

I-288 - FILTRAÇÃO ASCENDENTE COMO PRÉ-TRATAMENTO PARA FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE: MANANCIAL COM TURBIDEZ BAIXA A MODERADA

Nayara Suassuna da Silva⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Hélio Rodrigues dos Santos⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo. Pós-doutor pela University of Leeds (Inglaterra). Professor Associado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Endereço⁽¹⁾: Av. Capitão Mor-Gouveia, 1135 – Nossa Senhora de Nazaré - Natal - RN - CEP: 59060-400 - Brasil - Tel: +55 (84) 98851-4034 - e-mail: nayarasuassuna@outlook.com

RESUMO

Mudanças na qualidade da água têm acontecido de forma recorrente em mananciais superficiais de países em desenvolvimento, devido a acelerados processos de urbanização. Nesse sentido, é essencial que as estações de tratamento de água (ETAs) dessas regiões sejam capazes de produzir água segura mesmo diante de variações na qualidade da água. Em alguns casos isso pode ser obtido mediante ajustes na operação da ETA, sendo que às vezes é necessário a reformulação do sistema de tratamento. A filtração direta descendente (FDD) é uma tecnologia de tratamento eficaz, de baixo custo e fácil operação, necessitando, contudo, que a cor e a turbidez da água bruta afluyente sejam baixos. Para contornar essa limitação, em mananciais com variações sazonais da qualidade da água pode-se utilizar uma unidade de pré-tratamento. Dentre as alternativas, a filtração ascendente em areia grossa (FAAG) mostra grande potencial, devido também a seu baixo custo e simplicidade operacional. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é investigar a viabilidade da utilização da filtração ascendente como pré-tratamento de um sistema de FDD para tratar a água de uma lagoa costeira tropical. Os ensaios mostraram que os sistemas de FDD e dupla filtração apresentaram efluente final estável e com turbidez inferior a 0,5 NTU e cor aparente inferior a 15 uC. No entanto, a carreira de filtração na FDD foi muito curta devido à rápida evolução da perda de carga no meio filtrante testado. O sistema de dupla filtração apresentou carreiras de filtração longas, lenta evolução de perda de carga e remoção adequada de cor e turbidez, de modo que a implantação da FAAG a montante dos filtros descendentes aumenta a capacidade de retenção de partículas e a robustez de ETAs de FDD.

PALAVRAS-CHAVE: Filtração direta descendente, Dupla filtração, Lagoa litorânea, Água com turbidez baixa, Água com cor moderada.

INTRODUÇÃO

A finalidade de uma ETA (Estação de Tratamento de Água) é produzir água potável a partir da água bruta oriunda de um determinado manancial afluyente à estação. A água produzida deve ser esteticamente agradável e segura do ponto de vista sanitário, mediante remoção de microrganismos patogênicos e de substâncias prejudiciais à saúde humana, tais como contaminantes orgânicos, inorgânicos e subprodutos de desinfecção, que devem apresentar concentrações inferiores aos valores estipulados na legislação vigente (FERREIRA FILHO, 2017; HELLER; PÁDUA, 2010).

As principais configurações de ETAs utilizadas no Brasil são: ciclo completo e filtração direta (MELO et al., 2019). Por ser mais simples, a filtração direta apresenta diversas vantagens em relação ao ciclo completo, tais como: menor número de unidades envolvidas, menor consumo de produtos químicos durante o tratamento, o que permite a economia de recursos, maior simplicidade operacional e de manutenção, além de menor geração de lodo (DI BERNARDO, 2003). No entanto, é uma tecnologia mais restritiva em relação à qualidade da água bruta, devendo ser utilizada somente quando os valores de cor e turbidez forem inferiores a 25uC e 10 NTU, respectivamente (TWORT; RATNAYAKA; BRANDT, 2000).

Vários estudos investigaram e comprovaram degradação na qualidade de águas superficiais devido a processos acelerados de urbanização, mais evidente em países em desenvolvimento (BORGES et al., 2015; FERREIRA et al., 2021; QIN et al., 2014; REN et al., 2003), o que reforça a necessidade de se considerar medidas de adaptação nos sistemas de tratamento no intuito de proteger a qualidade da água de abastecimento contra qualquer aumento acentuado na turbidez da água bruta afluyente (KOBAYASHI et al., 2013).

Uma forma de contornar variações na qualidade da água em sistemas de filtração direta já existentes consiste na adição de filtros rápidos adicionais (descendentes, se a ETA tiver filtros ascendentes; ou ascendentes, se os filtros existentes forem descendentes), constituindo o sistema de dupla filtração, que permite, além das vantagens atribuídas à filtração direta, o tratamento de água bruta de pior qualidade, com menor susceptibilidade a variações bruscas de qualidade, e a aplicação de taxas de filtração maiores (DANTAS; DI BERNARDO, 2006).

Estudos feitos utilizando a tecnologia de dupla filtração mostram o desempenho dessa configuração em remover turbidez, matéria orgânica e cor de águas com diferentes características, principalmente aquelas com turbidez moderada ou elevada. Queiroz et al. (2018) estudaram a aplicabilidade da dupla filtração, com e sem pré-oxidação e adsorção em carvão ativado, para tratamento de água eutrofizada com turbidez acima de 9 NTU e cor aparente maior que 80 uC, e verificaram que o sistema foi eficiente para remover turbidez, cianobactérias, clorofila-a e carbono orgânico total, inclusive nos ensaios em que não houve acréscimo das etapas de pré-oxidação e adsorção em carvão ativado.

Silva et al. (2012) avaliaram o desempenho da dupla filtração com e sem o acréscimo das etapas de pré e inter oxidação e utilizando adsorção em carvão ativado, para tratamento de água com turbidez e cor aparente acima de 29 NTU e 173 uC, respectivamente, e constataram que apenas a dupla filtração já seria suficiente para atender aos valores máximos de turbidez, cor e subprodutos orgânicos halogenados estabelecidos na portaria de potabilidade, dispensando-se as etapas de pré e inter cloração. Dantas e Di Bernardo (2006) estudaram a aplicação da dupla filtração para tratamento de águas com elevada turbidez (entre 100 e 300 NTU), utilizando meios filtrantes diferentes para o filtro ascendente e variando a taxa de filtração, e concluíram que o sistema foi eficaz em produzir efluente dentro do padrão de potabilidade no que se refere a turbidez.

Nesse sentido, considerando que o modelo de filtração a ser adotado depende primordialmente das características da água bruta (KOZYATNYK, 2016), e que, na prática, a filtração direta tem sido preferencialmente adotada para tratamento de águas com baixas cor e turbidez (LIMA; CAPELO-NETO, 2015), a adaptação de sistemas de filtração direta para a dupla filtração pode ser uma alternativa de tratamento eficaz e robusta para ETAs em que verificam alterações significativas na qualidade do manancial.

Assim, utilizando como fonte de água bruta um manancial com turbidez variando de baixa à moderada, este trabalho objetiva investigar a viabilidade da utilização da filtração ascendente como pré-tratamento para uma Estação de Tratamento de Água projetada e operada com a tecnologia de filtração direta descendente.

METODOLOGIA

A fim de atingir o objetivo proposto, a pesquisa foi desenvolvida em duas etapas. Na primeira etapa foram realizados ensaios de tratabilidade em reatores do tipo *jar test* acoplados a filtros de laboratório de areia (FLA) a fim de otimizar as condições operacionais (dose de coagulante, pH, dose de oxidante, tempo de contato de oxidante) a serem adotadas na etapa seguinte.

Na segunda etapa do trabalho foram realizados três ensaios em Instalação Piloto operando nas configurações de filtração direta descendente e de dupla filtração objetivando, comparar a performance dos dois sistemas para tratamento da água do manancial estudado, como também, verificar a robustez do sistema de dupla filtração para tratamento da água após ocorrência chuvas torrenciais.

O manancial utilizado nesse estudo foi a lagoa do Jiqui, lagoa costeira localizada no município de Parnamirim no estado do Rio Grande do Norte. Esse manancial apresenta cor moderada (entre 15 e 20 uC) e turbidez baixa (entre 1,5 e 2,0 NTU) por aproximadamente 8 meses por ano. Nos meses chuvosos, esses parâmetros sofrem variações esporádicas, chegando a valores superiores a 300 uC e 50 NTU para cor e turbidez, respectivamente (NATAL, 2015).

ETAPA 1: ENSAIOS DE TRATABILIDADE (JAR TEST +FLA)

Os ensaios de tratabilidade foram realizados em duplicata com ordem de execução de forma aleatória e objetivavam determinar os pares “dose de coagulante x pH” mais adequados para a remoção de turbidez e cor da água, além de verificar se o acréscimo da etapa de pré-oxidação traria alguma melhoria ao tratamento.

As variações de pH foram realizadas pela adição de soluções acidificantes (Ácido Sulfúrico 0,1N ou Ácido Clorídrico 6N) ou alcalinizante (NaOH 5% m/v) e o coagulante utilizado em todos os ensaios foi o Cloreto de Polialumínio - PAC (16% de Al_2O_3 ; $\rho=1,327 \text{ g/cm}^3$). Nos ensaios em que houve pré-oxidação, o oxidante utilizado foi o cloro na forma de Hipoclorito de Cálcio 65%.

ETAPA 2: ENSAIOS NA INSTALAÇÃO PILOTO

A instalação piloto (IP) utilizada é constituída de um filtro ascendente de areia grossa (FAAG) e de um filtro descendente de areia e antracito (FDAA), podendo ser utilizada para realizar ensaios de filtração descendente (FD), filtração ascendente (FA) ou dupla filtração (DF). Na Figura 1, apresenta-se desenho esquemático da IP.

Os dois filtros são construídos em fibra de vidro, com tubos e conexões em policloreto de vinila (PVC). O FAAG possui 330 cm de altura e 80 cm de diâmetro e o FDAA possui 300 cm de altura e 60 cm de diâmetro. Ambos apresentam camada de suporte de pedregulho e meio filtrante com as características granulométricas dispostas na Tabela 1. A adição do pré-oxidante e do coagulante era feita diretamente na tubulação de entrada da água bruta no filtro e, no caso do coagulante, havia um misturador hidráulico do tipo placa de orifício no interior da tubulação que gerava uma mistura rápida com gradiente de velocidade entre 700 e 1000 s^{-1} .

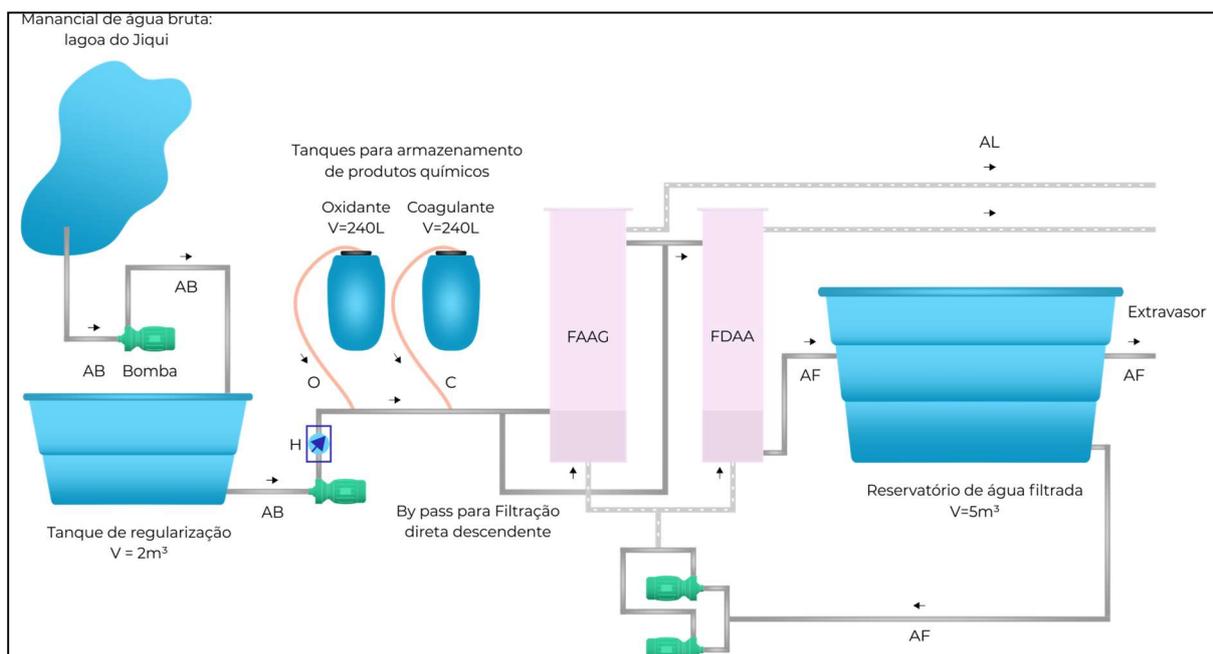


Figura 1 – Esquema de funcionamento da instalação piloto (LEGENDA: AB – Água Bruta; H- Hidrômetro; O – Oxidante; C – Coagulante; FAAG – Filtro ascendente de areia grossa; FDAA- Filtro descendente de areia e antracito; AF – Água Filtrada; AL – Água de lavagem).

A lavagem dos filtros era feita com a água filtrada, por meio de dois conjuntos motobomba do tipo centrífuga com vazão de 15 m^3/h cada. Para lavagem do filtro descendente apenas um conjunto motor-bomba era utilizado e a duração da lavagem era de 7 minutos. Já para o filtro ascendente era requerida a operação dos dois conjuntos em paralelo por 10 minutos. No filtro ascendente também eram efetuadas descargas de fundo intermediárias mediante a injeção de água filtrada na interface camada de suporte – areia, sendo requerida uma vazão de 15 m^3/h para este fim, durante 2 minutos.

Tabela 1- Caracterização do meio filtrante

	Filtro ascendente	Filtro descendente	
	Areia	Antracito	Areia
Altura (cm)	160	35	25
Diâmetro efetivo -D10 (mm)	1,68	1,0	0,5
Coefficiente de uniformidade	1,26	1,55	1,10

A carga hidráulica disponível no filtro ascendente era de 240 cm e no descendente de 144 cm. Devido a posição dos piezômetros, havia alguns níveis de água no interior dos filtros que não podiam ser visualizados, e, por esse motivo, foi necessário fazer uma estimativa da perda de carga no início da carreira de filtração.

Nesse sentido, a perda de carga gerada pelo meio filtrante limpo e camada de suporte foi estimada a partir da Equação de Ergun (FERREIRA FILHO, 2017) e a perda de carga gerada pelas tubulações e singularidades foi estimada a partir da Equação de Hazen-Williams (DI BERNARDO, 2003). A partir do momento em que o nível da água no interior de cada filtro era visível nos piezômetros, a evolução da perda de carga decorrente da retenção do material particulado no meio filtrante era determinada através do monitoramento e registro do respectivo nível.

O encerramento dos ensaios foi determinado mediante o encerramento da carreira de filtração no filtro ascendente ou no filtro descendente, o que ocorresse primeiro. O encerramento de uma carreira de filtração ocorria caso um dos seguintes critérios fosse atendido:

1. Alcance da carga hidráulica disponível no filtro.
2. Transpasse, quando a turbidez do efluente atingisse ou superasse 1,0 NTU no filtro ascendente ou 0,5 NTU no filtro descendente, desconsiderando-se o período de amadurecimento do filtro, que tipicamente ocorre no início da carreira de filtração.

Os ensaios realizados nessa etapa estão especificados na Tabela 2.

Tabela 2- Ensaios realizados na instalação piloto e parâmetros de controle monitorados

Configuração	Parâmetros de Controle
Ensaio de filtração direta descendente com água de baixa turbidez (FDD-TB)	Água bruta: temperatura, turbidez, pH, alcalinidade total, cor aparente, cor verdadeira e potencial zeta (PZ).
Ensaio dupla filtração com água de baixa turbidez (DF-TB)	Água filtrada: turbidez, cor aparente, cor verdadeira, cloro residual, potencial zeta (PZ), pH e temperatura.
Ensaio dupla filtração com água de turbidez moderada (DF-TM)	

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ENSAIOS DE TRATABILIDADE (JAR TEST +FLA)

Com base em recomendações da Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde, que estabelece o padrão de potabilidade da água, considerou-se como valores máximos aceitáveis para turbidez e cor aparente da água tratada 0,5 NTU e 15 uC, respectivamente.

Verificou-se que uma ampla faixa de pares pH x dose de coagulante apresentaram valores de turbidez e cor aparente dentro do limite estabelecido. Doses menores (2 e 5 mg/L) não foram eficazes para remoção de cor e turbidez, enquanto doses acima de 8 mg/L para o pH natural (aproximadamente neutro) ou acidificado apresentaram turbidez inferior a 0,3 NTU e cor inferior a 10 uC. O aumento do pH diminuiu a qualidade da água

tratada, principalmente no que se refere a cor aparente. Além disso, na faixa de 10 a 15 mg/L de coagulante, a adição da pré-oxidação com cloro entre 2 e 4 mg/L, e tempos de contato de 10 e 20 minutos, foi eficaz para remoção de turbidez e cor aparente da água bruta, reduzindo esses parâmetros para valores abaixo de 0,5 NTU e 15 uC, respectivamente.

ENSAIO DE FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE – ÁGUA COM TURBIDEZ BAIXA (FDD-TB)

Com base nos ensaios de tratabilidade, a dose do coagulante (PAC) adotada nesta etapa foi de 12 mg/L e a dose de oxidante (cloro) foi de 1 mg/L. Foi escolhida uma dose de oxidante menor do que a faixa obtida nos ensaios de tratabilidade na expectativa de que o sistema piloto apresente resultados melhores do que o *jar test* + FLA, além de diminuir a formação de subprodutos de desinfecção. Na Tabela 3 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos no ensaio FDD-TB.

Tabela 3- Resultados do ensaio FDD-TB

Parâmetro	Água Bruta				Efluente FDAA			
	MÍN	MÁX	MÉDIA	DP	MÍN	MÁX	MÉDIA*	DP*
Temperatura (°C)	28,3	31,2	29,53	0,95	29	30,9	30,48	0,35
pH	6,61	6,92	6,84	0,08	5,85	6,79	6,43	0,33
Turbidez (NTU)	1,68	2,52	1,91	0,20	0,23	0,84	0,28	0,04
Cor Aparente (Uc)	32,3	37,8	34,3	1,4	8,1	10,9	8,9	0,5
Cor Verdadeira (Uc)	22,5	24,5	23,4	0,6	7,3	9,8	8,1	0,7
PZ (mV)	-5,32	-17,04	-10,02	3,53	-0,54	-7,41	-3,71	2,75
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	143,78	151,13	147,02	3,75	-	-	-	-
Cloro residual (mg/L)	-	-	-	-	0	0,09	0,01	0,03

LEGENDA: MÍN – mínimo / MÁX – máximo / FDAA - filtro descendente de areia e antracito / DP- Desvio padrão /*média aritmética e desvio padrão calculados excluindo os valores obtidos no período de maturação do filtro.

Conforme observa-se na Figura 2, o efluente do FDAA apresenta um pico de turbidez aos 10 minutos da carreira de filtração, o que corresponde ao período de maturação do filtro, mantendo-se inferior a 0,4 NTU a partir de 20 minutos de ensaio.

Destaca-se que o padrão de potabilidade atual (Portaria MS 888/2021) estabelece a turbidez como um parâmetro de interesse para a qualidade microbiológica da água, indicando que se todos os filtros rápidos de um sistema de tratamento produzirem água com turbidez inferior a 0,3 NTU são dispensados ensaios para monitoramento de esporos de bactérias aeróbias, cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. Além desse valor, a portaria estabelece 0,5 NTU como valor máximo permitido para turbidez em 95% das amostras. Desta forma, verifica-se que o filtro descendente em estudo produziu efluente com turbidez inferior ao valor máximo

permitido (0,5 NTU) em todas as amostras, excetuando-se o período de maturação do filtro, e resultou em uma turbidez média inferior à 0,3 NTU.

Apesar do sistema de FDD produzir efluente com qualidade satisfatória no que refere à turbidez, é importante destacar que a perda de carga evoluiu rapidamente e o ensaio foi encerrado com 9h de operação, indicando que o meio filtrante utilizado não foi adequado para tratamento da água em estudo por FDD, tendo em vista sua rápida colmatação (ver Figura 4).

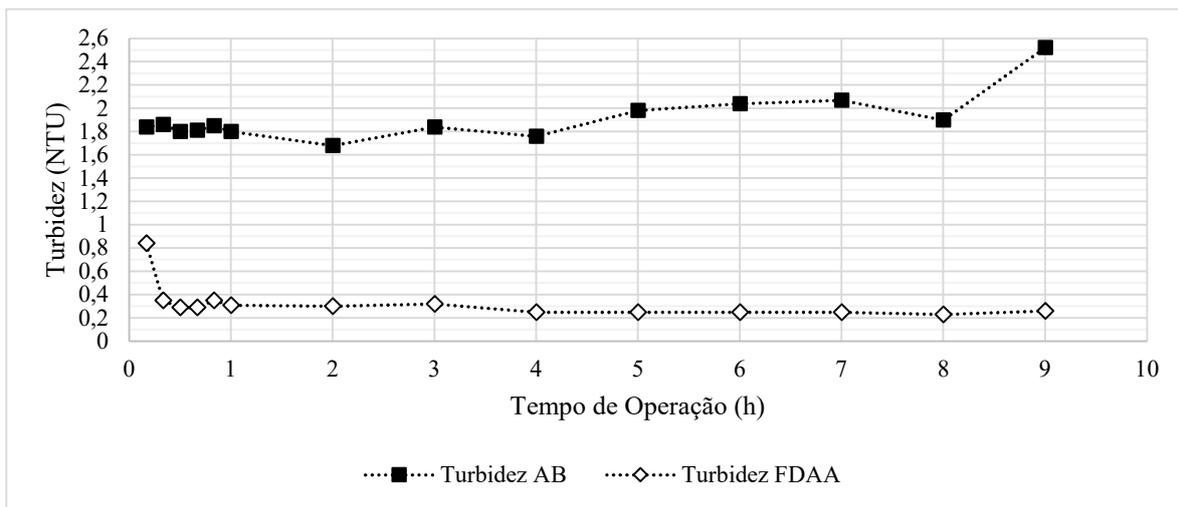


Figura 2 – Turbidez na água bruta e no efluente do filtro durante uma carreira de Filtração Direta Descendente (FDD) – Água bruta com baixas turbidez e cor. LEGENDA: AB- água bruta / FDAA - filtro descendente de areia e antracito. Condições do Ensaio: Dose de coagulante (PAC) -12 mg/L / Dose de oxidante (Cloro) - 1 mg/L / Taxa de filtração média da IP - 160 m³/m².dia.

Em relação à cor aparente (ver Figura 3), verificou-se que o sistema de FDD atendeu integralmente a esse parâmetro. Os pontos de cor verdadeira monitorados confirmam a eficiência da FDD em remover sólidos em suspensão/turbidez, uma vez que os valores de cor verdadeira no efluente resultaram muito próximos aos de cor aparente.

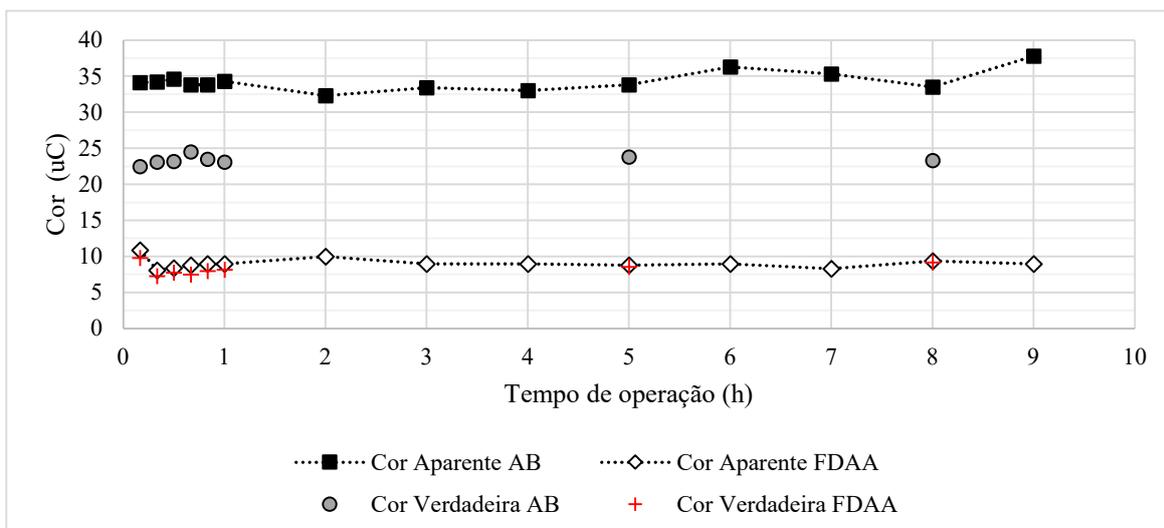


Figura 3 – Valores de cor (aparente e verdadeira) na água bruta e no efluente do filtro durante ensaio de Filtração Direta Descendente (FDD) – Água bruta com baixas turbidez e cor. LEGENDA: AB- água bruta / FDAA - filtro descendente de areia e antracito. Condições do Ensaio: Dose de coagulante (PAC) -12 mg/L / Dose de oxidante (Cloro) - 1 mg/L / Taxa de filtração média da IP - 160 m³/m².dia.

Por limitações do horário, o ensaio de filtração direta foi encerrado com 9 horas de operação, quando a perda de carga atingiu 114 cm dos 144 cm de carga hidráulica disponível (ver Figura 4). Como neste momento o efluente apresentava turbidez inferior a 0,5 NTU, o critério para encerramento do ensaio foi o de alcance da carga hidráulica disponível, sendo que havia a perspectiva de que a carreira de filtração se prolongasse por mais cerca de 3 h, ainda assim constituindo uma carreira de filtração com curta duração. Apesar disso, a turbidez efluente ao longo do ensaio comprovam a eficácia do meio filtrante em reter as partículas coloidais, tendo como consequência o aumento da perda de carga.

Considerando que a perda de carga em um filtro tende a ser maior para partículas menores, tem-se que uma alternativa para reduzir a elevada perda de carga nesse sistema de filtração direta poderia ser a implementação de uma etapa de pré-floculação antes da filtração, no intuito de aumentar o tamanho das partículas afluentes, ou aumentar a granulometria do meio filtrante (DALSSASSO; SENS, 2006).

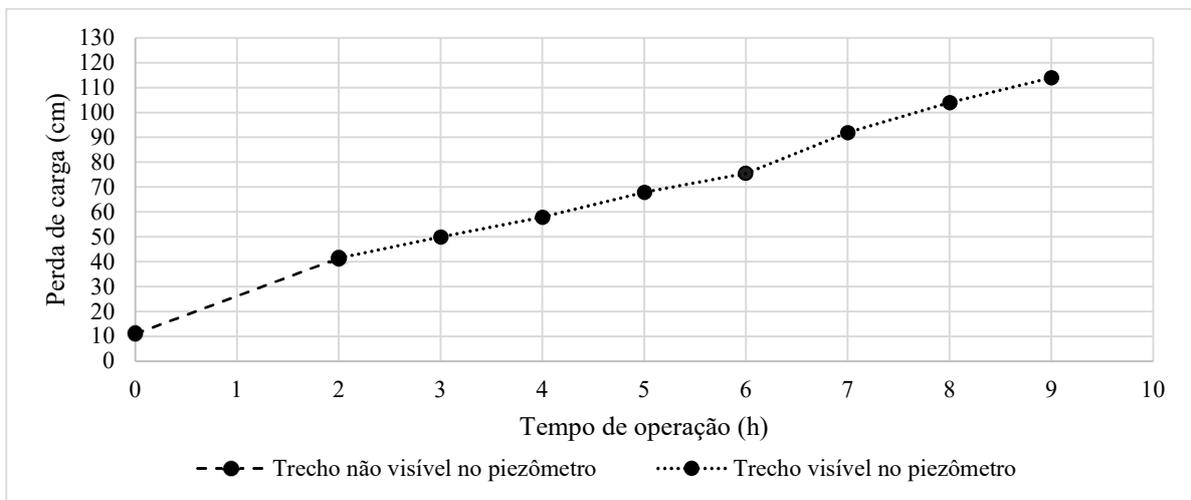


Figura 4- Evolução da Perda de Carga no FDDA durante ensaio na Instalação Piloto de filtração direta descendente (FDD). LEGENDA: FDDA - filtro descendente de areia e antracito. Condições do Ensaio: Dose de coagulante (PAC) -12 mg/L / Dose de oxidante (Cloro) - 1 mg/L / Taxa de filtração média da IP - 160 m³/m².dia / Carga hidráulica disponível no FDDA – 144 cm.

ENSAIO DE DUPLA FILTRAÇÃO – ÁGUA COM TURBIDEZ BAIXA (DF-TB)

Com base nos ensaios de tratabilidade, a dose do coagulante (PAC) adotada no ensaio de DF-TB também foi de 12 mg/L e a dose de oxidante (cloro) foi de 1 mg/L. Os resultados dos parâmetros monitorados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Resultados do ensaio DF-TB

Parâmetro	Água Bruta				Efluente FAAG				Efluente FDDA			
	MÍN	MÁX	MÉD	DP	MÍN	MÁX	MÉD *	DP *	MÍN	MÁX	MÉD *	DP *
Temperatura (°C)	26,2	30,7	28,8	1,0	26	30,4	28,6	0,99	26,2	30,7	28,8	0,99
pH	6,44	7,27	6,76	0,16	6,24	7,19	6,73	0,17	6,37	7,10	6,74	0,15

Turbidez (NTU)	1,54	4,47	2,29	0,60	0,23	3,37	0,33	0,08	0,24	1,87	0,31	0,06
Cor Aparente (uC)	30,7	51,3	37,4	4,8	8,9	27,9	12,0	1,75	10,1	20,4	12,4	1,55
Cor Verdadeira (uC)	22,1	30,1	25,2	2,6	9,7	19,2	11,5	1,43	10,3	16,3	11,8	1,43
PZ (mV)	-16,1	-7,67	-11,34	2,52	-18,3	-0,1	-3,36	2,5	-14,3	0,15	-1,93	2,24
Alcalinidade (mgCaCO₃/L)	125,4	136,22	131,55	3,59	-	-	-	-	-	-	-	-
Cloro residual (mg/L)	-	-	-	-	0	0,87	0,11	0,20	0	0,08	0,03	0,03

LEGENDA: MÍN – mínimo / MÁX – máximo / MÉD- média / FDAA: filtro descendente de areia e antracito/FAAG – Filtro Ascendente de Areia Grossa / DP- Desvio padrão / * média aritmética e desvio padrão calculados excluindo os valores obtidos nos períodos de maturação dos filtros.

Ocorreu um pico de turbidez em ambos os filtros nos primeiros 10 minutos de ensaio, que diminuiu gradativamente ao longo da primeira hora de operação, resultando em 50 minutos de maturação inicial (ver Figura 5). Excluindo os períodos de maturação registrados no início do ensaio e após a realização das descargas de fundo intermediárias, o FAAG apresentou 95% das amostras com turbidez inferior a 0,5 NTU e 51,6%, a 0,3 NTU.

O FDAA reteve todos os picos de turbidez resultantes das descargas de fundo no FAAG, e, excluindo o período de maturação registrado no início do ensaio, 98,4% das amostras do FDAA apresentaram turbidez inferior a 0,5 NTU e 46,8%, inferior a 0,3 NTU, o que indica a elevada robustez do sistema de dupla filtração em produzir efluente estável e abaixo do valor máximo permitido no Padrão de Potabilidade (ver Figura 5, na escala vertical do lado direito).

Dantas e Di Bernardo (2006) também obtiveram resultados consistentemente inferiores a 0,5 NTU para efluente de filtro descendente de areia em sistema piloto de dupla filtração para tratamento de água com elevada turbidez (entre 100 e 300 NTU), embora o tempo de amadurecimento, nesse estudo, pudesse durar até 1 hora.

Em relação à cor aparente (ver Figura 6), verificou-se, excluindo o período de maturação dos filtros, uma frequência de 96,6% dos efluentes do FAAG e 95,3% do FDAA com cor aparente inferior a 15 uC. A cor verdadeira do efluente de ambos os filtros apresentou valores muito próximos aos da cor aparente ao longo de todo o ensaio, confirmando a eficiência dos mesmos em reter a sólidos em suspensão da água bruta. Destaca-se ainda que a dose de oxidante utilizada no ensaio (1 mg/L) foi inferior a prevista nos ensaios de tratabilidade e, como se esperava, houve um melhor desempenho do sistema piloto na oxidação da matéria orgânica e remoção de cor.

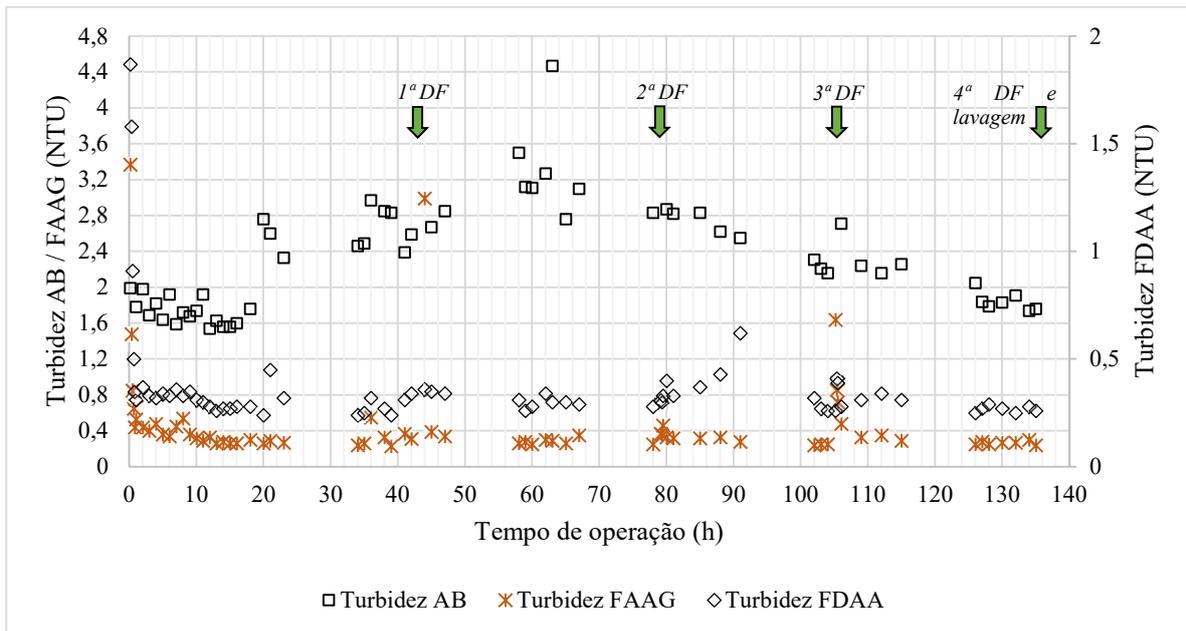


Figura 5 – Variação de turbidez na água bruta e qualidade do efluente dos filtros (Ensaio DF-TB) – Água bruta com baixas turbidez e cor. LEGENDA: AB- água bruta / FDAA: filtro descendente de areia e antracito / FAAG – Filtro Ascendente de Areia Grossa / DF – Descarga de Fundo. Condições Do Ensaio: Dose de coagulante (PAC) -12 mg/L / Dose de oxidante (Cloro) - 1 mg/L / Taxa de filtração média do FDAA - 145 m³/m².dia / Taxa de filtração média do FAAG - 81 m³/m².dia.

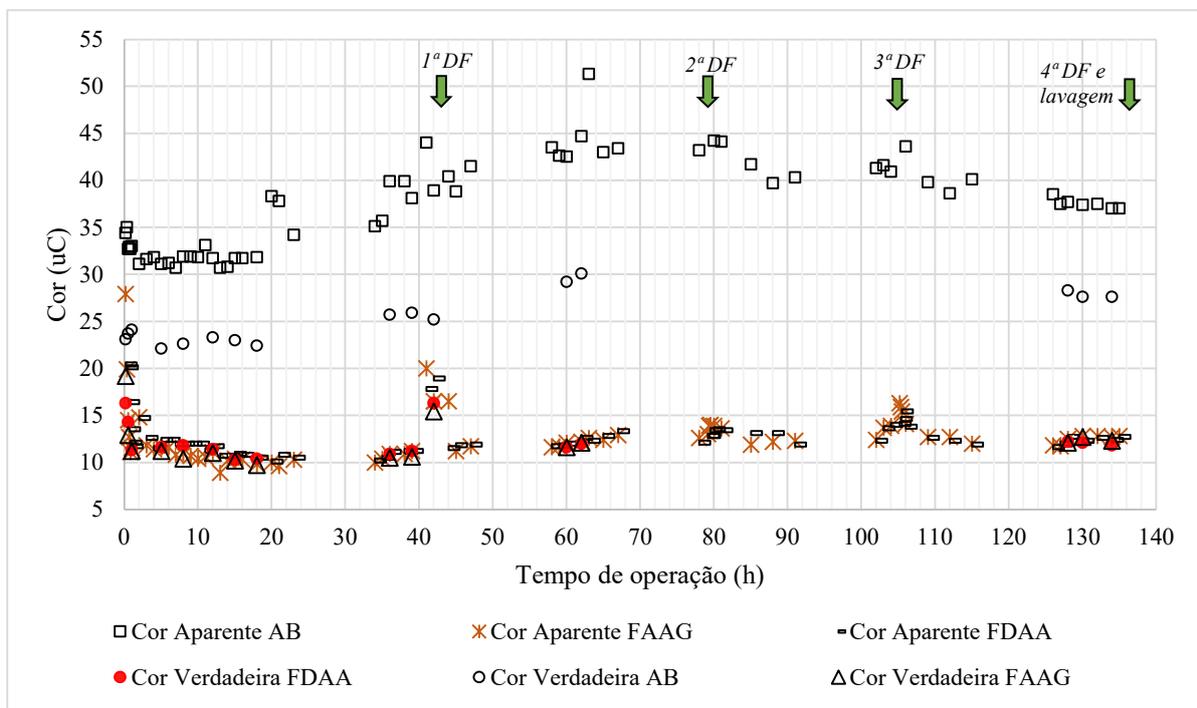


Figura 6 – Cor (aparente e verdadeira) na água bruta e no efluente dos filtros (Ensaio DF-TB). – Água bruta com baixas turbidez e cor. LEGENDA: AB- água bruta / FDAA: filtro descendente de areia e antracito / FAAG – Filtro Ascendente de Areia Grossa / DF – Descarga de Fundo. Condições Do Ensaio: Dose de coagulante (PAC) -12 mg/L / Dose de oxidante (Cloro) - 1 mg/L / Taxa de filtração média do FDAA - 145 m³/m².dia / Taxa de filtração média do FAAG - 81 m³/m².dia.

A evolução da perda de carga no FAAG está apresentada na Figura 7. Nas primeiras 36 horas de ensaio, o nível de água não era visível no piezômetro, indicando uma lenta evolução da perda de carga inicial. Devido a impossibilidade de acompanhar a IP no período noturno (por questões de segurança), o ensaio foi encerrado após 135 horas de operação, quando a perda de carga atingiu 210 cm dos 240 cm de carga hidráulica disponível. Como neste momento o efluente apresentava turbidez inferior a 0,5 NTU, o critério para encerramento do ensaio foi o de alcance da carga hidráulica.

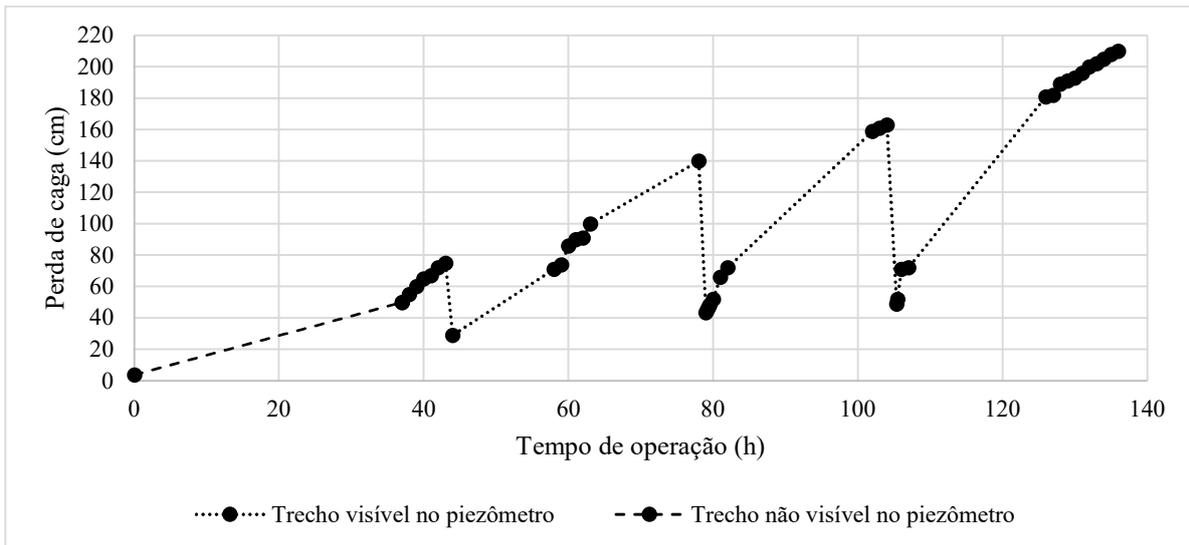


Figura 7 – Perda de carga no FAAG (Ensaio DF-TB). LEGENDA: FAAG – Filtro descendente de areia grossa. Condições Do Ensaio: Dose de coagulante (PAC) -12 mg/L / Dose de oxidante (Cloro) - 1 mg/L / Taxa de filtração média do FDAA - 145 m³/m².dia / Taxa de filtração média do FAAG - 81 m³/m².dia/ Carga hidráulica disponível no FAAG – 240 cm.

Constatou-se que a realização das descargas de fundo foi eficaz em remover impurezas do FAAG, resultando em reduções consideráveis de perda de carga e prolongando a sua carreira de filtração. Durante todo o ensaio a perda de carga no FDAA foi inferior a 39 cm, faixa visível no piezômetro, o que comprovou que o FAAG foi eficiente em “amortecer” a perda de carga do FDAA mediante redução da turbidez afluente neste filtro. Dessa forma, mesmo sendo capaz de reter as variações da água pré-filtrada em decorrência das descargas de fundo, o FDAA teve pouca contribuição na remoção global de sólidos em suspensão do sistema, dados os valores de perda de carga e turbidez resultantes neste filtro.

ENSAIO DE DUPLA FILTRAÇÃO – ÁGUA COM TURBIDEZ MODERADA (DF-TM)

Com base nos ensaios de tratabilidade, a dose do coagulante (PAC) inicialmente adotada no ensaio de DF-TM foi de 15 mg/L. Devido a problemas no controle da bomba dosadora, a pré-oxidação foi feita com uma dose média de cloro menor do que nos ensaios anteriores: 0,5 mg/L. O resumo dos dados obtidos nesse ensaio está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5- Resultados do ensaio DF-TM

Parâmetro	Água Bruta				Efluente FAAG				Efluente FDAA			
	MÍN	MÁX	MÉD	DP	MÍN	MÁX	MÉD *	DP *	MÍN	MÁX	MÉD *	DP *
Temperatura (°C)	26,1	29,4	27,4	0,76	26,1	29,6	27,4	0,82	26,1	29,6	27,5	0,82

pH	6,57	6,96	6,76	0,09	6,43	7,32	6,65	0,09	6,56	7,15	6,70	0,09
Turbidez (NTU)	3,07	6,76	4,73	1,19	0,26	4,79	0,58	0,31	0,24	4,00	0,36	0,12
Cor Aparente (Uc)	60,5	72,2	67,4	3,73	10,8	50,1	15,6	2,77	11,4	46,3	13,9	1,83
Cor Verdadeira (Uc)	46,6	53,7	50,5	2,53	11,5	32,9	12,9	1,24	9,7	31,6	12,9	1,31
PZ (mV)	- 19,5 3	-8,86	-13,09	2,95	-7,29	-2,05	-4,23	1,30	-6,42	-0,13	-2,32	2,13
Alcalinidade (mgCaCO₃/L)	116, 54	123,03	120,06	2,38	-	-	-	-	-	-	-	-
Cloro residual (mg/L)	-	-	-	-	0	0,2	0,05	0,02	0	0,09	0,03	0,02

LEGENDA: MÍN – mínimo / MÁX – máximo / MÉD- média / FDAA: filtro descendente de areia e antracito/FAAG – Filtro Ascendente de Areia Grossa / DP- Desvio padrão / * média aritmética e desvio padrão calculados excluindo os valores obtidos no período de maturação inicial dos filtros.

Na primeira hora de ensaio ocorreu um aumento gradativo da turbidez (ver Figura 8) no efluente dos dois filtros, uma tendência diferente do que se observou nos dois ensaios anteriores. Esse aumento na turbidez fez com que a dose de coagulante prevista inicialmente no ensaio de *jar test* +FLA (15 mg/L) fosse ajustada para 20 mg/L na segunda hora de ensaio. Dessa forma, verificou-se um período de maturação inicial de 4h para os dois filtros.

Esse elevado tempo de maturação pode ter acontecido pela dose inadequada de coagulante adotada no início do ensaio e consequente desestabilização ineficaz das partículas coloidais. Kobayashi et al. (2013) observaram resultado semelhante em um sistema piloto constituído de filtro de areia precedido por coagulação e sedimentação, e verificaram que o aumento da turbidez da água bruta aumentou o tempo de maturação dos filtros, ao passo que o aumento da dose de coagulante diminuiu o tempo necessário para sua estabilização.

Excluindo-se os valores de maturação registrados para as primeiras horas de ensaio, obteve-se uma média de turbidez de 0,58 NTU e de 0,36 NTU para os filtros ascendente e descendente, respectivamente. O percentual de valores abaixo de 0,5 NTU no FDAA, excluindo a maturação inicial, foi de 93%, o que aponta para o sistema de dupla filtração como uma alternativa eficiente para remoção de turbidez em águas de turbidez moderada.

O comportamento do sistema no que se refere à cor aparente (ver Figura 9) foi semelhante ao que aconteceu com a turbidez. O percentual de valores abaixo de 15 uC no efluente do filtro descendente, excluindo a maturação inicial, foi de 71%. A dose mais baixa de oxidante provavelmente contribuiu para menor eficiência desse sistema no que se refere a remoção de cor; apesar disso, o sistema apresentou efluente final com média de cor aparente de 13,9 uC, o que reforça o potencial do sistema de dupla filtração para tratamento da água da Lagoa do Jiqui nos eventos pontuais de chuvas intensas.

Os resultados de cor verdadeira no efluente dos dois filtros resultaram muito próximos, o que indica que a maior parte da turbidez era retida no filtro ascendente, diminuindo a carga de sólidos afluente ao filtro descendente e

prolongando a sua carreira de filtração. Resultados semelhantes em sistema piloto de dupla filtração com filtro ascendente de areia grossa seguido de filtro descendente de areia foram obtidos por Gusmão e Di Bernardo (2004), no tratamento de água bruta com turbidez variando entre 8 e 12 NTU, no qual não houve diferenças significativas entre o efluente dos filtros ascendente e descendente em relação à turbidez, contagem de partículas (na faixa de 2 a 48 μm), cor verdadeira, coliformes totais, E. coli, ferro total e manganês total.

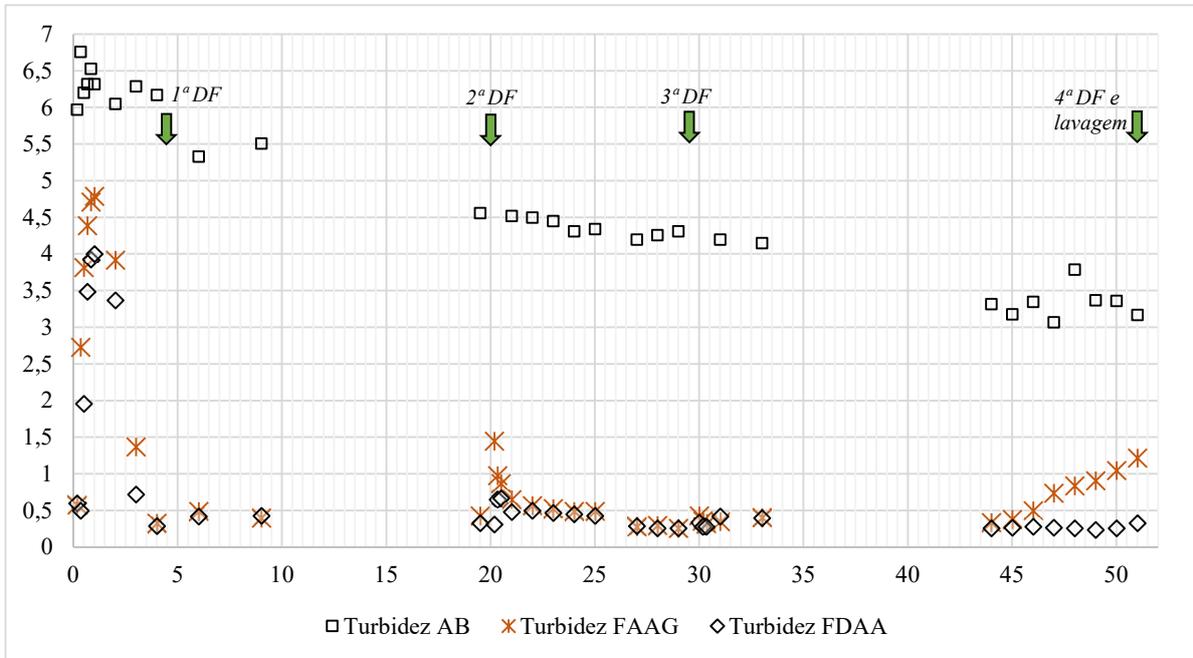


Figura 8 – Variação de turbidez na água bruta e qualidade do efluente dos filtros (Ensaio DF-TM).
LEGENDA: AB- água bruta / FDAA: filtro descendente de areia e antracito / FAAG – Filtro Ascendente de Areia Grossa / DF – Descarga de Fundo. Condições do Ensaio: Dose de coagulante (PAC) -15/20 mg/L / Dose de oxidante (Cloro) – 0,5 mg/L / Taxa de filtração média do FDAA - 142 m³/m².dia / Taxa de filtração média do FAAG - 79 m³/m².dia.

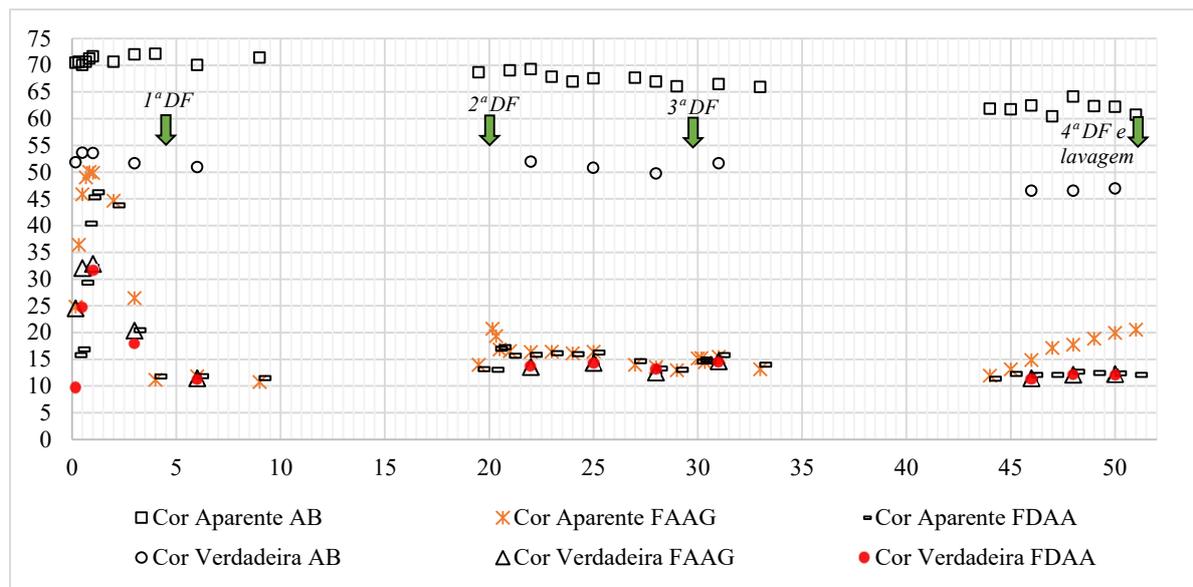


Figura 9 – Cor (aparente e verdadeira) na água bruta e no efluente dos filtros (Ensaio DF-TM).
LEGENDA: AB- água bruta / FDAA: filtro descendente de areia e antracito / FAAG – Filtro Ascendente de Areia Grossa / DF – Descarga de Fundo. Condições do Ensaio: Dose de coagulante (PAC) -15/20

mg/L / Dose de oxidante (Cloro) – 0,5 mg/L / Taxa de filtração média do FDAA - 142 m³/m².dia / Taxa de filtração média do FAAG - 79 m³/m².dia

A evolução da perda de carga no FAAG no início do ensaio DF-TM (ver Figura 10) foi notadamente mais rápida do que a observada no ensaio anterior (DF-TB). No ensaio DF-TB, demorou aproximadamente 37h para a perda de carga atingir o valor observado na segunda hora do ensaio DF-TM. A maior inclinação do gráfico nas primeiras 4 horas de ensaio aponta para uma evolução mais rápida da perda de carga nesse período, o que pode ser justificado pelos maiores valores de turbidez da água bruta e consequente retenção de partículas no filtro. Além disso, verificou-se que o encerramento desse ensaio se deu por transpasse no FAAG após 50h de operação.

Foram realizadas quatro descargas de fundo que resultaram em reduções consideráveis de perda de carga, prolongando a carreira de filtração do FAAG. Durante todo o ensaio, o nível de água no piezômetro do FDAA ficou abaixo do limite visível, o que comprova que mesmo na condição de água bruta com maior turbidez, o FAAG foi eficiente em reter a maior parte das partículas em suspensão provenientes da água bruta, evitando a elevação da perda de carga no FDAA, e prolongando a sua carreira de filtração, reforçando ainda a pequena contribuição do FDAA na remoção global de sólidos em suspensão do sistema.

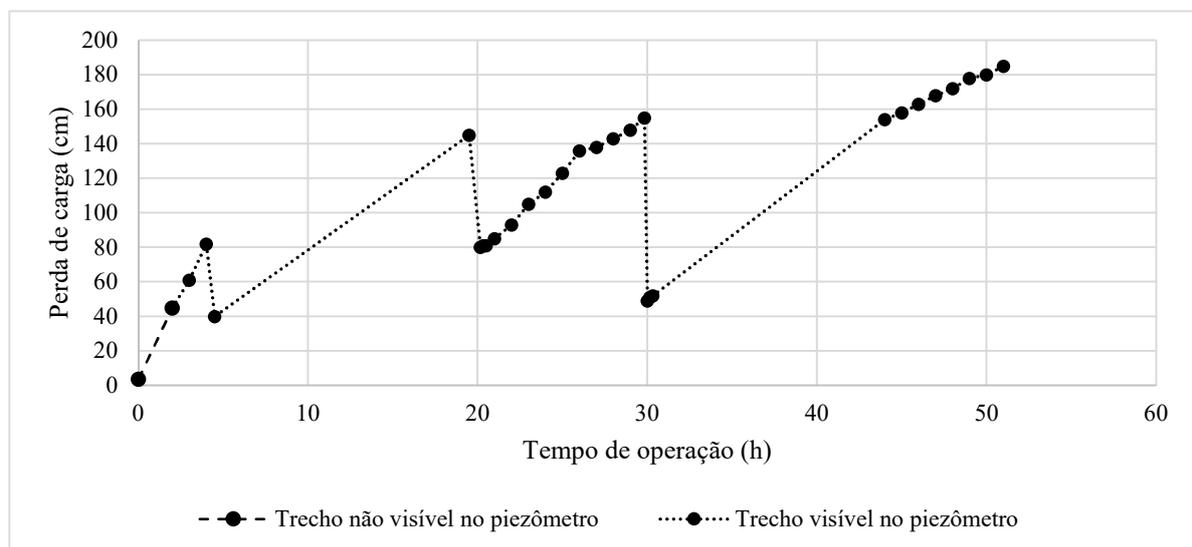


Figura 10 – Perda de carga no FAAG (Ensaio DF-TM). LEGENDA: FAAG – Filtro descendente de areia grossa Condições do Ensaio: Dose de coagulante (PAC) -15/20 mg/L / Dose de oxidante (Cloro) – 0,5 mg/L / Taxa de filtração média do FDAA - 142 m³/m².dia / Taxa de filtração média do FAAG - 79 m³/m².dia. / Carga hidráulica disponível no FAAG – 240 cm.

CONCLUSÕES

O sistema de filtração direta com FDAA é eficaz para remoção de cor aparente e turbidez de mananciais com baixa turbidez e cor moderada, e produz efluente consistentemente dentro do padrão de potabilidade no que se refere a esses parâmetros. No entanto, o desempenho do sistema é insatisfatório devido a rápida evolução da perda de carga, que resulta em carreiras de filtração muito curtas.

O sistema de dupla filtração (FAAG+FDAA) é robusto e estável para tratamento de água de lagoa litorânea com baixa/moderada turbidez e cor moderada, mesmo após eventos de chuvas que pioram a qualidade da água bruta, produzindo efluente com turbidez e cor aparente consistentemente inferiores a 0,5 NTU e 15 uC, respectivamente, e resultando em longas carreiras de filtração.

No sistema de dupla filtração, a maior parte da retenção de sólidos ocorre no filtro ascendente. Apesar disso, o filtro descendente é essencial para manter a estabilidade do sistema após a realização das descargas de fundo e ocorrência de transpasse no filtro ascendente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria GM/MS N° 888, de 4 De Maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n° 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 maio 2021, N° 85, Seção 1, p.127.
2. BORGES, R. C. et al. Use of geographic information system (GIS) in the characterization of the Cunha Canal, Rio de Janeiro, Brazil: effects of the urbanization on water quality. *Environmental Earth Sciences*, v. 73, n. 3, p. 1345–1356, 2015.
3. DALSSASSO, R. L.; SENS, M. L. Filtração direta com pré-floculação e coagulação com sulfato de alumínio e hidroxiclreto de alumínio: estudo com água de manancial eutrofizado. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 241–249, 2006.
4. DANTAS, A. D. B.; DI BERNARDO, L. Performance of two-stage filtration system for treating high turbidity water. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, v. 55, n. 7–8, p. 499–515, 2006.
5. DI BERNARDO, L. Filtração Direta Aplicada a Pequenas Comunidades. 1° ed. São Carlos. Projeto ProSab, p.498, 2003.
6. FERREIRA, S. J. F. et al. Impact of rapid urbanization on stream water quality in the Brazilian Amazon. *Environmental Earth Sciences*, v. 80, n. 8, p. 1–16, 2021.
7. FERREIRA FILHO, S. S. Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento. 1ª edição. Rio de Janeiro : Elsevier, 2017.
8. GUSMÃO, P. T. R. DE; DI BERNARDO, L. Evaluation of two-stage filtration systems in drinking water treatment. *Journal of Water Supply: Research and Technology*. p. 519–530, 2004.
9. HÉLLER, L.; PÁDUA, V. L. Abastecimento de água para consumo humano. 2ª Edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.
10. KOBAYASHI, Y. et al. Experimental evaluations of water treatment systems using a pilot-scale plant for adaptations to a sharp increase in raw-water turbidity caused by climate change. *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 13, n. 1, p. 139–146, 2013.
11. KOZYATNYK, I. Filtration Materials for Groundwater: A Guide to Good Practice. London: IWA Publishing, 2016.
12. LIMA, J. A. P.; CAPELO-NETO, J. Modified double filtration using pressured pre-filter before upflow filter in eutrophic reservoirs. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 20, n. 1, p. 89–102, 2015.
13. MELO, L. D. V. et al. Adequacy analysis of drinking water treatment technologies in regard to the parameter turbidity, considering the quality of natural waters treated by large-scale WTPs in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 191, n. 6, 2019.
14. NATAL. Secretaria Municipal de Habitação, Regularização fundiária e Projetos Estruturantes - SEHARPE. Situação dos Serviços de abastecimento de Água Potável e de Esgotamento Sanitário. Plano municipal de saneamento básico do município de Natal/RN. Natal, produto 02 - Diagnóstico da situação do saneamento, Abril, 2015.
15. QIN, H. P. et al. Water quality changes during rapid urbanization in the Shenzhen river catchment: An integrated view of socio-economic and infrastructure development. *Sustainability (Switzerland)*, v. 6, n. 10, p. 7433–7451, 2014.
16. QUEIROZ, S. C. B. et al. Dupla filtração para o tratamento de água eutrofizada na região norte do Brasil. *Revista DAE*, v. 66, n. 212, p. 41–60, 2018.
17. REN, W. et al. Urbanization, land use, and water quality in Shanghai 1947-1996. *Environment International*, v. 29, n. 5, p. 649–659, 2003
18. 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.
19. TWORT, A. C.; RATNAYAKA, D. D.; BRANDT, M. J. *Water Supply 5th Edition*. Ed. London, 2000.