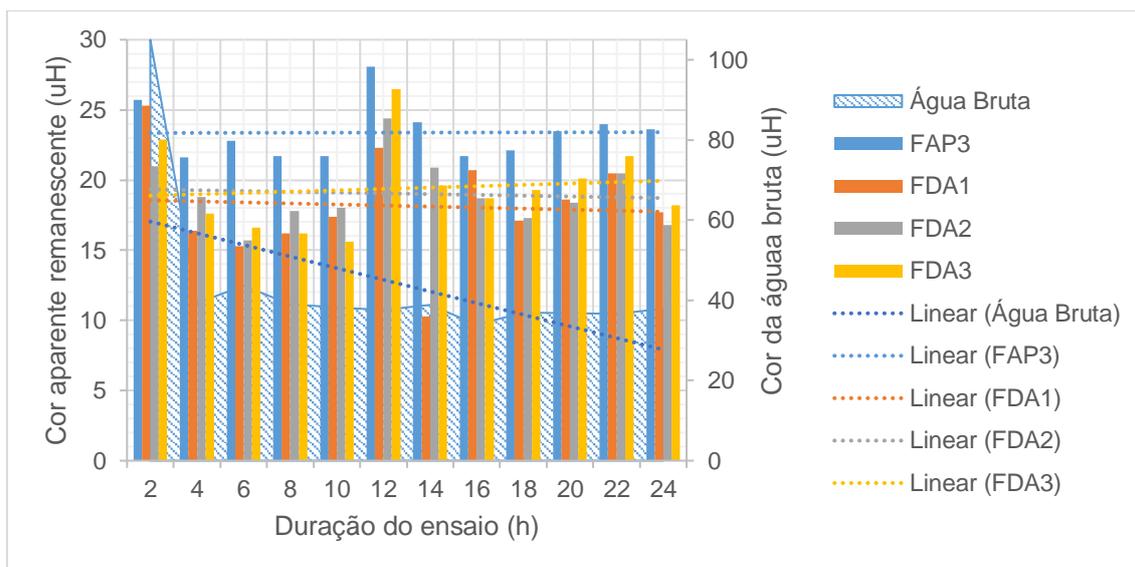


Figura 4.21 – Cor aparente remanescentes das unidades filtrantes com taxas de filtração de  $255/340 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E4).

#### 4.4 Perdas de carga laminares e turbulentas nos pré-filtros e filtros descendentes de areia

No fundo falso de FAP3 as perdas iniciais foram equivalentes e iguais a 14 cm e 22 cm, respectivamente para cada ensaio, e durante a carreira de filtração resultou em valores que representam percentual médio de 58% e 65%, respectivamente para cada ensaio, do somatório de perdas nas quatro camadas suportes e filtrante. As taxas de crescimento da perda de carga do FF médio

foram de 6,6 cm.h<sup>-1</sup> e 7,7 cm.h<sup>-1</sup>, respectivamente para cada ensaio, considerados baixos, resultantes das DFI executadas durante a carreira.

No FAP3 as perdas de carga finais máximas foram de 47 cm e 62,5 cm, representando taxas médias de crescimento de 2,8 cm.h<sup>-1</sup> e 2,0 cm.h<sup>-1</sup>, respectivamente, o que representa uma margem de operação do pré-filtro de 4,8 dias para igualar com a carga hidráulica disponível de 232 cm, arbitrando uma função linear.

As perdas de carga médias no E1 e E2 (310 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>) no meio filtrante limpo nos filtros FDA1, FDA2 e FDA3 foram  $H_{MFL} = 50, 41$  e 29 cm, respectivamente. As  $H_{MFL}$  medidas não estão de acordo com a previsão do modelo matemático de Fair *et al.* (1968) e apresentam valores que variam entre 14 e 81% a mais do calculado. Como mostrado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Perdas de carga no meio filtrante limpo nos filtros de areia ( $C_e = 0,81$  e  $\varepsilon = 0,4$ ).

Filtro	$H_{MFL}$ (cm)	$H_{MFL}$ teórico (cm)	Diferença (%)
FDA1	50	43	16
FDA2	41	36	14
FDA3	29	16	81

No E1 (230/310 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>) o FDA1 foi o que teve maior aumento de perda de carga (13,7 cm.h<sup>-1</sup>), finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 216 cm. O FDA2 foi o que teve taxa de aumento igual ao FDA1 (12,5 cm.h<sup>-1</sup>), finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 222,5 cm. O FDA3 foi o que teve menor taxa de aumento de perda de carga (6,7cm.h<sup>-1</sup>), finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 144 cm. Os filtros FDA1 e FDA2 apresentaram comportamentos muito próximos entre si, em relação ao crescimento.

No E2 (230/310 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>), o FDA1 teve taxa de perda de carga de 13,2 cm.h<sup>-1</sup>, finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 190 cm. O FDA2 foi o que teve maior taxa de aumento de perda de carga (16,20 cm.h<sup>-1</sup>), finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 215 cm. O FDA3 foi o que teve menor taxa de aumento de perda de carga (8,55 cm.h<sup>-1</sup>), finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 220 cm. Os filtros FDA1 e FDA2 apresentaram comportamentos muito próximos entre si, em relação ao crescimento da perda de carga devido à retenção de partículas.

Todos os ensaios realizados com taxa de filtração de  $310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  foram encerrados devido às perdas de carga nos filtros FDA terem se igualado à carga hidráulica disponível de 240 cm.

Nas Figura 4.22 e 4.23 estão plotadas as variações de perda de carga laminar devido à retenção de partículas ao longo da carreira de filtração que ocorreram nas camadas do pré-filtro FAP3 e no meio filtrante dos filtros FDA.

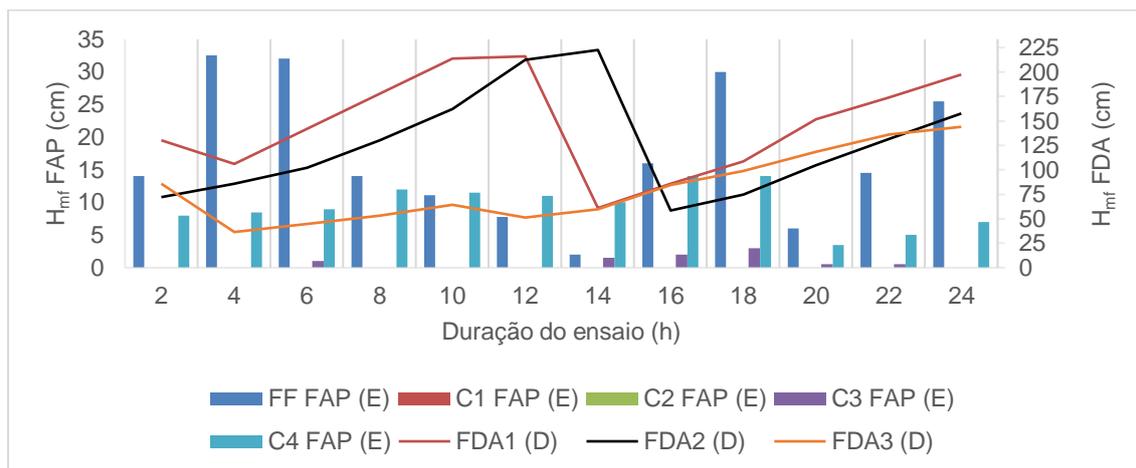


Figura 4.22 – Variação das perdas de carga nas camadas do pré-filtro e filtros descendentes de areia, com taxa de filtração de  $230/310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E1).

Legenda: FF FAP: Fundo falso do pré-filtro FAP3; C1 FAP: Camada 1 do FAP; C2 FAP: Camada 2 do FAP; C3 FAP: Camada 3 do FAP; C4 FAP: Camada 4 do FAP.

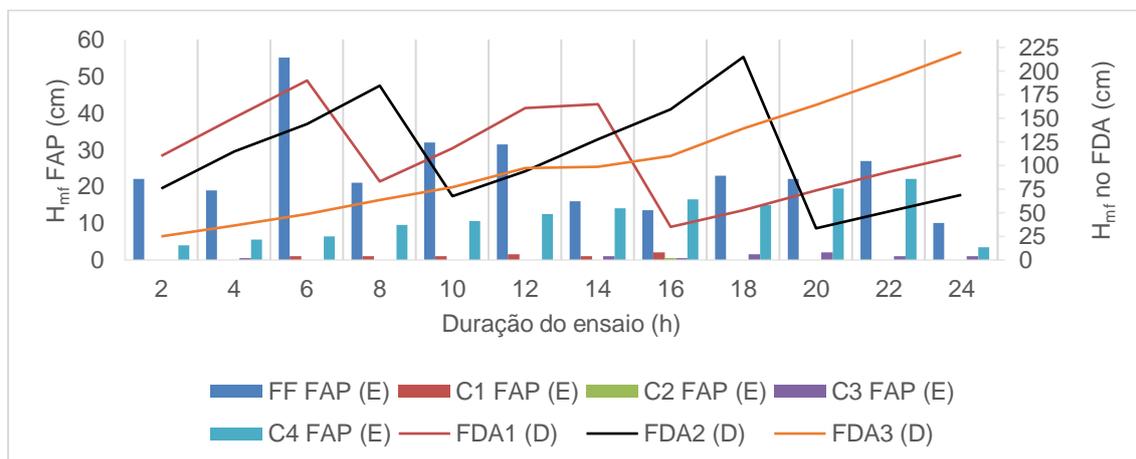


Figura 4.23 – Variação das perdas de carga nas camadas do pré-filtro e filtros descendentes de areia, com taxa de filtração de  $230/310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E2).

Legenda: FF FAP: Fundo falso do pré-filtro FAP3; C1 FAP: Camada 1 do FAP; C2 FAP: Camada 2 do FAP; C3 FAP: Camada 3 do FAP; C4 FAP: Camada 4 do FAP.

No fundo falso do FAP3 as perdas iniciais foram iguais a 36,5 cm e 34,5 cm, respectivamente para cada ensaio (E3 e E4). Durante a carreira de filtração

resultou em valores que representam percentual médio de 65% e 66%, respectivamente para cada ensaio, do somatório de perdas nas quatro camadas suportes e filtrante. As taxas médias de crescimento da perda de carga do FF foram de  $3,88 \text{ cm.h}^{-1}$  e  $2,54 \text{ cm.h}^{-1}$ , respectivamente para cada ensaio, considerados baixos, resultantes das DFI executadas durante a carreira.

No FAP3 as perdas de carga finais máximas foram de 49,5 cm e 47,0 cm, representando taxas médias de crescimento de  $2,75 \text{ cm.h}^{-1}$  e  $2,63 \text{ cm.h}^{-1}$ , respectivamente para E3 e E4, o que representa uma margem de operação do pré-filtro de 3,5 dias para igualar com a carga hidráulica disponível de 232 cm, arbitrando uma função linear. Uma redução de 1,3 dias quando comparado aos ensaios com menor taxa de filtração.

As perdas de carga média no E3 e E4 ( $340 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) no meio filtrante limpo nos filtros FDA1, FDA2 e FDA3 foram  $H_{\text{MFL}} = 79, 58$  e  $19 \text{ cm}$ , respectivamente. As  $H_{\text{MFL}}$  medidas não estão de acordo com a previsão do modelo matemático de Fair *et al* (1968) e apresentam valores que variam entre 12 e 68% a mais do calculado. Como mostrado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Perdas de carga no meio filtrante limpo nos filtros de areia ( $C_e = 0,81$  e  $\varepsilon = 0,4$ ).

Filtro	$H_{\text{MFL}}(\text{cm})$	$H_{\text{MFL}}$ teórico (cm)	Diferença (%)
FDA1	79	47	68
FDA2	58	39	49
FDA3	19	17	12

No E3 ( $230/310 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ), o FDA1 foi o que teve maior taxa de aumento de perda de carga ( $19,7 \text{ cm.h}^{-1}$ ), finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 233,5 cm. O FDA2 teve taxa de aumento de perda de carga de  $16,7 \text{ cm.h}^{-1}$ , finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 209,0 cm. O FDA3 foi o que teve menor aumento de perda de carga ( $9,6 \text{ cm.h}^{-1}$ ), finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 233,5 cm. Os filtros apresentaram comportamentos distintos entre si, em relação à evolução da perda de carga devido à retenção de impurezas.

No E4 ( $230/310 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ), o FDA1 teve maior taxa de aumento de perda de carga ( $18,3 \text{ cm.h}^{-1}$ ), finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 234,0 cm. O FDA2 foi o que teve menor taxa de aumento de perda de carga

( $21,3 \text{ cm.h}^{-1}$ ), finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 232,5 cm. O FDA3 teve taxa de aumento de perda de carga de  $15,11 \text{ cm.h}^{-1}$ , finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 217,0 cm. Os filtros apresentaram comportamentos semelhantes entre si e a aos demais ensaios, em relação ao crescimento.

Todos estes ensaios, realizados com taxa de filtração de  $255/340 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  foram encerrados devido às perdas de carga nos filtros FDA terem se igualado à carga hidráulica disponível de 240 cm.

Nas Figura 4.24 e 4.25 estão plotadas as variações de perda de carga laminar ao longo da carreira de filtração que ocorreram nas camadas dos pré-filtros FAP e no meio filtrante dos filtros FDA.

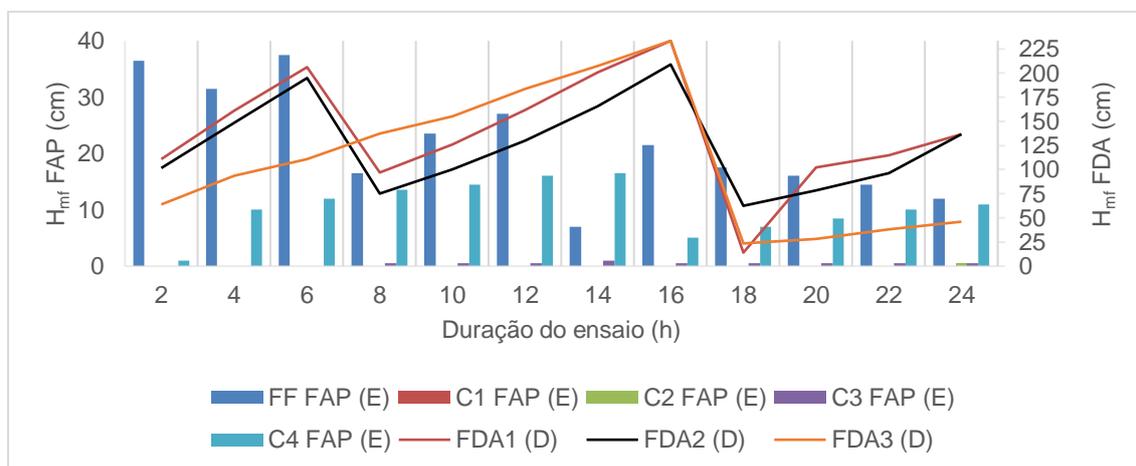


Figura 4.24 – Variação das perdas de carga nas camadas do pré-filtro e filtros descendentes de areia, com taxa de filtração de  $255/340 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (E3).

Legenda: FF FAP: Fundo falso do pré-filtro FAP3; C1 FAP: Camada 1 do FAP; C2 FAP: Camada 2 do FAP; C3 FAP: Camada 3 do FAP; C4 FAP: Camada 4 do FAP.

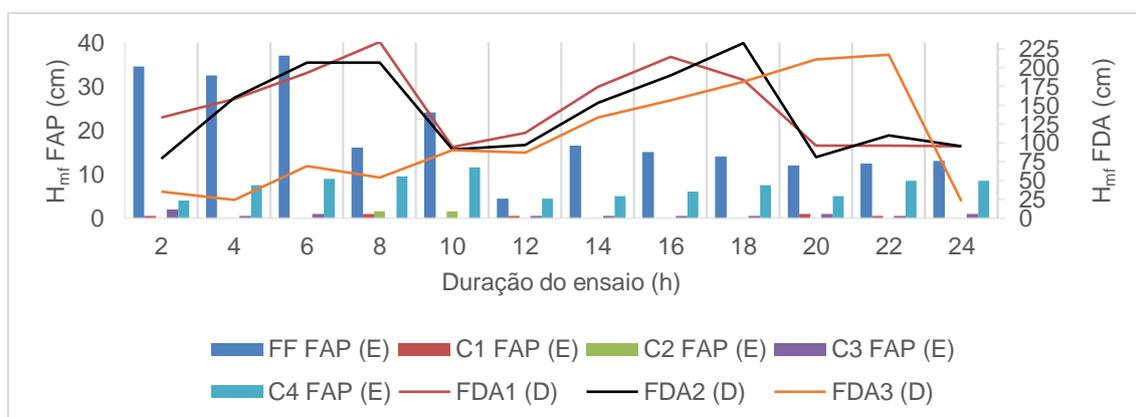


Figura 4.25 – Variação das perdas de carga nas camadas do pré-filtro e filtros descendentes de areia, com taxa de filtração de  $255/340 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (E4).

Legenda: FF FAP: Fundo falso do pré-filtro FAP3; C1 FAP: Camada 1 do FAP; C2 FAP: Camada 2 do FAP; C3 FAP: Camada 3 do FAP; C4 FAP: Camada 4 do FAP.

Para a taxa de  $310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E1 e E2), as perdas de carga na camada de areia durante a carreira dos FDA foram estatisticamente diferentes ( $p=0,01$ ) e o FDA3 apresentou menor média quando comparado ao FDA1 e FDA2. Para a taxa de  $310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E3 e E4), os FDA seguiram a mesma tendência e tiveram perdas de carga estatisticamente diferentes ao longo da carreira de filtração ( $p=0,01$ ). As Figuras 4.26 e 4.27 mostram os gráficos com os resultados da ANOVA para os meios filtrantes dos FDA, carreira de filtração e perda de carga.

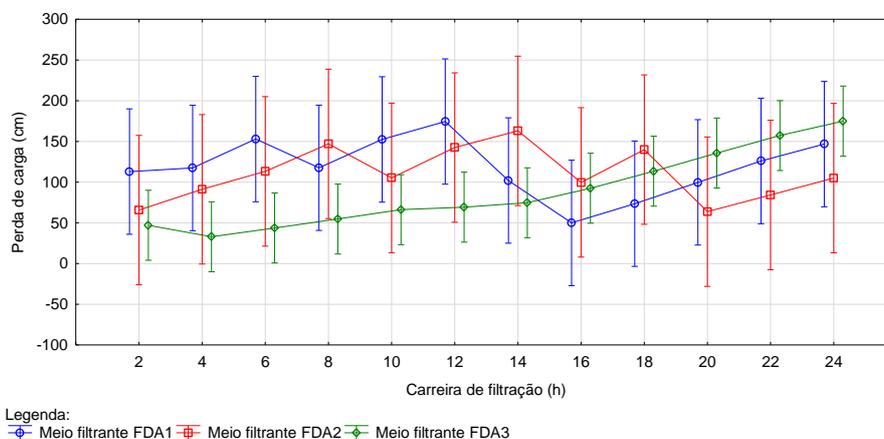


Figura 4.26 – Perda de carga laminar e turbulenta no meio filtrante (camada de areia) dos FDA com taxas de filtração de  $230 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E1 e E2).

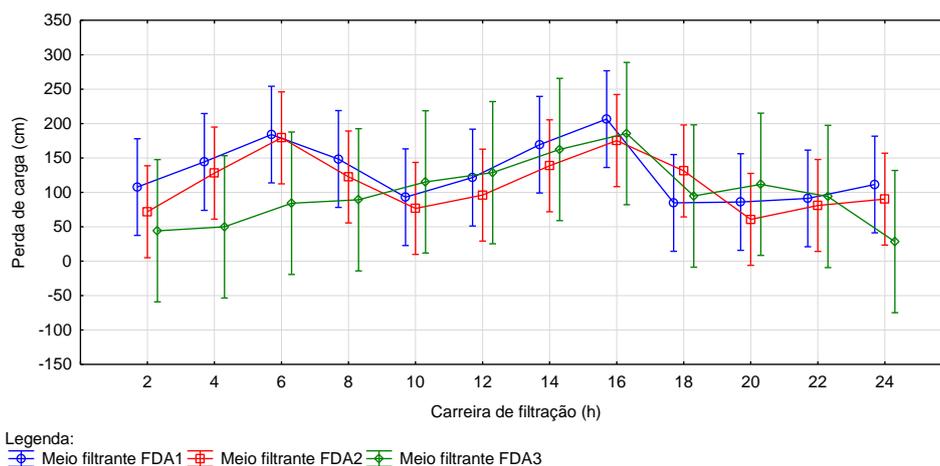


Figura 4.27 – Perda de carga laminar e turbulenta no meio filtrante (camada de areia) dos FDA com taxas de filtração de  $255 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (E3 e E4).

Analisando a duração das carreiras de filtração pode-se perceber que os FDA1, FDA2 e FDA3 tiveram carreiras de filtração médias de 10h, 10h e 24h respectivamente para taxa de filtração de  $310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ , e reduzidas para 8h, 8h e 22h respectivamente para taxa de filtração de  $340 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ .

A análise de variância das camadas do meio filtrante do FAP mostra que as perdas de carga nas camadas não evoluem com diferença estatística, ou seja, estaticamente, as perdas de carga durante a operação do FAP foram equivalentes. As pequenas taxas de crescimento das perdas de carga no FAP corroboram a essa conclusão.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As principais conclusões desse trabalho são:

As estruturas da ETA Extremoz podem ser reformadas para adequação da tecnologia de ciclo completo para dupla filtração;

As doses de coagulante e de oxidante não devem ser constantes para experimentos com água bruta natural, visto que a alteração na qualidade da água bruta requer alteração nas doses.

Apesar do desempenho semelhante aos demais FAP, o pré-filtro FAP3 apresentou melhor eficiência e as menores médias de turbidez e cor aparente remanescentes. FAP1 foi o de pior desempenho. Os desempenhos dos FDA foram estaticamente equivalentes, porém, por ter careira de filtração superior aos demais, o FDA3 foi o filtro com granulometria mais adequada ao tratamento da água bruta;

Foram verificados picos de turbidez na água pré-filtrada após as DFI e na água filtrada após a lavagem dos filtros de areia;

Em todos os ensaios realizados, a perda de carga final do FAP foi inferior a 0,60m (carga máxima disponível de 240 cm), resultado que indica que a carga hidráulica prevista para o pré-filtro poderia ser menor que o indicado na literatura;

A elevação da taxa de filtração não influenciou o desempenho dos pré-filtros, entretanto taxas de filtração entre 200 e  $300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  foi a faixa escolhida por representar menores custos de implantação de unidades.

O maior influenciador na perda de carga total do FAP3 é o fundo falso e as camadas mais baixas do FAP3 não contribuíram para a remoção de turbidez e cor.

O FAP se mostrou equalizador na qualidade da água afluyente dos filtros de areia;

Para as taxas de filtração estudadas a granulometria dos FDA não gera efluentes distintos entre si;

O sistema DF pode ser aplicado na ampliação da ETA Extremoz, mas não pôde ser estruturada visto que a qualidade dos efluentes não resultou em valores adequados quando comparados à PRC n° 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX.

As principais recomendações de trabalhos futuros são:

Realizar ensaios com filtros de areia com camada de carvão antracito;

Realizar ensaios visando a otimização da lavagem dos filtros com ar.

## 6 REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION (APHA; AWWA; WEF). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19th ed. Washington: APHA, 1988.

ARORA, H., LeCHEVALIER, M. W., DIXON, K. L. **Disinfection by-products occurrence survey**. Journal of American Water Works Association, p 61-68, June, 1997.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Técnica de abastecimento e tratamento de água**. 2ª Edição. São Paulo: CETESB, 1976.

BELLAR, T. A., LICHTENBERG, J. J., KRONER, R. C. **The occurrence of organohalogenes in chlorinated drinking waters**. *Journal American Water Works Association*, v. 66, n. 11, 1974. December, p. 703-706, 1974.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (BR/MMA). **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**. Resolução nº 357/2005, de 17/03/2005. Brasília: MMA, 2005.

BRASIL, MINISTÉRIO DA SAÚDE (BR/MS). **Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências**. Portaria nº 518/2004, de 25/03/2004. Brasília: MS, 2004.

BRASIL, MINISTÉRIO DA SAÚDE (BR/MS). **Norma de Qualidade da Água para Consumo Humano**. Portaria nº 1469/2000, de 29/12/2000. Brasília: MS, 2000.

BRASIL, MINISTÉRIO DA SAÚDE (BR/MS). **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Portaria nº 2914/2011, de 12/12/2011. Brasília: MS, 2011.

BRASIL, MINISTÉRIO DA SAÚDE (BR/MS). **Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde**. Portaria de consolidação nº 5/2017. Brasília: MS, 2017.

BRAGA, F. M. G.; CORDEIRO, B. S.; BRANDÃO, C. C. S. **Dupla filtração em filtros ascendentes de pedregulho e filtros descendentes de areia aplicada à remoção de algas: influência da granulometria do filtro de areia**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, 2007, Belo Horizonte. Anais ABES, 2007.

BRITO, F. M.C.; DUARTE, M. A. C., **Variação temporal da qualidade da água bruta da lagoa de Extremoz/RN**. Trabalho de conclusão de graduação – Tecnologia em Gestão Ambiental, Instituto Federal de Educação, ciência e tecnologia do Rio Grande do Norte, 2018.

CONSTANTINO, A. F.; YAMAMURA, V. D. Vantagens do Policloreto de Alumínio (PAC). In: Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, 2009, Maringá/PR. **Redução do gasto operacional em estação de tratamento de água utilizando o PAC.** [S.l.: s.n.], 2009.

CONNOR, R. United Nations Educational Scientific And Cultural Organization. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2018.** Itália. 12 p., 2018.

CLEASBY, J. L., LOGSDON, G. S. **Granular bed and precoat filtration.** In: AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. LETTERMAN, R. D. (technical ed.) *Water quality and treatment. A handbook of community water supplies.* Estados Unidos da América: McGraw Hill, 1999.

DI BERNARDO, L. & PAZ, L.P.S. **Seleção de tecnologias de tratamento de água.** v. 1. 1. ed. São Carlos: Editora LDiBe, 2008.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, D.B.A. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** São Carlos: Rima. Volume I, 2005.

DI BERNARDO, L., LUCA, S. J., KURODA, E. K., PEGORER, M. G. L. Oxidação. In: PÁDUA, V. L. (coord.). **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano.** PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Belo Horizonte: SERMOGRAF. 504 p, 2006.

DI BERNARDO, L. Dupla Filtração. In: PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO. Empresa Brasileira de Inovação e Pesquisa. **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta.** São Carlos/SP: Rima, 2003.

DI BERNARDO, L.; ISAAC R. L. **Upflow direct filtration – a review.** In: International Conference on Advances in Rapid Granular Filtration In Water and Wastewater Treatment. London. Anais. UK., 2001.

DUARTE, M. A. C., **Tratamento de água para consumo humano de reservatório eutrofizado através de pré e interoxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2011.

ERDIM, E.; AKGIRAY, Ö; DEMIR, I. **A revisit of pressure drop-flow rate correlations for packed beds of spheres.** Powder Technology, [S.l.], v. 283, p. 488-504, jun. 2015.

EISENLAUER, J., HORN, D., **Fiber optic online flocculant dose control in water-treatment operations.** Colloid Surf., 1987, v. 25, n. 2–4, p. 111 –129, 1987.

ERGUN, S., **Fluid flow through packed columns,** Chem. Eng. Prog. 48, 89–94, 1952.

FREITAS, D. **EFEITOS DA RECIRCULAÇÃO DE ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTROS EM UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO DIRETA EM ESCALA DE**

**BANCADA.** 22 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2017.

GUSMÃO, P. T. R.; DI BERNARDO, L. **Desempenho da dupla filtração utilizando a filtração ascendente em pedregulho e em areia Grossa.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22, 2003, Joinville. **Anais ABES**, 2003.

HAMBSCH, B., WERNER P. **Control of bacterial regrowth in drinking-water treatment plants and distribution systems.** Water Supply; v.11: p. 299–308, 1993.

HAMBSCH, B., SCHMIEDEL U., WERNER P., FRIMMEL F. H. **Investigations on the biodegradability of chlorinated fulvic acids.** Acta Hydrochim Hydrobiol; v. 21: p. 167–173, 1993.

HURST, A. M., EDWARDS, M. J., CHIPPS, M., JEFFERSON, B., PARSONS, S. A... **The impact of rainstorm events on coagulation and clarifier performance in potable water treatment.** Science of the Total Environment, 321: 219–230, 2004.

LEE, M. C., SNOEYINK, V. L. e CRITTENDEN, J. C.. **Activated carbon adsorption of humic substances.** Journal of the American Water Works Association, v. 73, n. 8, p. 440-446, 1981.

LIMA, J. A. P.; CAPELO-NETO, J. **Dupla filtração modificada utilizando filtro de pressão a montante de filtro ascendente no tratamento de águas eutrofizadas.** Eng. Sanit. Ambient. Rio de Janeiro ,v. 20, n. 1, p. 89-102, Mar. 2015.

O'CONNOR, J. T., HASH L., EDWARD A. B.. **Deterioration of water quality in distribution system.** Journal AWWA, Vol.67, pp.113, 1975.

PAULA, Donizeti de. **Avaliação da dupla filtração para tratamento de água superficial utilizando filtração ascendente em areia grossa.** 2003. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

PÁDUA, V. L. DE et al. Oxidação. In: PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO. Empresa Brasileira de Inovação e Pesquisa. **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano.** Belo Horizonte/MG: SERMOGRAF, 2006.

PAGE, D. W., VAN LEEUWEN, J. A., SPARK, K. M., DRIKAS, M., WITHERS, N., MULCAHYA, D. E. (2002). **Effect of alum treatment on the trihalomethane formation and bacterial regrowth potential of natural and synthetic waters.** Water Research 36, 2002.

PONTE, F. V. G. et al. Modelo Decisório para Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água em Comunidades Rurais no Semiárido. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 9–17, 2013.

RIBAS, F.; BERNAL, A.E.; PERRAMÓN, J. **Elimination of Giardia cysts, Cryptosporidium oocysts, turbidity and particles in a drinking water treatment plant with clarification and double filtration.** *Water Science and Technology*, v. 41, n. 7, p. 203-211, 2000.

RICHTER, C. A. (2009). **Água: Métodos e tecnologia de tratamento.** São Paulo: editora Blucher, 2009.

RODRIGUEZ, M. J., SÉRODES, J. **Laboratory-scale chlorination to estimate the levels of halogenated DBPS in full-scale distribution systems.** *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 110, p 323–340. Springer, 2005.

ROCHA, V. S. **Determinação de carbono orgânico assimilável em amostras de água: Estudo de comparação do método de determinação da concentração de ATP com o método clássico de contagem de colónias.** 2007. 96 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Biológica, Universidade Técnica de Portugal, Portugal, 2007.

ROOK, J.J. **Haloforms in drinking water.** *Journal of American Water Works Association*, 1976, March, p 168-172, 1976.

SABOGAL-PAZ, L. P.; MARQUES, E.; ABICHABK, F. B.; SAKAMTO, J. A. Technical-economic evaluation of double filtration technology. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.l.], v. 20, p. 525-532, out. 2012.

SILVA, G. G. et al. Tratamento de água de reservatórios por dupla filtração, oxidação e adsorção em carvão ativado granular. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 71–80, 2012.

SYMONS, J. M., BELLAR, T. A., CARSWELL, J. K., DeMARCO, J., KROPP, K. L., ROBECK, G. G., SEEGER, D. R., SLOCUM, C. J., SMITH, B. L., STEVENS, A. A. **National reconnaissance survey for halogenated organics.** *Journal of American Water Works Association*, 1975, November, p. 634-647, 1975.

SINGER, P. C., RECKHOW, D. A. **Water Quality and Treatment, A Handbook for Community Water Supplies**, ed. LETTERMAN, R. D., McGraw-Hill, Nova Iorque, 5 ed., pp.12.1–12.51, 1999.

THURMAN, E. M., MALCOLM, R. L. **Preparative isolation of aquatic humic substances.** *Envir. Sci.& technol.*, v. 15, n. 4. p 463, 1981.

VAN der KOOIJ, D., HIJNEN, W. A. M. **Substrate utilization by an oxalateconsuming Spirillum species in relation to its growth in ozonated water.** *Applied and Environmental Microbiology*, v.47, n. 3, p. 551-559, 1984.

VAHALA, R.. **Two-step granular activated carbon filtration in drinking water treatment.** 81 p. [Doctoral thesis. Department of Civil Environmental Engineering. Helsinki University of Technology (Espoo, Finland), 2002.

VON GUNTEN, U., DRIEDGER, A., GALLARD, H., SALHI, E. (2001) **By-products formation during drinking water disinfection: a tool to assess disinfection efficiency?** *Wat. Res.* v. 35, n. 8, pp. 2095–2099, 2001.

WIECHETECK, G. K.; BENINE, B. D. S.; DI BERNARDO, L. **Remoção de substâncias húmicas utilizando dupla filtração com filtro ascendente de areia grossa ou de pedregulho.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.9, n 2, p. 156-164, Abr/Jun 2004.

KAWAMURA, S. **Integrated design and operation of water treatment facilities.** 2nd. Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc. 621p. 2000

KÄLLÉN, B. A. J., ROBERT, E. **Drinking water chlorination and delivery outcome – a registrybased study in Sweden.** Reproductive Toxicol. v. 14, p. 303-309, 2000.

KRASNER, S. W., McGUIRE, M. J., JACANGELO, J. G., PATANIA, N. L., REAGAN, K. M., AIETA, E. M. **The occurrence of disinfection by-products in US drinking water.** *Journal of American Water Works Association*, p. 41-53, august, 1989.

KURODA, E. K. **Avaliação da Filtração Direta Ascendente em Pedregulho como Pré-Tratamento em Sistemas de Dupla Filtração.** São Carlos, 217 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2002.