

Dupla filtração modificada utilizando filtro de pressão a montante de filtro ascendente no tratamento de águas eutrofizadas

Modified double filtration using pressured pre-filter before upflow filter in eutrophic reservoirs

José Airton Pereira Lima¹, José Capelo-Neto²

RESUMO

A implantação de uma unidade de pré-tratamento a montante de um filtro ascendente (FA) existente objetiva condicionar a água bruta eutrofizada à capacidade de tratamento do FA. Essa solução esbarra na necessidade de se instalar essa unidade de pré-tratamento com cota mais elevada que o filtro a jusante. Nesta pesquisa, a instalação de um filtro de pressão de fluxo descendente 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 (FDA). O pré-filtro de pressão com melhor eficiência, o PFP1, apresentou uma remoção de 50% de cor aparente e 63% 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 as perdas da água tratada de 11,7 para 4,5%.

Palavras-chave: dupla filtração modificada; pré-tratamento; filtros de pressão; tratamento de águas eutrofizadas.

ABSTRACT

The implementation of a pretreatment unit before existing upward filter, to condition the eutrophic raw waters to its capacity, is an option which runs into a problem of technical nature, the need of a pretreatment unit with enough hydraulic load to properly feed the existing filter. Typically, the available studies on double filtration present upward filters followed by descendant ones. In this study, the installation of a pressure filter downflow adapted the raw water with high algae concentration to the upward direct filtration system limitations, improving the quality of water produced and reducing losses by washing. The pressure filter with better efficiency was the PFP1 filter showed a removal of 50% of apparent color and 63% of turbidity. The overall efficiency of the PFP/FA system was satisfactory, presenting final turbidity of less than 0.5 uT, apparent color around 5 uH and reducing losses from 11.7 to 4.5% of the total treated water.

Keywords: double filtration; raw water pre conditioning; pressure filters; eutrophic water treatment.

INTRODUÇÃO

A filtração direta ascendente (FDA) tem sido selecionada para o tratamento de água de razoável qualidade com baixa cor, turbidez e concentração de fitoplâncton. No entanto, caso ocorram mudanças na qualidade da água bruta, vários problemas podem acontecer, tais como: baixa qualidade da água tratada, altas perdas de água tratada devido à necessidade de lavagens frequentes, além de um maior potencial de geração de subprodutos da cloração.

Um exemplo desse desafio pode ser identificado na Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), onde cerca de 70% dos sistemas de tratamento de água adotam como tecnologia a FDA. À época de

sua implantação, tal tecnologia era compatível com as características dos mananciais utilizados e com a legislação em vigor, porém, devido ao acelerado processo de eutrofização e florações dos mais diversos tipos de cianobactérias, essa solução tem enfrentado dificuldades no atendimento dos padrões de potabilidade, principalmente agora com as novas exigências de turbidez da Portaria do Ministério da Saúde (MS) nº 2.914/2011.

A implantação de uma unidade a montante da FDA, com objetivo de pré-condicionar a qualidade da água bruta e adequá-la à tecnologia existente, pode apresentar-se como solução. No entanto, tal opção esbarra em um problema de caráter técnico: a necessidade de instalação

¹Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Coordenador Técnico de Produção da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) - Fortaleza (CE), Brasil.

²Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC - Fortaleza (CE), Brasil.

Endereço para correspondência: José Capelo-Neto - Campus do Pici, Bloco 713, 1º Andar - Centro de Tecnologia - 60451-970 - Fortaleza (CE), Brasil - E-mail: capelo@ufc.br

Recebido: 04/02/13 - Aceito: 09/06/14 - Reg. ABES: 110892

de unidades de pré-tratamento muito altas a montante do FDA, o que pode inviabilizar o aproveitamento das estruturas existentes.

Lima (2008) reporta que, em decorrência de uma necessidade operacional na ETA Tapera em Aquiráz (CE), foi instalado um filtro de pressão em substituição ao FDA existente enquanto era realizada sua manutenção. Após a conclusão dos serviços de recuperação, o FDA foi novamente posto em operação e, devido à elevada densidade de fitoplâncton da água bruta, resolveu-se manter o filtro de pressão instalado a montante da torre de nível, caracterizando-se, assim, uma nova variável de dupla filtração (DF). Os dados obtidos mostraram um aumento na carreira de filtração da ordem de 600% em relação ao filtro ascendente (FA) operando individualmente e uma redução do volume de água de lavagem em torno de 40%, além de uma maior garantia do atendimento aos padrões de potabilidade (cor e turbidez) da água tratada.

Segundo Dantas e Di Bernardo (2008), dentre as principais tecnologias disponíveis para o tratamento de água, a FDA requer menor área e tem menor custo de implantação e operação, quando comparada ao ciclo completo. No entanto, a FDA apresenta sérias limitações relativas à capacidade de tratamento de água bruta com baixa qualidade hidrobiológica, sendo recomendado um tratamento complementar em outro filtro, caracterizando-se, assim, a DF. A DF permite o tratamento de água de pior qualidade, oferece maior segurança com relação às variações de qualidade da água bruta, apresenta maior remoção global de micro-organismos, além de dispensar o descarte de água pré-filtrada no início da carreira de filtração (RIBAS; BERNAL; PERRAMÓN, 2000).

A partir desta experiência e visando aproveitar os sistemas de tratamento de água já em funcionamento, a implantação de um PFP pode representar uma alternativa tecnicamente viável para adequar a qualidade da água bruta às limitações da FDA. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo principal investigar a viabilidade técnica da implantação de um sistema complementar de tratamento de água de mananciais eutrofizados, utilizando filtro de pressão a montante da FDA, denominada doravante dupla filtração modificada. Dentre os objetivos secundários, pretendeu-se investigar diversas granulometrias e taxas de filtração, além de se avaliar o impacto dessa tecnologia sobre as perdas de água tratada utilizada para lavagem dos filtros.

METODOLOGIA

Para realizar o presente estudo, foi utilizada uma estação de tratamento de água em escala piloto, instalada na ETA-Aquiraz (localizada na Região Metropolitana de Fortaleza). A água bruta utilizada no sistema foi captada na lagoa do Catu, manancial cujo histórico apresentou níveis elevados de cianobactérias. Verificou-se que entre os meses de junho de 2012 e agosto de 2013 as concentrações e cianobactérias variaram entre $3,5 \times 10^4$ a $2,5 \times 10^5$, com média de $1,25 \times 10^5$ células mL^{-1} (CAGECE, 2013).

A unidade piloto (Figura 1) constituiu-se de uma ETA tipo DF modificada onde três pré-filtros de pressão (PFPs) de fluxo descendente, instalados em paralelo para permitir funcionamento individual, foram interligados em série a um filtro de fluxo ascendente (FA). O sistema contava ainda com barriletes e válvulas de esfera instaladas tanto a montante quanto a jusante de cada filtro de forma a permitir diversas configurações operacionais.

Tanto os PFPs quanto o FA foram construídos em tubos PVC DEF[®]F com 200 mm de diâmetro (área superficial de $0,0314 \text{ m}^2$). Os PFPs tinham uma altura total de 1,50 m e foram operados em fluxo descendente. Água tratada, retirada diretamente do reservatório elevado da ETA-Aquiraz, foi usada nas lavagens dos PFPs com velocidade ascensional $0,60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ e tempo de aproximadamente 10 minutos. Verificou-se experimentalmente que tal procedimento foi suficiente para a limpeza completa do meio filtrante.

A camada suporte dos PFPs foi definida a partir de pesquisas em diversos autores (SALES *et al.*, 2005; BRASIL, 2007; MOTA & PÁDUA, 2004). A escolha do leito filtrante teve como fundamento a utilização de granulometria maior do que a usualmente encontrada nos filtros ascendentes. Assim, o menor grão do leito filtrante do PFP1 foi especificado com granulometria de 2,00 mm, aumentando gradativamente ao longo do leito e nos demais pré-filtros (Quadro 1). Tanto a camada suporte quanto o meio filtrante foram compostos por areia quartzolítica.

O FA tinha altura de 2,2 m, uma entrada na parte inferior e uma saída na parte superior. A taxa de filtração (T) foi mantida em $200 \text{ m}^3\cdot\text{m}^2\cdot\text{dia}^{-1}$, e a vazão, em $0,262 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. A taxa adotada teve como propósito utilizar o limite superior proposto por diversos autores (DI BERNARDO; ROCHA, 1990; DI BERNARDO & PAZ, 2008) e simular uma condição crítica de operação. O material filtrante utilizado (Quadro 2) foi composto de areia quartzolítica com esfericidade média de aproximadamente 0,8. As lavagens do FA foram realizadas com velocidade ascensional de $0,90 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, suficiente para a expansão do leito filtrante. O tempo de lavagem adotado foi de aproximadamente 10 minutos. Confirmou-se experimentalmente que tais condições foram suficientes para a limpeza completa do leito.

A vazão excedente entre o PFP e o FA foi descartada por intermédio de uma válvula instalada na interligação entre as unidades. Esse mesmo ponto de descarga foi também utilizado como ponto de coleta de água pré-filtrada para análises e monitoramento da eficiência do PFP. Para cada taxa de filtração e cada PFP, foram realizadas três carreiras de filtração sucessivas, intercaladas pela lavagem do PFP. O FA foi mantido em operação sem nenhuma interferência ao longo das três carreiras sucessivas, sendo lavado ao final da terceira carreira do PFP. Para o controle da vazão, foram instalados dois rotâmetros calibrados, um para a água bruta e outro para a pré-filtrada, o que permitia o conhecimento da vazão descartada. Foram instalados também dois hidrômetros, um na entrada da ETA piloto (água bruta

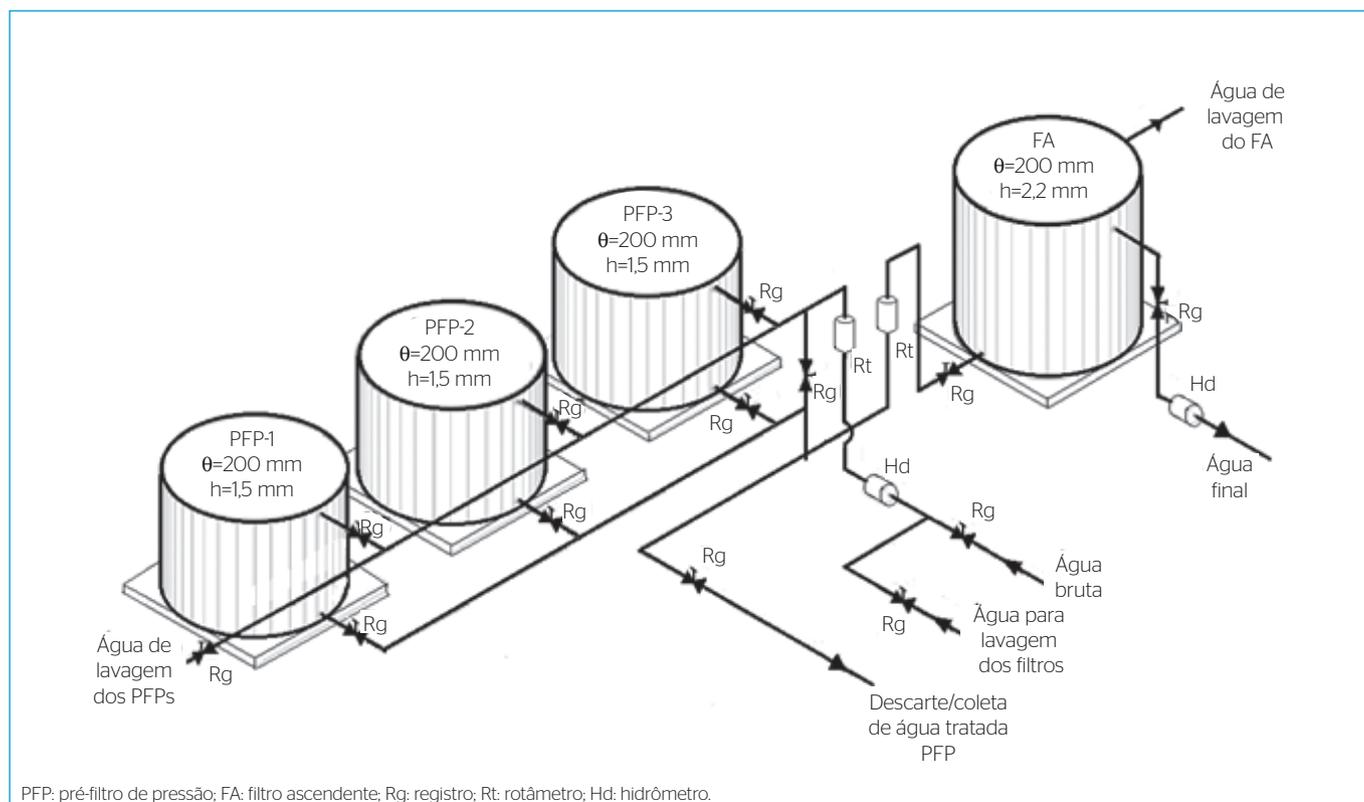


Figura 1 - Detalhe isométrico do aparato experimental utilizado nos experimentos.

Quadro 1 - Características do leito filtrante dos pré-filtros de pressão.

Característica	PFP 1	PFP 2	PFP 3
Leito filtrante	Areia 1	Areia 1	Areia 1
Menor grão (mm)	2,00	2,80	4,00
Maior grão (mm)	3,36	4,00	6,40
Altura camada (m)	0,40	0,25	0,40
Tamanho efetivo (mm)	2,40	3,10	4,80
Coefficiente de desuniformidade	1,20	1,10	1,30
	Areia 2	Areia 2	Areia 2
Menor grão (mm)	3,36	4,00	6,40
Maior grão (mm)	4,90	5,66	8,00
Altura camada (m)	0,10	0,25	0,10
Tamanho efetivo (mm)	3,60	4,50	6,70
Coefficiente de desuniformidade	1,10	1,10	1,10

PFP: pré-filtro de pressão.

e água de lavagem dos filtros) e um na saída de água filtrada do FA. Além das vazões médias medidas ao longo das carreiras de filtração, os hidrômetros foram utilizados para obtenção dos volumes tratados e gastos nas lavagens dos filtros.

O acompanhamento da eficiência do sistema foi realizado por meio das análises de pH, cor aparente e turbidez nas saídas do

Quadro 2 - Características do leito filtrante do filtro ascendente.

Leito filtrante	Areia 1
Menor grão (mm)	0,59
Maior grão (mm)	1,00
Altura camada (m)	0,20
Tamanho efetivo (mm)	0,65
Coefficiente de desuniformidade	1,10
	Areia 2
Menor grão (mm)	1,00
Maior grão (mm)	1,68
Altura camada (m)	0,40
Tamanho efetivo (mm)	1,20
Coefficiente de desuniformidade	1,10
	Areia 3
Menor grão (mm)	1,68
Maior grão (mm)	2,00
Altura camada (m)	0,30
Tamanho efetivo (mm)	1,75
Coefficiente de desuniformidade	1,10

PFPP e do FA, além de cloro residual na saída do FA. As leituras da perda de carga e as coletas de amostras na saída do PFPP e do FA foram realizadas a cada 30 minutos a partir do início do experimento. Em cada etapa do experimento foram coletadas amostras na segunda carreira de filtração para contagem do fitoplâncton após uma hora de operação do sistema utilizando metodologia proposta por Komárek e Anagnostidis (1989; 1999; 2005). As análises físico-químicas obedeceram aos *Standard Methods* (AWWA, 2005). As medidas de perda de carga foram realizadas com um manômetro diferencial digital da marca Instruterm, modelo MPD-79. As análises de cor foram realizadas pelo método de platina-cobalto com limite de quantificação de 2,5 uH. O turbidímetro portátil da Hach, Modelo 2100P, com limite de quantificação de 0,01 uT, foi utilizado para análises de turbidez.

O experimento foi dividido em duas etapas: na primeira (pré-operação), foram realizadas duas carreiras de filtração somente com FDA utilizando o FA. Ainda na primeira etapa, foram realizadas nove carreiras com o conjunto PFPP1/FA, adotando-se as mesmas dosagens e os mesmos produtos químicos utilizados na ETA-Aquiraz. Os resultados apresentados nos gráficos são resultados médios dessas corridas. As dosagens foram obtidas por intermédio de ensaios de filtração em escala de bancada, quais sejam: coagulante (8 mg.L⁻¹ de hidróxi-cloro de alumínio 23%, marca Beraca Sabará), auxiliar de coagulação (0,7 mg.L⁻¹ de polímero catiônico, marca Polidadimac). Foi aplicado também 1,5 mg.L⁻¹ de hipoclorito de cálcio (65% cloro ativo, marca Hypocal) entre o PFPP e o FA de forma auxiliar o tratamento e simular a operação da ETA em escala real. A primeira etapa teve como objetivo identificar as condições de operação do equipamento: realizar ajustes e monitorar as vazões, a perda de carga, o volume produzido, as dosagens e a qualidade da água de cada uma das unidades filtrantes; permitiu também definir os parâmetros a serem utilizados para o encerramento das carreiras de filtração da segunda etapa, conforme listado a seguir:

1. PFPP: atingir perda de carga de 2,0 m ou turbidez em torno de 50% da turbidez da água afluyente;
2. FA: atingir perda de carga de 2,0 m e/ou turbidez em torno de 1,00 uT.

Na segunda etapa foram realizadas carreiras de filtração em triplicata com as mesmas dosagens citadas para as taxas de filtração de 300, 400 e 500 m³.m⁻².dia⁻¹ em cada PFPP, enquanto o FA funcionou com taxa constante de 200 m³.m⁻².dia⁻¹ em uma única carreira de filtração. Os objetivos desta etapa foram comparar a eficiência dos três PFPPs e definir os principais parâmetros de projeto a serem adotados nesta tecnologia: taxa de filtração e granulometria do leito filtrante. No final do experimento, as eficiências dos PFPPs foram comparadas gráfica e estatisticamente por meio da análise de variância (ANOVA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros pH, cor aparente e turbidez da água bruta no período do estudo são apresentados na Tabela 1. Observa-se que não houve uma grande variabilidade ao longo período experimental.

Primeira etapa

Na primeira etapa, utilizando-se somente o FA com taxa de filtração de 200 m³.m⁻².dia⁻¹, a duração da carreira foi de 10,5 horas, sendo encerrada devido ao fato de a perda de carga ter atingido o valor limite adotado (2,00 m). Nota-se que a água filtrada atendeu ao limite de turbidez da Portaria n° 2.914/2011 até aproximadamente 8 horas de operação (Figura 2). Observou-se também remoção de cor aparente, passando de 50,0 uH para abaixo de 5,0 uH em todas as análises realizadas. O residual de cloro na saída do FA foi, em média, de 0,40 mg.L⁻¹ e o volume total de água produzido foi de 2,65 m³, com uma vazão de operação de 0,252 m³.h⁻¹. Na lavagem desse filtro foram consumidos 0,31 m³ de água tratada (11,7% do total produzido).

Ainda como parte da primeira etapa, utilizou-se a configuração PFPP1/FA, ambos operando com taxa de filtração de 200 m³.m⁻².dia⁻¹ (Figura 3). Obteve-se uma carreira de filtração no FA e no PFPP1 de 49 e 10 horas, respectivamente, sem nenhuma descarga de fundo intermediária de forma a simular uma condição mais desfavorável. As carreiras do PFPP1 foram interrompidas, procedendo-se, então, à lavagem quando os valores de turbidez chegavam próximos aos da água afluyente (7,13 uT), mesmo com a perda de carga abaixo de 2,00 m.

O volume de água produzido foi de 13,41 m³, utilizando-se 0,37 m³ nas 5 lavagens do PFPP1 e 0,23 m³ no FA, correspondendo a um gasto total de 4,5% do volume produzido. A turbidez da água final permaneceu abaixo de 0,50 uT e a cor aparente manteve-se abaixo de 5,0 uH ao longo de todo o experimento. O cloro residual na saída do FA apresentou valor médio de 0,45 mg.L⁻¹, permanecendo sempre menor ou igual a 0,80 mg.L⁻¹.

Comparando-se as duas carreiras, sem e com a utilização do PFPP1, fica evidente o aumento da carreira de filtração do FA em cerca de 490% e a redução do volume de água de lavagem em 61,5%.

Tabela 1 - Características da água bruta durante o período do estudo.

Parâmetro	pH	Cor aparente (uH)	Turbidez (uT)
Número de análises	502	502	502
Valor mínimo	6,82	40	0,9
Valor médio	7,48	55	4,64
Valor máximo	8,32	60	7,85
Desvio padrão	0,32	5	0,65

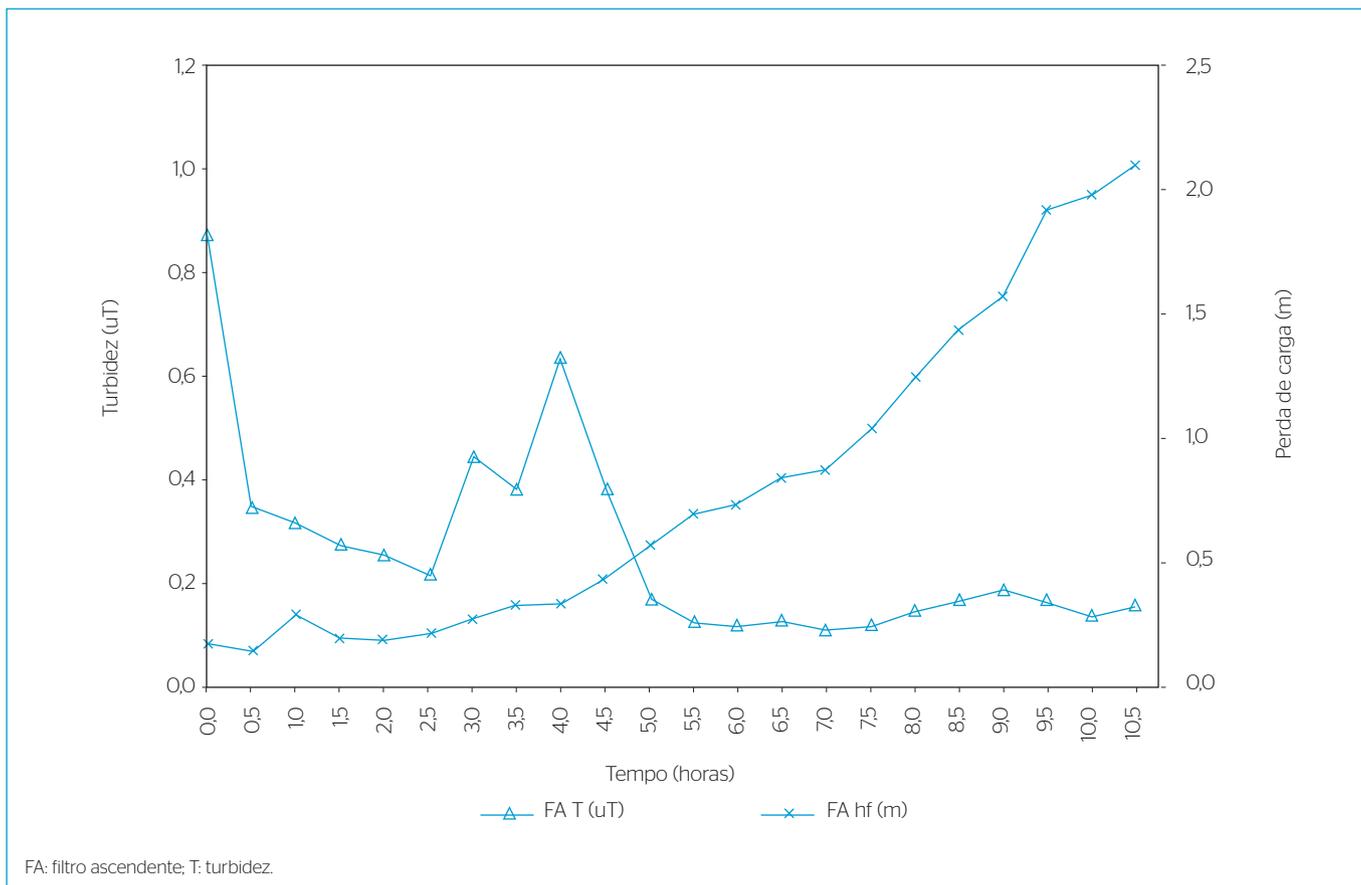


Figura 2 - Resultados de turbidez e perda de carga na corrida do filtro ascendente trabalhando isoladamente com $T=200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$.

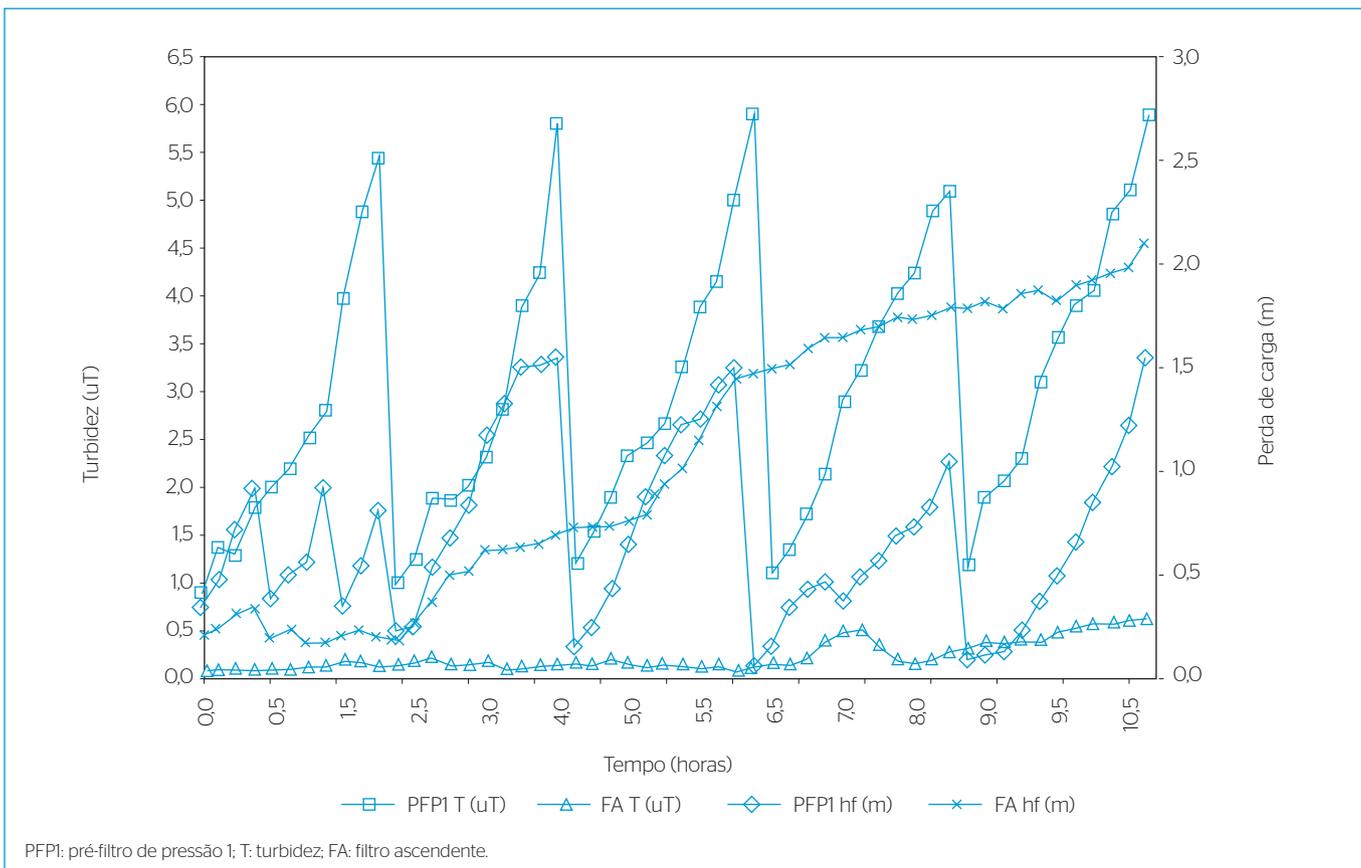


Figura 3 - Resultados de turbidez e perda de carga no pré-filtro de pressão 1 e no filtro ascendente com $T=200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$.

Segunda etapa

Na segunda etapa, cada um dos pré-filtros foi operado com taxas de 300, 400 e 500 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ com objetivo de se estudar a eficiência na remoção de turbidez, cor e fitoplâncton.

PPF1/FA ($T=300/200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$): o comportamento das três carreiras do PFP1 (Figura 4), no que se refere à turbidez e perda de carga, foi similar. A turbidez determinou o encerramento da carreira de filtração do PFP em 3 horas. Nota-se que a perda de carga no FA sofreu apenas uma pequena elevação (0,20 m) em relação à perda de carga inicial. A turbidez final apresentou-se sempre abaixo de 0,30 uT nas primeiras 6 horas e abaixo de 0,40 uT nas últimas 3 horas do experimento. Considerando a turbidez da água afluyente (6,82 uT) e a média na saída do PFP1 ($M=1,35 \text{ uT}$; $DP=0,90 \text{ uT}$), a remoção foi de 80,2%. A água filtrada final apresentou cor aparente menor ou igual a 5,0 uH ao longo das 9 horas do experimento.

PPF1/FA ($T=400/200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$): a turbidez determinou o encerramento da carreira de filtração do PFP1 em 2,5 horas. A remoção de turbidez no PFP1 foi de aproximadamente 62,9%, considerando o valor da turbidez na entrada do PFP1 de 6,93 uT e o valor médio de turbidez ($M=2,57 \text{ uT}$; $DP=1,11$) ao longo das 3 carreiras de filtração. A elevação da perda de carga no FA foi de apenas 0,25 m no final das 7,5 horas de operação. Com relação à turbidez da água final

na saída do FA, todos os valores se apresentaram abaixo de 0,50 uT (Figura 5). A cor aparente na saída do PFP1 variou entre 20,0 e 40,0 uH, com valor médio de 30,0 uH e remoção média de 40%. No efluente final do FA), todas as amostras apresentaram valores de cor aparente abaixo de 10,0 uH.

PPF1/FA ($T=500/200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$): a carreira de filtração do PFP1 foi encerrada com 2,5 horas devido aos elevados valores de turbidez (Figura 6). Considerando o valor da turbidez da água na entrada do pré-filtro (6,10 uT) e o valor médio na saída ($M=2,54 \text{ uT}$; $DP=1,05$), a remoção ficou em torno de 58,4%. A turbidez na saída do FA em todas as amostras se apresentou abaixo de 0,40 uT e a elevação da perda de carga foi de no máximo 0,45 m. Com relação à remoção da cor aparente, a eficiência do PFP1 foi pequena, semelhante à operação com a taxa de 400 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. A cor aparente na água final permaneceu estável (com valor máximo de 10,0 uH) ao longo deste experimento.

Com relação ao consumo de água de lavagem dos dois filtros PFP1/FA, os resultados não apresentaram variações significativas, sendo consumidos 7,5, 7,0 e 7,1% da água total produzida para as taxas de aplicação 300, 400 e 500 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, respectivamente.

A eficiência de remoção de fitoplâncton no pré-filtro, quando operado com taxa de 300 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, foi de 73,91%. Observou-se uma

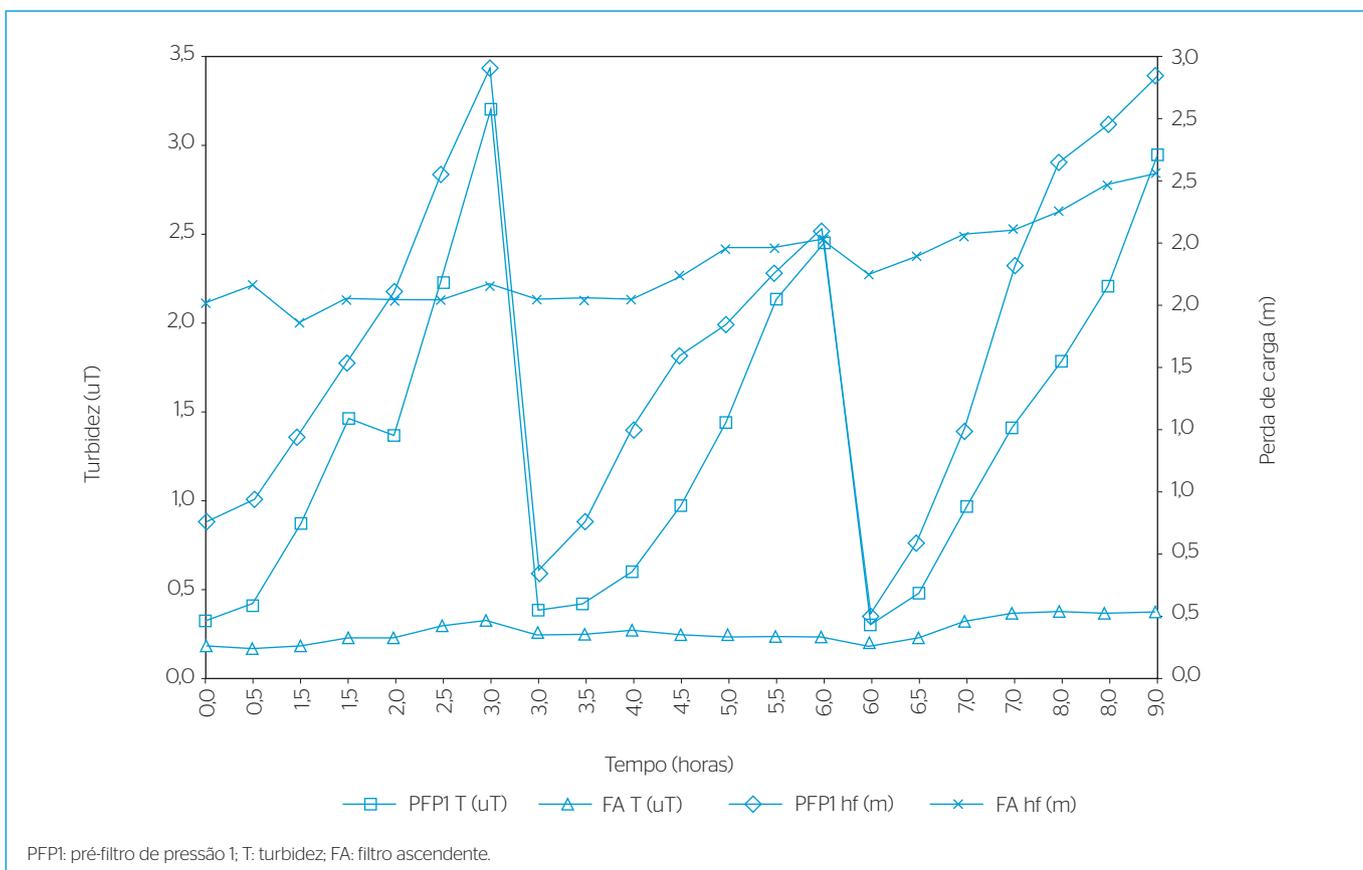


Figura 4 - Resultados de turbidez e perda de carga utilizando pré-filtro de pressão 1 com $T=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

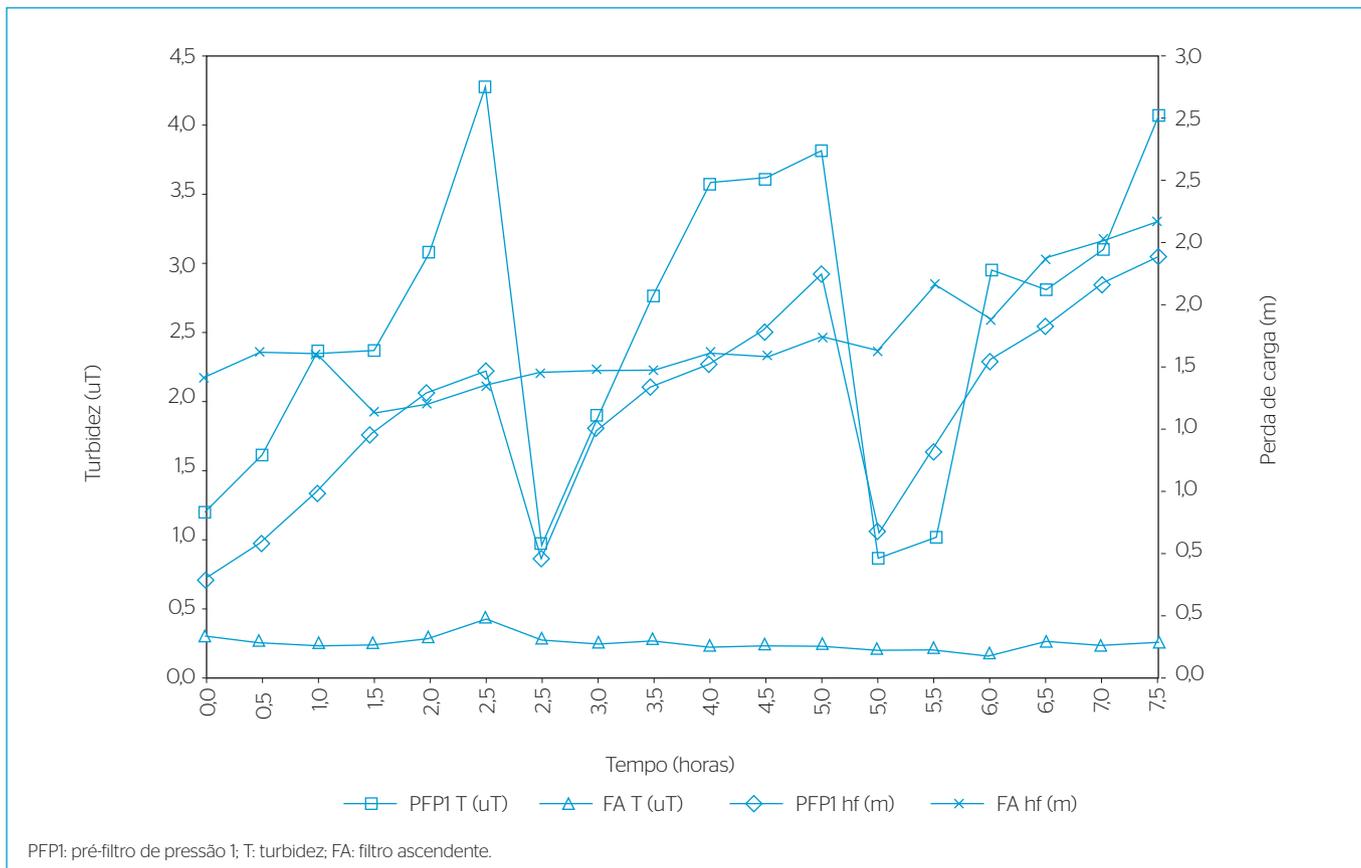


Figura 5 - Resultados de turbidez e perda de carga utilizando pré-filtro de pressão 1 com T=400 m³.m².dia⁻¹.

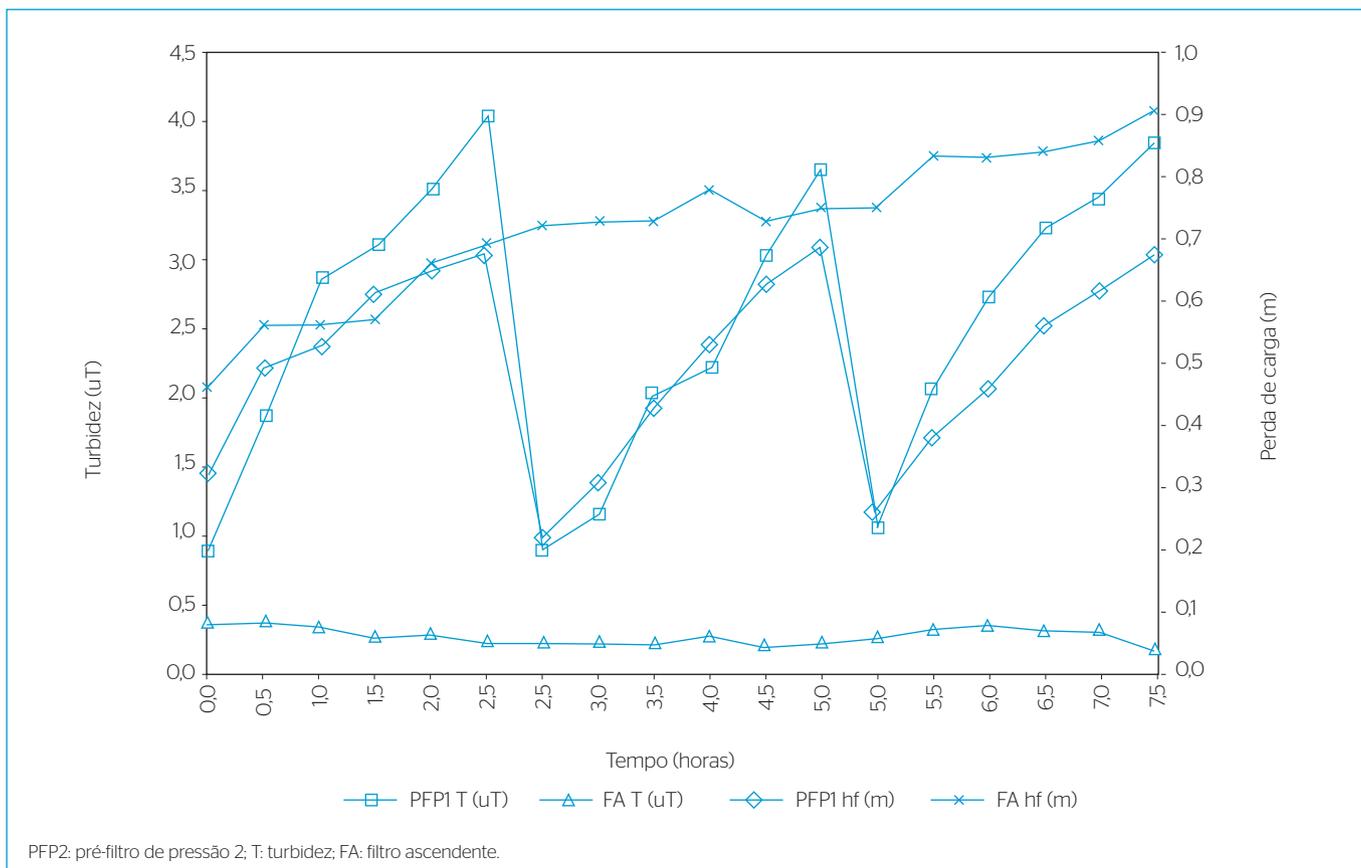


Figura 6 - Resultados de turbidez e perda de carga utilizando pré-filtro de pressão 1 com T=500 m³.m².dia⁻¹.

diminuição na remoção de fitoplâncton à medida que se elevou a taxa de filtração. Contudo, em todas as amostras, a remoção final na saída do FA foi extremamente eficiente, superior a 99%. Silva *et al.* (2012), trabalhando com DF convencional, encontraram remoções de cianobactérias de até 96,5%, também com o auxílio da pré-cloração.

PPF2/FA ($T=300/200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$): analisando a corrida do conjunto PFP2/FA (Figura 7), verificou-se que seu comportamento foi semelhante ao do PFP1 utilizando a mesma taxa (Figura 5), apresentando as mesmas durações nas duas primeiras carreiras de filtração. No entanto, com relação aos valores médios de turbidez ($M=1,74 \text{ uT}$; $DP=0,85 \text{ uT}$), o desempenho do PFP2 operando com $T=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ foi inferior ao do PFP1 ($M=1,35 \text{ uT}$; $DP=0,90 \text{ uT}$) com a mesma taxa.

Nas três carreiras do PFP2, o limite de turbidez estabelecido foi sempre ultrapassado, sendo, portanto, o parâmetro limitante destes experimentos. Considerando os valores médios de turbidez a montante e a jusante do PFP2, a remoção foi de 68,8%, enquanto nas corridas do PFP1 com a mesma taxa a remoção foi de 80,2%. A perda de carga no FA sofreu pequena elevação e a turbidez, ao longo das 9 horas de operação, apresentou-se abaixo de $0,40 \text{ uT}$. Verificou-se remoção considerável da cor aparente após a filtração no PFP2 no início das carreiras, elevando-se para valores próximos aos da água afluyente ao final

do experimento. A água filtrada na saída do FA apresentou resultados abaixo de $10,0 \text{ uH}$ ao longo do experimento.

PPF2/FA ($T=400/200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$): o PFP2 apresentou carreiras de filtração com duração de 2,5 horas e remoção de turbidez de 58,1%, considerando o valor da turbidez na entrada de $5,75 \text{ uT}$ e o valor médio de turbidez na saída de $2,41 \text{ uT}$ ($DP=0,99 \text{ uT}$), ao longo das 3 carreiras de filtração (Figura 8). A elevação da perda de carga no FA foi de $0,46 \text{ m}$. Os valores de turbidez da água final mantiveram-se abaixo de $0,5 \text{ uT}$. A remoção da cor aparente foi baixa (cerca de 40%), similar ao experimento com o PFP1 (com a mesma taxa), também tendendo para valores próximos aos da água afluyente nos finais de cada carreira de filtração. A cor aparente na saída do FA manteve-se igual ou inferior a $5,0 \text{ uH}$ em todas as amostras.

PPF2/FA ($T=500/200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$): a carreira de filtração foi encerrada com 2,0 horas devido aos elevados valores de turbidez da água pré-filtrada (Figura 9). Observa-se, também neste caso, uma diminuição da carreira de filtração com o aumento da taxa de filtração para um mesmo filtro, como já era esperado.

Considerando o valor da turbidez da água na entrada do pré-filtro ($6,18 \text{ uT}$) e a média na saída do mesmo ($M=2,90 \text{ uT}$; $DP=1,00 \text{ uT}$), o percentual de remoção foi de 53,1%, inferior ao PFP1 com a mesma taxa (58,4%). Entretanto, em todas as amostras a turbidez na saída do

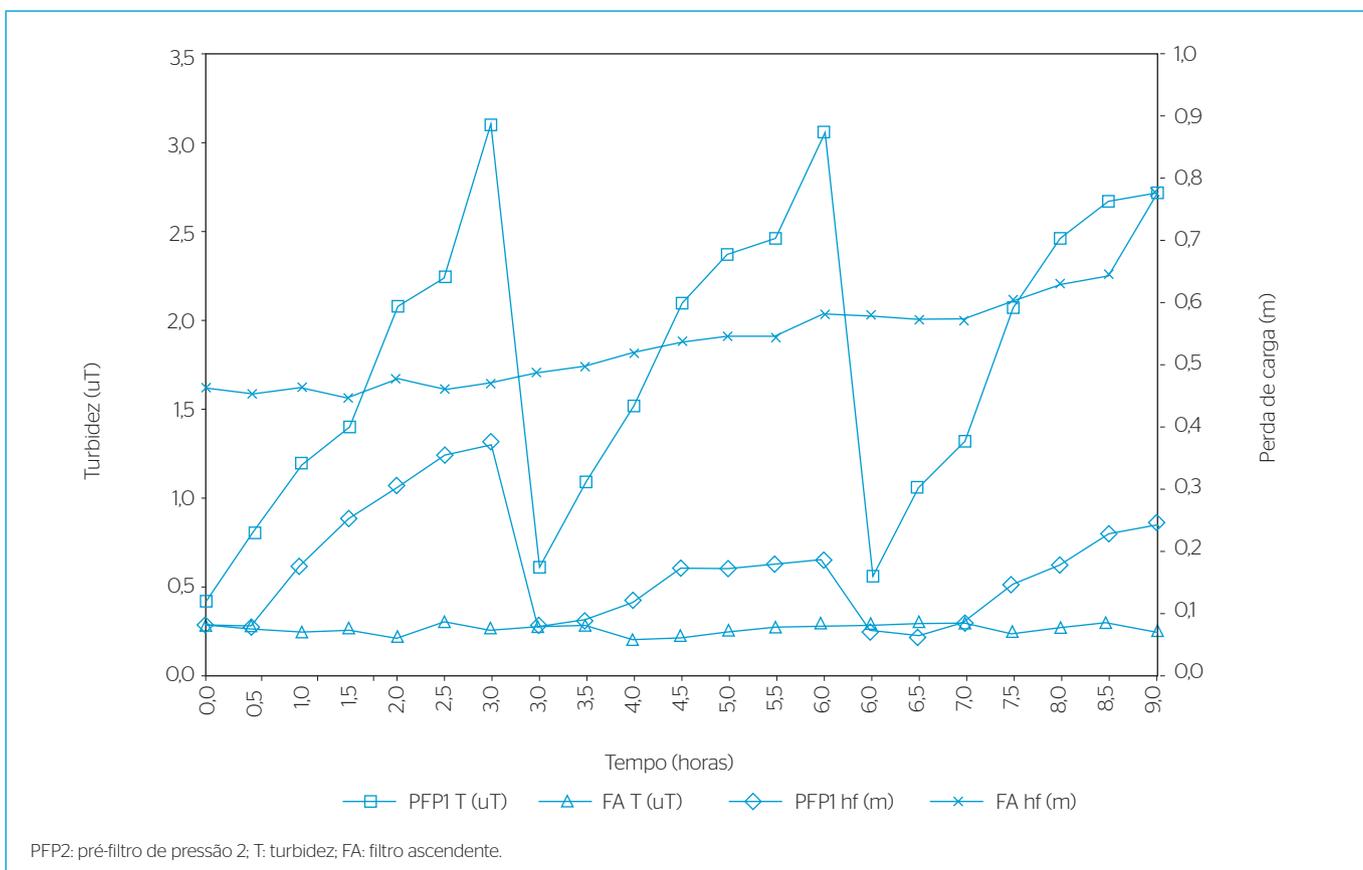


Figura 7 - Resultados de turbidez e perda de carga utilizando pré-filtro de pressão 2 com $T=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

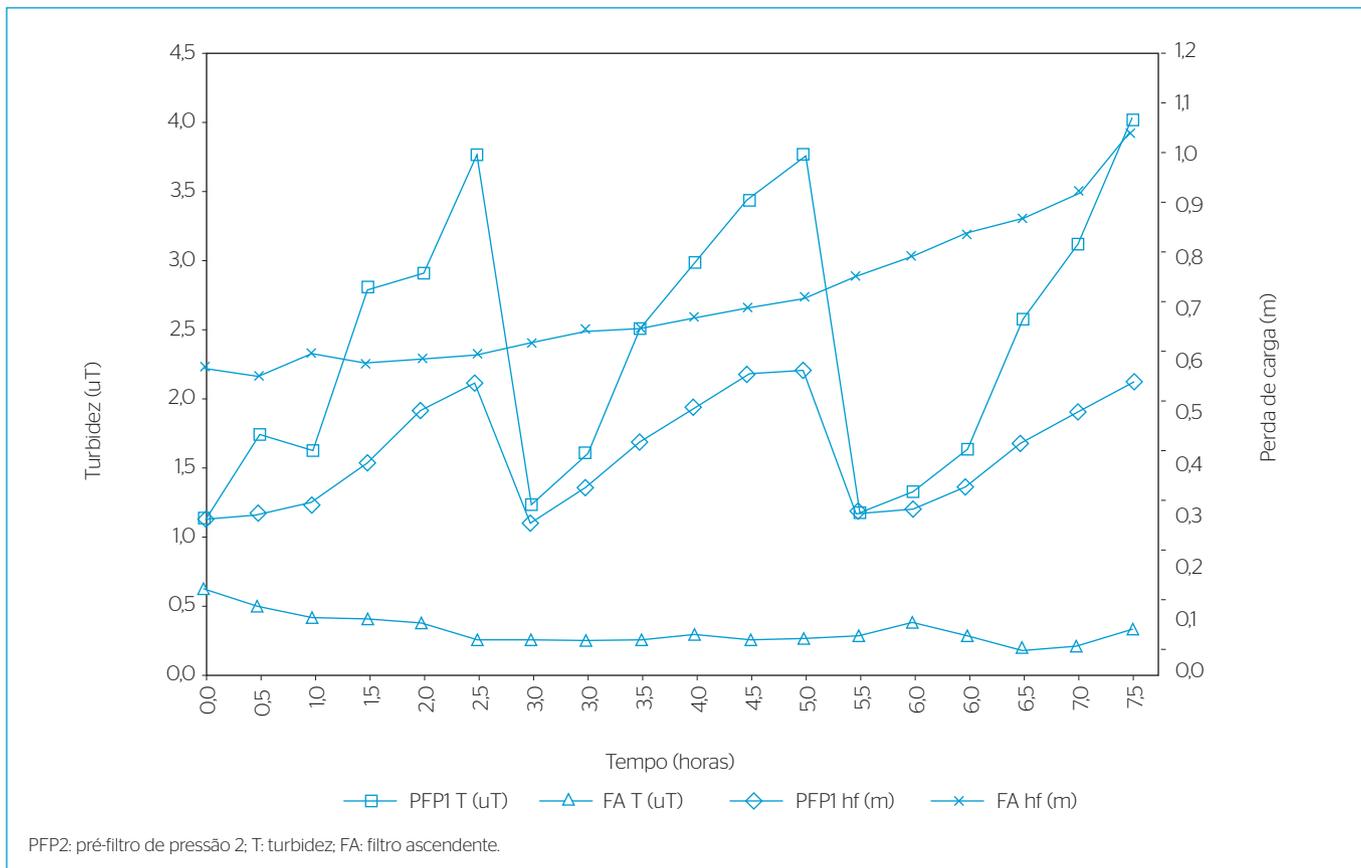


Figura 8 - Resultados de turbidez e perda de carga utilizando pré-filtro de pressão 2 com $T=400 \text{ m}^3.\text{m}^2.\text{dia}^{-1}$.

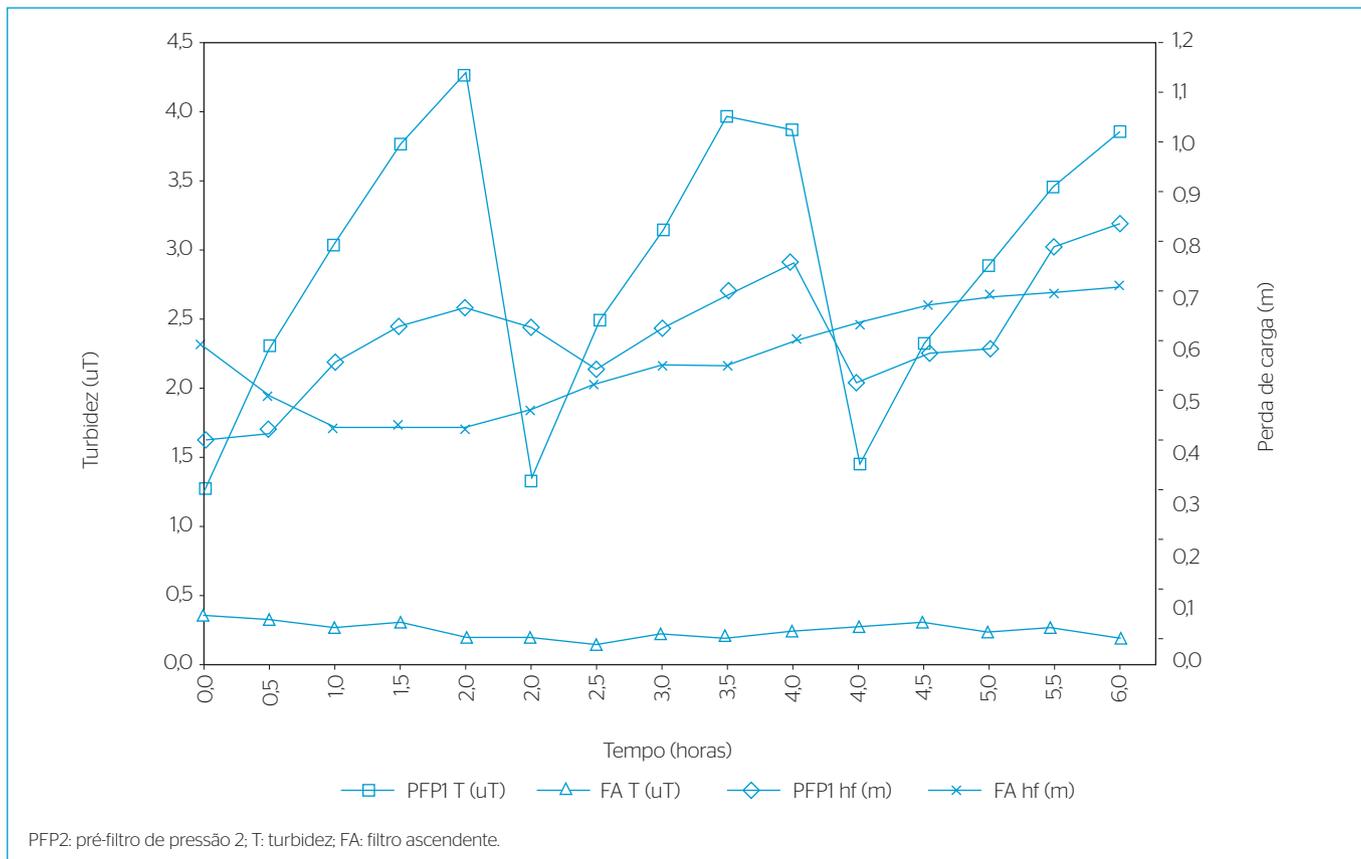


Figura 9 - Resultados de turbidez e perda de carga utilizando pré-filtro de pressão 2 com $T=500 \text{ m}^3.\text{m}^2.\text{dia}^{-1}$.

FA apresentou-se abaixo de 0,40 uT e a perda de carga entre o início e o término das 3 carreiras de filtração foi de 0,11 m. Com relação à remoção da cor aparente, a eficiência do PFP2 foi baixa, em média 40%, chegando a valores próximos aos do afluente no final de cada carreira, comportamento similar ao experimento com o PFP1 utilizando a mesma taxa de aplicação superficial. A cor aparente na saída do FA ficou abaixo de 10,0 uH.

Com relação ao consumo de água nas lavagens dos filtros PFP2/FA, os resultados obtidos não apresentaram variações significativas quando comparados entre si e entre os resultados encontrados nas carreiras do PFP1, ficando, em média, 7,2, 7,0 e 7,4% da água total produzida para as taxas de filtração de 300, 400 e 500 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, respectivamente. A eficiência na redução de fitoplâncton do PFP2, com taxa $T=400 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, apresentou-se em torno de 41,42%, maior do que o encontrado na configuração PFP1/FA operando com a mesma taxa (27,78%).

PFP3/FA ($T=300/200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$): considerando a turbidez na entrada (5,61 uT) e o valor médio de turbidez na saída do PFP3 ($M=2,50 \text{ uT}$; $DP=1,03 \text{ uT}$), obteve-se uma remoção média de turbidez de 55,4%. A perda de carga média das três carreiras sofreu apenas uma pequena elevação (0,12 m), sendo a turbidez novamente o parâmetro limitante e controlador da carreira de filtração (3 horas). A perda de carga no FA sofreu elevação de 0,60 m e a turbidez ao longo das 9 horas

de operação apresentou-se abaixo de 0,50 uT, com uma leve tendência de crescimento no final da carreira (Figura 10).

Verificou-se remoção considerável da cor aparente (cerca de 80%) após o PFP3, comportamento similar foi observado nos outros dois pré-filtros com a mesma taxa de filtração. O efluente do FA apresentou valores de cor aparente menor ou igual a 10,0 uH ao longo do experimento.

PFP3/FA ($T=400/200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$): as carreiras de filtração do PFP apresentaram duração de 2 horas (Figura 11). A remoção de turbidez foi de 39,6%, considerando o valor da turbidez na entrada de 5,99 uT e valor médio de turbidez de 3,62 uT ($DP=0,99$) na saída do PFP3. A elevação da perda de carga no FA foi de 0,57 m. Com exceção das duas primeiras análises, a turbidez no FA manteve-se abaixo de 0,50 uT durante todo o experimento. A remoção da cor aparente no PFP3 apresentou-se baixa (cerca de 35%), elevando-se para valores próximos aos da água bruta no final da carreira. A cor aparente em todas as amostras na saída do FA foi constante (5,0 uH), seguindo o mesmo comportamento observado nos outros filtros operados com a mesma taxa.

PFP3/FA ($T=500/200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$): a carreira de filtração foi encerrada com 2,0 horas de duração motivada pelos valores de turbidez elevados (Figura 12). Considerando o valor da turbidez de água na entrada do pré-filtro (5,83 uT) e o valor médio de turbidez na saída do mesmo ($M=4,32 \text{ uT}$; $DP=1,00$), o percentual de remoção foi de 25,9%.

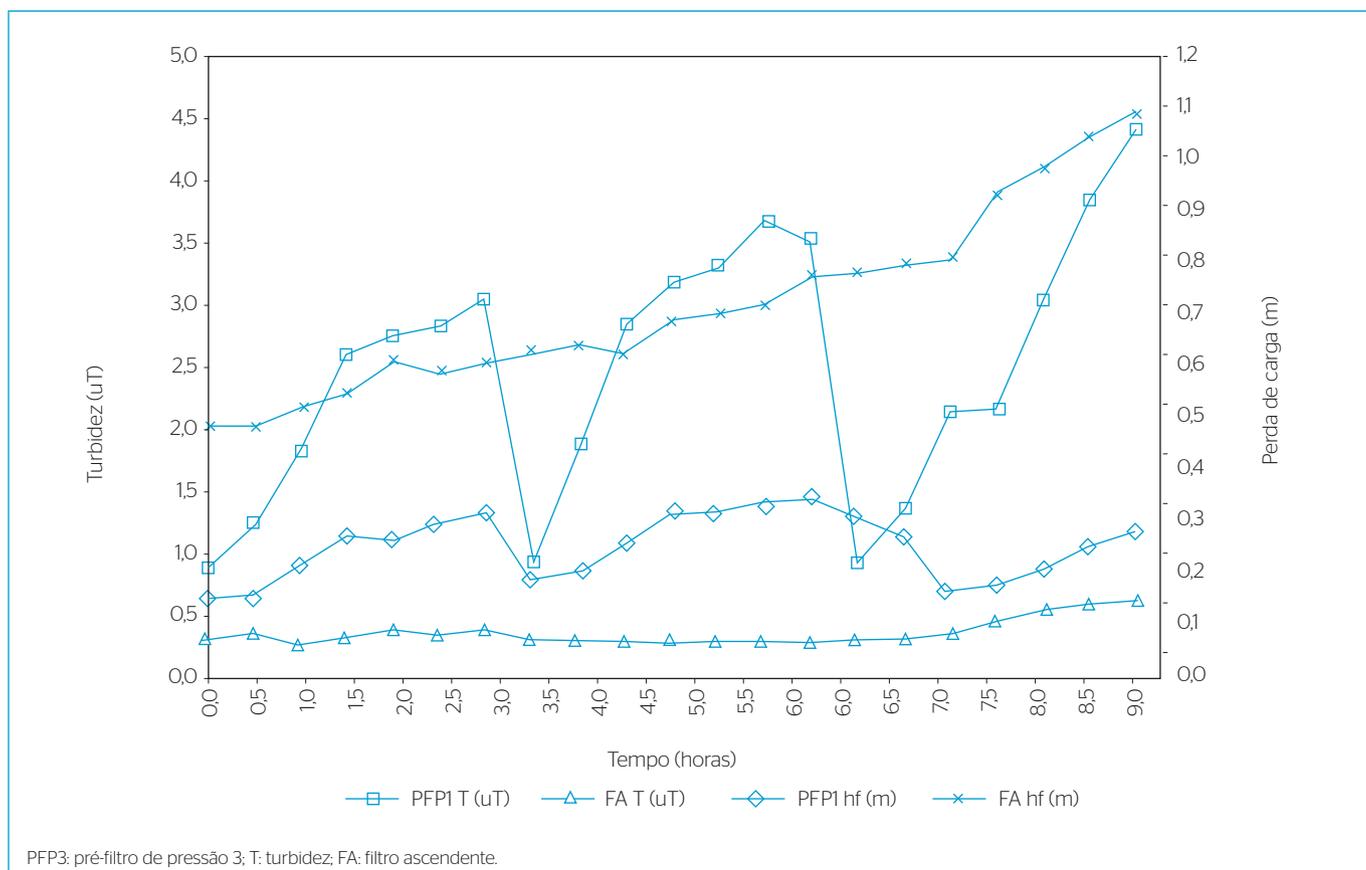


Figura 10 - Resultados de turbidez e perda de carga utilizando pré-filtro de pressão 3 com $T=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

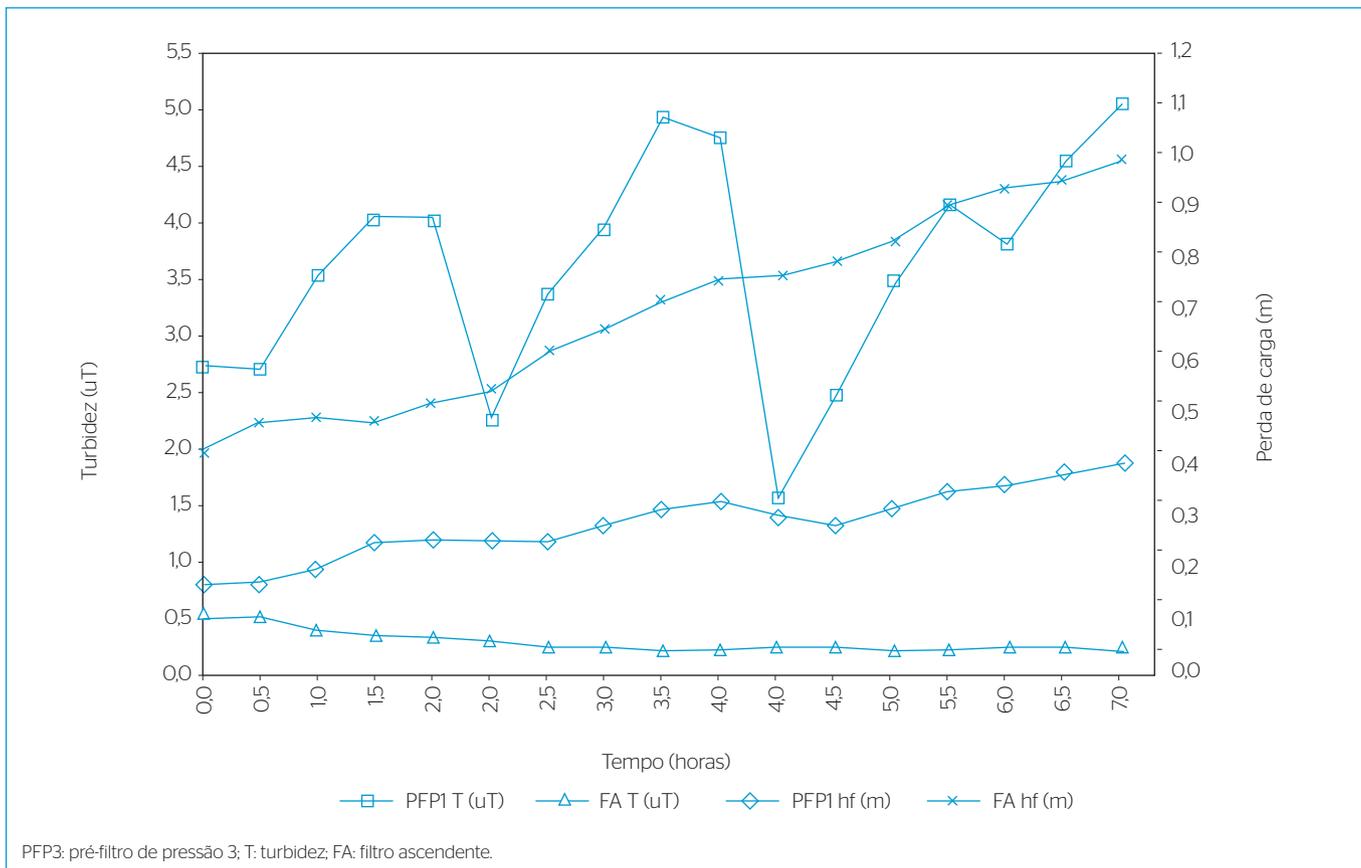


Figura 11 - Resultados de turbidez e perda de carga utilizando pré-filtro de pressão 3 com T=400 m³.m².dia¹.

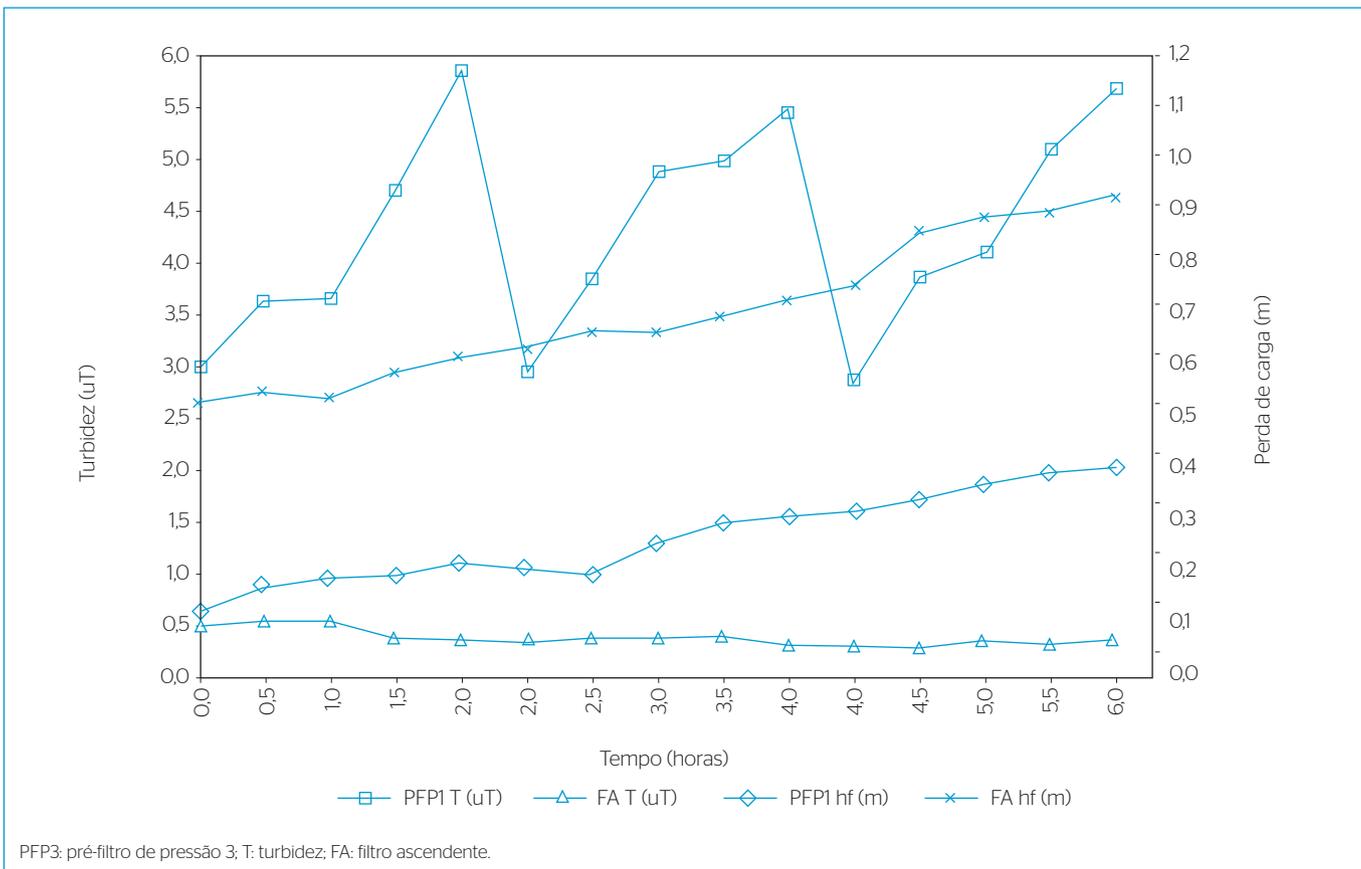


Figura 12 - Resultados de turbidez e perda de carga utilizando pré-filtro de pressão 3 com T=500 m³.m².dia¹.

As análises de turbidez na saída do FA em todas as amostras se apresentaram abaixo de 0,6 uT e a elevação da perda de carga entre o início e o término das três carreiras de filtração foi de 0,40 m. Em relação à cor aparente, a eficiência do PFP3 foi baixa (cerca de 35%), chegando ao mesmo valor da água afluyente no final de cada carreira. A cor aparente da água final foi constante e igual a 5,0 uH.

O consumo de água de lavagem dos filtros PFP3/FA apresentou pequena elevação com relação às carreiras anteriores, ficando em 7,6, 7,4 e 7,4% da água tratada para as taxas de filtração de 300, 400 e 500 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$, respectivamente. Wiecheteck, Benini e Di Bernardo (2004), trabalhando com DF convencional e taxas bem abaixo das aplicadas neste trabalho (80 e 120 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), encontraram perdas em torno de 5%.

A redução de fitoplâncton no PFP3 com taxas de filtração de 300 e 500 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ficou aproximadamente igual, 45,26 e 43,93% respectivamente. Comparando a taxa de remoção média de fitoplâncton do PFP1 e do PFP3, ambos operando com taxa de 300 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$, observa-se uma diminuição de 73,91 para 45,93%, indicando que a eficiência de remoção de fitoplâncton deve decrescer com o aumento da granulometria do leito.

Com exceção do filtro PFP1, no qual os desempenhos com taxas de 400 e 500 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ficaram muito próximos, os resultados apresentaram-se dentro das expectativas, isto é, quanto menor a taxa de

filtração, maior a remoção da turbidez. Observa-se também que, em geral, as carreiras de filtração com taxas de 300 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ foram maiores em relação às outras taxas, chegando-se a carreiras de filtração de apenas 2 horas para os filtros PFP2 e PFP3 operando com taxa de 500 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$.

Comparando-se a turbidez da água pré-filtrada nos diferentes filtros para uma mesma taxa, observa-se que, para as taxas de 300 e 400 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$, as eficiências dos filtros PFP1 e PFP2 se assemelham, enquanto a eficiência do PFP3 é relativamente menor. Já na taxa de aplicação superficial de 500 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ observa-se uma tendência de deterioração da qualidade da água pré-filtrada do filtro PFP1 para o PFP3. Em nenhum dos experimentos a perda de carga foi fator limitante da carreira de filtração nos PFPs. Esse fato pode fomentar a realização de novos experimentos buscando a melhoria da água pré-filtrada, agora utilizando granulometrias menores do que a utilizada no PFP1.

De forma resumida, utilizou-se a turbidez como fator comparativo da eficiência, já que a perda de carga não foi o fator limitante das carreiras de filtração. Os resultados médios de turbidez nos filtros PFP1, PFP2 e PFP3, operados em diferentes taxas de filtração (300, 400 e 500 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), foram agrupados na Figura 13 visando auxiliar na definição do sistema com melhor desempenho global.

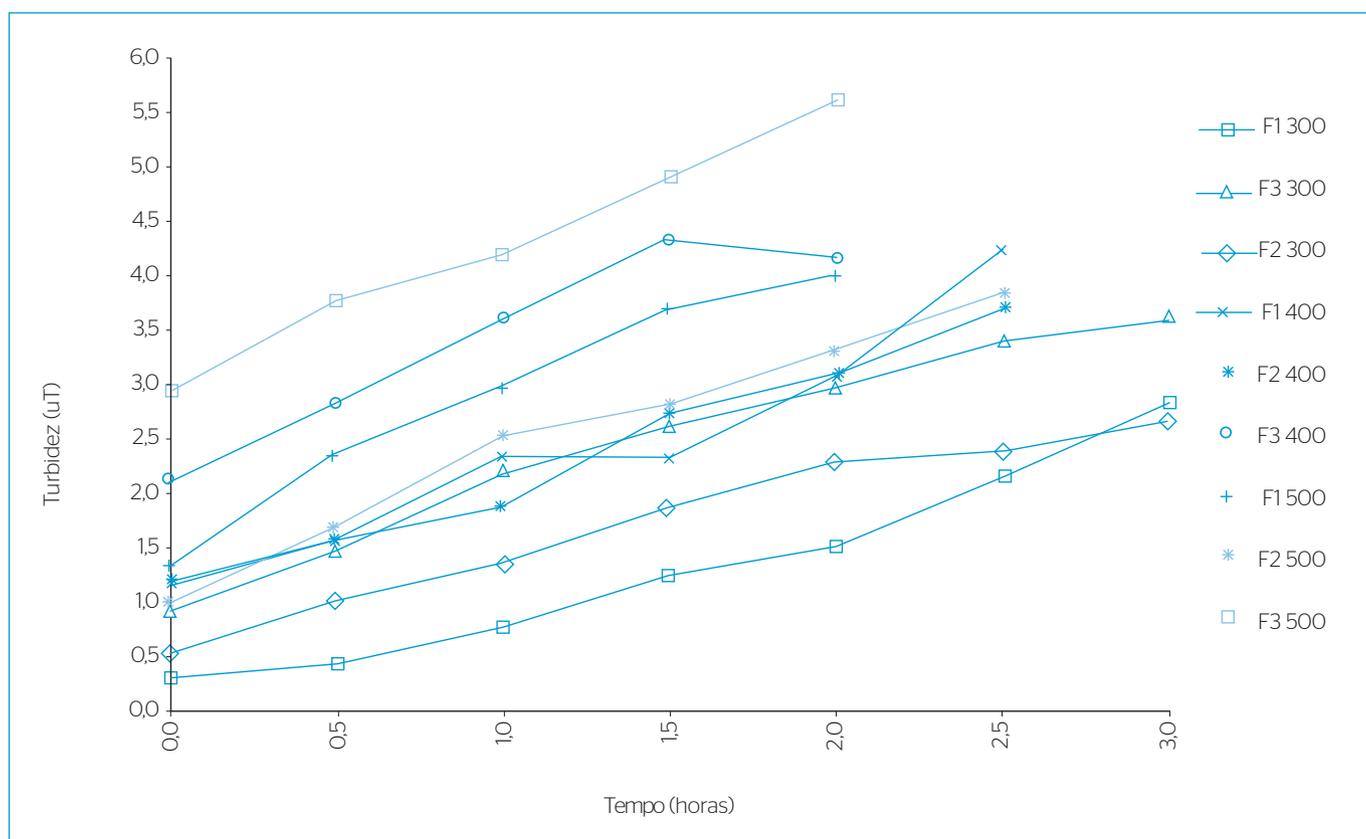


Figura 13 - Valores médios de turbidez nas saídas dos pré-filtros de pressão 1, 2 e 3 com taxas de filtração de 300, 400 e 500 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$.

Tabela 2 - Resultados do teste ANOVA realizado com os valores médios de turbidez efluente dos pré-filtros de pressão.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrada	F	F _{crítico}	Valor p
Entre corridas	35,26	8	4,41	4,50	2,15	0,0005
Dentro da corrida	44,08	45	0,98			
Total	79,34	53				

FA: filtro ascendente; T: taxa de filtração.

Realizou-se o teste estatístico ANOVA (Tabela 2) com objetivo de se verificar a seguinte hipótese nula (H₀): todos os PFPs apresentam o mesmo desempenho com relação à remoção de turbidez, ou seja, as diferenças observadas não são representativas com nível de significância de 5%.

Como pode ser observado na Tabela 2, a hipótese nula foi rejeitada, confirmando que diferenças encontradas são significativas para P=0,05. Sendo assim, e a partir de uma análise gráfica da Figura 13 foi possível propor a ordem da eficiência de remoção média de turbidez nos PFPs, resumindo-se desta forma: PFP1T300>PFP2T300>PFP3T300≈PFP1T400≈PFP2T400≈PFP1T500>PFP2T500>PFP3T400>PFP3T500.

Nota-se que o melhor desempenho foi apresentado pela configuração PFP1T300, seguido pela PFP2T300. As configurações PFP3T300, PFP1T400, PFP2T400 e PFP1T500 apresentaram eficiências praticamente iguais. As configurações PFP2T500, PFP3T400 e PFP3T500 apresentaram os piores desempenhos do conjunto.

Reforçando as considerações apresentadas anteriormente, verifica-se que, de forma global, o filtro PFP1 apresentou melhor eficiência tanto no que diz respeito à remoção de turbidez e de cor quanto na remoção do fitoplâncton nas três taxas de filtração aplicadas. Outra vantagem apresentada pelo filtro PFP1 foi a carreira de filtração de maior duração em relação às outras configurações. Com relação à escolha da melhor taxa de filtração para o filtro PFP1, observou-se que a taxa de 300 m³.m⁻².dia⁻¹ apresentou o melhor desempenho em todos os parâmetros estudados, contrastando com o trabalho de Wiecheteck, Benini e Di Bernardo (2004), que, utilizando DF convencional, trabalharam com taxas entre 80 e 120 m³.m⁻².dia⁻¹. Já as taxas de 400 e 500 m³.m⁻².dia⁻¹ tiveram um desempenho menor do que a

de 300 m³.m⁻².dia⁻¹, ficando bem próximas uma da outra em termos de eficiência de remoção de cor e turbidez, bem como na duração das carreiras de filtração.

CONCLUSÕES

A tecnologia de tratamento por DF modificada mostrou-se capaz de produzir água dentro dos padrões de cor e turbidez estabelecidos pela Portaria MS nº 2.914/2011, aumentando consideravelmente a segurança operacional do sistema e evitando os picos de turbidez e de cor que ocorrem no início e no final de cada carreira quando se utiliza somente a FDA.

O PFP1 com granulometria do leito filtrante de 2,00 a 3,38 mm e taxa de filtração de 300 m³.m⁻².dia⁻¹ apresentou eficiência satisfatória quanto à remoção de cor aparente (50%) e turbidez (80,2%) e possibilitou a redução de cerca de 40% no consumo de água para as lavagens de filtros, aumentando a eficiência de produção de água de 88,3% para cerca de 93,0%. A qualidade da água tratada foi satisfatória, apresentando turbidez final durante a maior parte dos experimentos inferior a 0,5 uT e cor aparente em torno de 5 uH, tendo o FA absorvido qualquer variação da qualidade de água pré-filtrada. A eficiência de remoção de fitoplâncton no PFP1 chegou a cerca de 74% e, quando analisado o sistema completo, na saída do FA, observaram-se eficiências maiores do que 99%. A perda de carga em nenhum momento foi o fator limitante das carreiras de filtração, indicando que a altura do leito nos PFPs pode ser ampliada ou a granulometria diminuída, com o objetivo de se obter maiores carreiras de filtração. Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o acompanhamento mais acurado da eficiência de remoção de microalgas e de cianobactérias pelo sistema de DF alternativo.

REFERÊNCIAS

AWWA; WPC. *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. (2005) 21. ed. Washington, DC.: American Public Health Association. 1400 p.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. (2007) *Potenciais fatores de risco à saúde decorrentes da presença de subprodutos de cloração na água utilizada para consumo humano*. Brasília: Funasa. 126 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. (2011) Portaria MS nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Brasília: Ministério da Saúde.

CAGECE - Companhia de Água e Esgoto do Ceará. (2013) Comunicação interna. Fortaleza: CAGECE.

DANTAS, A. DI B. & DI BERNARDO, L. (2006) Performance of two-stage filtration system for treating high turbidity water. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, v. 55, n. 7-8, p. 499-515.

DI BERNARDO, L. & ROCHA, O. (1990) Remoção de algas em pré-filtro de fluxo ascendente com meio granular de pedregulho e areia grossa. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 4 *Anais*. Belo Horizonte.

DI BERNARDO, L. & PAZ, L.P.S. (2008) *Seleção de tecnologias de tratamento de água*. v. 1.1.ed. São Carlos: Editora LDiBe.

KOMÁREK, J. & ANAGNOSTIDIS, K. (1989) Modern approach to the classification system of cyanophytes. *Algological Studies/Archiv für Hydrobiologie*, suppl. v. 38-39, p. 291-302.

KOMÁREK, J. & ANAGNOSTIDIS, K. (1999) Cyanoprokaryota, 1: Chroococcales. In: BÜNDEL, B.; KRIENITZ, L.; GÄRDNER, G.; SCHAGERL, M. (Eds). *Süddwasserflora von Mitteleuropa* Jena: Gustav Fischer.

KOMÁREK, J. & ANAGNOSTIDIS, K. (2005) Cyanoprokaryota, 2: Oscillatoriales. In: BÜNDEL, B.; KRIENITZ, L.; GÄRDNER, G.; SCHAGERL, M. (Eds). *Süddwasserflora von Mitteleuropa*; (Eds.). München: Elsevier.

LIMA, J.A.P. (2008) Relatório técnico interno sobre implantação e operação da ETA Tapera em Aquiráz-CE. Aquiráz: CAGECE. (não publicado).

MOTA FILHO, C.R.E & PÁDUA, V.L. (2004) Influence of the basicity of polyaluminum chloride in the performance of the descending direct filtration. In: Simposio Internazionale di Ingegneria Sanitaria Ambientale, 7 *Anais*..

SALES, M.V.; AVELINO, F.F.; MOTA JUNIOR, C.M.; PÁDUA, V.L. Conversão, em escala real, do tratamento convencional para a filtração direta descendente. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23 *Anais*.. Campo Grande.

RIBAS, F.; BERNAL, A.E.; PERRAMÓN, J. (2000) 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.

SILVA, G.G.; NAVAL, L.P.; DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. Di B. (2012) Tratamento de água de reservatórios por dupla filtração, oxidação e adsorção em carvão ativado granular. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 17, n. 1.

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