FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS (FiME) MODIFICADA POR MATERIAIS NÃO CONVENCIONAIS

Tiago Silva de Almeida [1]

Denise Conceição de Gois Santos Michelan

Anderson de Jesus Lima

[1] Discente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe

RESUMO

Diante das técnicas disponíveis para tratamento de água para abastecimento, pesquisas apontam a filtração em múltiplas etapas (FiME) como alternativa para algumas limitações da filtração lenta pelos tradicionais filtros de areia. Com o objetivo de amortecer picos de cor e turbidez da água afluente, a FiME propõe uma ou mais etapas de filtração antecedendo os filtros lentos, podendo incorporar materiais não convencionais e resíduos na composição dos leitos filtrantes das suas etapas de filtração, agregando viés ambiental e econômico. O trabalho buscou avaliar a eficiência do sistema de FiME composto por três unidades de filtração ligadas em série, com meios filtrantes compostos por manta não tecida, resíduo de cerâmica vermelha e fibras de coco. O sistema piloto operou sob taxa de filtração de 3 m^3/m^2 dia ± 10%, em regime intermitente, através de dois Estágios distintos (Estágios 1 e 2). O monitoramento do sistema, associado às análises estatísticas realizadas, não evidenciou diferenças significativas entre os desempenhos alcançados nos dois Estágios. Os pré-filtros apresentaram eficiências médias de remoção de cor aparente de 60% e 46% para os Estágios 1 e 2, respectivamente, ao passo em que a eficiência média de remoção de turbidez alcançada foi de 64% no Estágio 1 e 57% para o Estágio 2, baseando-se, sobretudo, na capacidade de adsorção dos resíduos cerâmicos. A adição das camadas de manta não tecida foi pouco expressiva sobre a eficiência dos filtros, entretanto pôde agregar estabilidade na operação destes, haja vista os baixos Índices de Decaimento da Qualidade da Água (IDQA) alcançados.

Palavras-chave: Filtração lenta, pré-filtro, resíduo cerâmico, fibra de coco, manta não tecida.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água potável evidencia a necessidade de tecnologias capazes de minimizar os custos associados ao tratamento de água, sobretudo quando observadas pequenas comunidades de países em desenvolvimento. Em geral, a disponibilidade de recursos financeiros para algumas localidades destes países geralmente é limitada, expondo o quão afetados podem ser os pequenos municípios localizados em áreas rurais e mais isoladas no que diz respeito aos serviços básicos, como fornecimento de água com qualidade para consumo humano.

Segundo WWAP (2019), em 2015, cerca de 29% da população mundial ainda não dispunha de serviços capazes de ofertar água potável de forma gerenciada e segura, enquanto outras 844 milhões de pessoas ainda não eram atendidas nem mesmo com os serviços mais básicos de água potável.

Nesse sentido, diante das mais variadas técnicas empregadas para o tratamento de água para abastecimento, os tradicionais filtros lentos de areia apresentam-se vantajosos, tendo em vista sua simplicidade de execução, baixo custo associado à operação e boa eficiência na remoção de microrganismos, cor e turbidez. No início de sua operação, os filtros lentos fazem uso da adsorção como principal forma de remoção de partículas, entretanto, a partir do processo de amadurecimento do filtro, há formação de uma camada com significativa atividade biológica, a *schmutzdecke*, que passa a ser a principal forma de remoção de partículas e microrganismos (ZHANG *et al.,* 2018).

Embora diversos estudos, dentre os quais D'Alessio *et al.* (2016) e Tundia *et al.* (2016), apresentem bons resultados com aplicação dos filtros lentos, Lima (2020) defende que não é aconselhável apontar eficiências globais para esse tipo de tratamento, devido à forte influência exercida pelas particularidades de aplicação, como taxa de filtração, meio filtrante e água bruta. Sendo assim, vale ressaltar que esses filtros apresentam limitações quanto à qualidade da água afluente, fazendo-se necessários valores relativamente baixos de cor, sólidos grosseiros (SILVEIRA; COUTINHO, 2016) e turbidez, sendo esta limitada na ordem de 10 uT (VERAS; DI BERNARDO, 2008).

Além disso, outra limitação dos tradicionais filtros lentos de areia está associada aos procedimentos de limpeza do meio filtrante, em que, segundo Veras e Di Bernardo (2008), uma vez encerrada a carreira de filtração, o filtro deve ser desativado para dar seguimento com a

limpeza. Esta, por sua vez, consiste basicamente na raspagem e retirada dos primeiros centímetros do meio filtrante de areia, prosseguindo com a lavagem, secagem e posterior reutilização da areia como meio filtrante.

Como proposta às limitações da filtração lenta quanto a qualidade da água afluente, a Filtração em Múltiplas Etapas (FiME) propõe uma ou mais etapas de tratamento que antecedem o filtro lento, sendo composta, de modo geral, por pré-filtro dinâmico, pré-filtro de pedregulho e filtros lentos de areia, onde as duas últimas etapas podem apresentar uma ou mais unidades, além de meio filtrante com granulometria específica utilizando camadas estratificadas ou camada única (CLARKE *et al.,* 2004; TANGERINO *et al.,* 2013; MACHADO *et al.,* 2016).

Sendo assim, com a maior exploração em alternativas de pré-tratamento, a FiME apresenta-se com potencial a superar as limitações da filtração lenta (VERAS; DI BERNARDO, 2008), de forma que seja possível promover a redução de parâmetros físico-químicos, como cor, turbidez e sólidos grosseiros (DISA-DISA *et al.,* 2014; SILVEIRA; COUTINHO, 2016), além da remoção de microrganismos (MENDONZA *et al.,* 2019), substâncias húmicas (TANGERINO; DI BERNARDO, 2005) e algas presentes na água bruta (TANGERINO *et al.,* 2001; TANGERINO *et al.,* 2013). Para tanto, a técnica de FiME pode ainda incorporar materiais de diversas origens para compor o meio filtrante de suas etapas de filtração, a exemplo de materiais não convencionais e resíduos agroindustriais, como as fibras de coco e resíduos cerâmicos.

Concernente à utilização de materiais não convencionais, a utilização de mantas não tecidas sobre o leito filtrante traz como benefícios a possibilidade de prolongar duração das carreiras de filtração e auxiliar na redução de parâmetros físico-químicos (SANTOS, 2015), bem como proporcionar a redução da espessura do meio filtrante (FERRAZ, 2001; DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008). Além disso, a utilização da manta favorece a formação da camada biológica, sem que haja necessidade de posterior raspagem superficial para a limpeza do filtro, bastando apenas retirar a manta, lavá-la e reutilizá-la (FERRAZ, 2001; VERAS; DI BERNARDO, 2008).

Por outro lado, os resíduos cerâmicos, quando utilizados em pré-filtros para redução de picos de turbidez, mostraram-se capazes de promover melhorias na água de estudo, apresentando-se como alternativa viável ao uso dos tradicionais seixos (RAJAPAKSE; FENNER, 2011), promovendo eficiências de remoção acima de 70% para amostras com até 600 uT (JAYALATH *et al.,* 2016).

Além disso, no que diz respeito às fibras de coco, estas mostraram boa durabilidade quando imersas em água (SILVA *et al.,* 2015), promovendo a liberação de tanino, substância com potencial coagulante (PERONI *et al.,* 2019), interessante às atividades relacionadas ao tratamento de água. Além disso, as fibras mostraram-se eficientes também quando aplicadas aos tratamentos de águas residuárias, agindo frente à redução de efluentes oleosos (ALMAGRO; ROCHA, 2015) e metais pesados (SOUSA *et al.,* 2007).

Em se tratando da indústria do coco, o Brasil já alcançou a produção de cerca de 80% do coco de toda a América do Sul (SIMONETTI *et al.,* 2017), ocupando a quinta posição no ranking mundial de produção do coco e área cultivada, ficando atrás da Indonésia, Filipinas, Índia e Sri Lanka (BRAINER, 2018). Contudo, a geração de resíduos por essa cultura é proporcional à sua produção, podendo gerar custos e se transformar em um problema de ordem ambiental (SILVA *et al.,* 2015), haja vista o longo tempo necessário para sua degradação, podendo ocorrer em até oito anos (SIMONETTI *et al.,* 2017), além da disposição que ainda é realizada, de modo geral, em aterros sanitários e lixões (CARDOSO; GONÇALEZ, 2016).

Paralelamente, estudos realizados por Garcia *et al.* (2014), baseados em informações divulgadas pela Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) para o ano de 2014, estimaram a geração de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) variando entre 3,9 e 6,5 milhões de toneladas, em consequência de produtos danificados ainda na indústria, compreendendo cerca 3 a 5% de toda a produção. Contudo, cabe ressaltar que a estimativa supracitada não considerou os resíduos cerâmicos gerados pela indústria da construção civil, inferindo que os valores apresentados ainda não são representativos do montante real de RCV, visto que os números se referem apenas aos resíduos gerados dentro da indústria da cerâmica.

Sendo assim, considerando as vantagens da utilização de materiais não convencionais, sobretudo resíduos, e os ganhos obtidos com a utilização de FiME, no que diz respeito aos requisitos de qualidade de água, o presente estudo teve por objetivo avaliar a eficiência de um sistema de filtração em múltiplas etapas com meios filtrantes compostos por manta não tecida, resíduo de cerâmica vermelha e fibras de coco, através do monitoramento e análises de parâmetros microbiológicos e físico-químicos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Instalação piloto

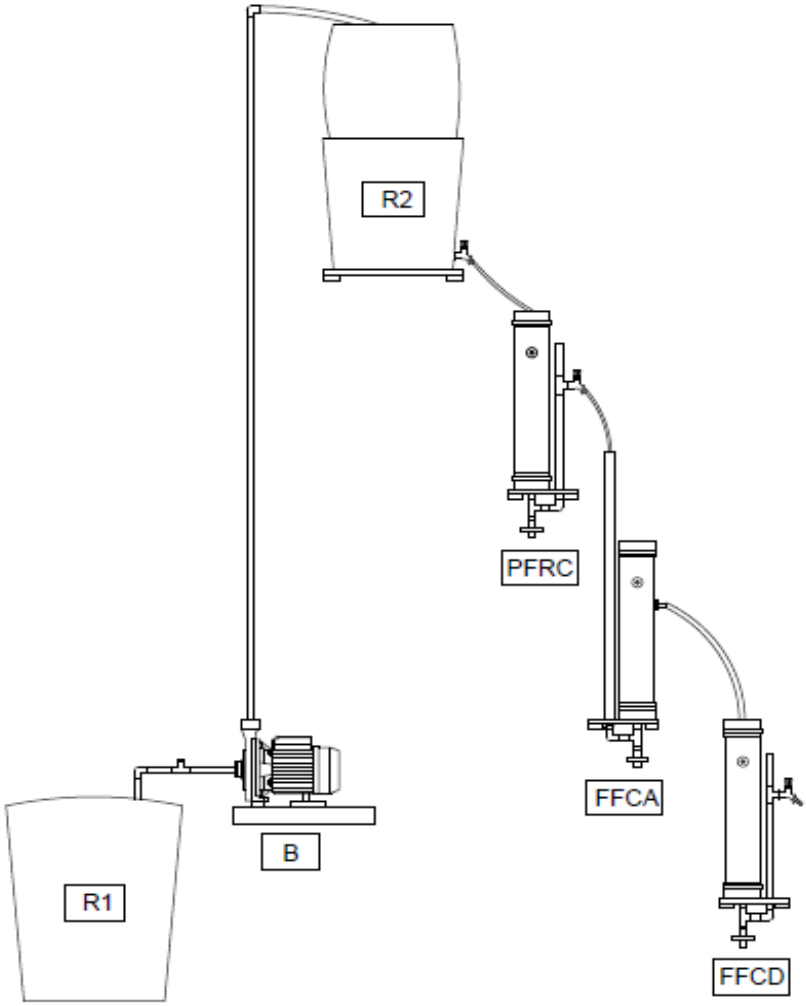
O sistema piloto foi montado no Laboratório de Hidráulica (LABHID) do Departamento de Engenharia Civil (DEC), na Universidade Federal de Sergipe (UFS). Para tanto, o aparato experimental de FiME foi composto por uma bomba periférica, dois reservatórios e três tubos cilíndricos de Policloreto de Vinila (PVC) dispostos verticalmente e ligados em série.

A água de estudo utilizada para alimentar os filtros foi armazenada no reservatório de 50 L apoiado no nível do solo (R1), e posteriormente transportada por bombeamento para o reservatório superior (R2) de aproximadamente 18 L, com base à cota de aproximadamente 2,50 m, a fim de garantir que o escoamento para os filtros ocorresse exclusivamente por gravidade. O transporte da água do R1 para o R2 ocorreu através do acionamento manual do sistema de recalque, que dispunha de bomba periférica com potência de 0,5 CV e $Q_{máx}$ de 40 L/min.

O R2 possuía dispositivo regulador de nível d'água (boia) a fim de garantir que o sistema funcionasse sob carga hidráulica constante, além disso, dispunha ainda de torneira para auxiliar no monitoramento e ajustes de vazão, que foram realizados com frequência de 04 a 05 dias/semana, ou sempre que houvesse alteração perceptível na alimentação dos filtros.

Nesse sentido, o sistema de FiME foi composto por três unidades de filtração funcionando em série, sendo a primeira o pré-filtro com leito filtrante de resíduo cerâmico (PFRC), seguido por dois filtros lentos com camada suporte de brita 3/4" e leito filtrante composto por fibras de coco. Os dois últimos divergem entre si quanto ao sentido do escoamento, em que o primeiro dispunha de escoamento ascendente (FFCA) e o segundo de escoamento descendente (FFCD). Ademais, todas as unidades supracitadas possuíam altura de 50 cm e 10 cm de diâmetro, totalizando volume útil de aproximadamente 3,9 $x10^{-3}$ cm^3 e foram dotadas de dispositivo para descarga de fundo. A Figura 1 apresenta de forma esquematizada o sistema proposto.

Figura 1: Esquema construtivo do sistema de Filtração em Múltiplas Etapas.



Fonte: Autor (2020).

Por fim, considerando a composição dos meios filtrantes e o período de operação do sistema, foi possível estabelecer estágios distintos para o experimento: Estágio 1 e Estágio 2.

2.1.1 Estágio 1

No Estágio 1, consideradas as nomenclaturas das etapas compreendidas pelo sistema, que vão desde a água bruta (AB) até o filtro com fibra de coco de escoamento descendente, todas receberam o sufixo "1", a fim de referenciar a etapa do sistema de filtração ao Estágio abordado.

Nesse sentido, o pré-filtro de resíduos cerâmicos triturados do Estágio 1 (PFRC1) teve seu leito filtrante uniforme com espessura de 28 cm, onde o material utilizado apresentou relação $D_{máx}/D_{mín}$ = 3,30 e ocupou o volume de 2,2 x10^{-3} cm^3.

Por outro lado, os filtros lentos seguintes ao PFRC1 dispunham de camada suporte com espessura total de seis centímetros, composta por britas 3/4", enquanto seus leitos filtrantes uniformes possuíam espessura de 16 cm e foram compostos por fibras de coco não alinhadas. Para tanto, o filtro com fibra de coco de escoamento ascendente do Estágio 1 (FFCA1), imediatamente após o PFRC1, recebeu 231,07 g de fibras para composição do seu leito filtrante, enquanto o filtro com fibra de coco de escoamento descendente (FFCD1) recebeu 241,64 g de fibras.

2.1.2 Estágio 2

O Estágio 2 teve início após o término do Estágio 1 e toda a configuração do sistema de FiME apresentada no primeiro Estágio foi preservada. Contudo, os materiais que compõem os leitos filtrantes foram retirados e lavados, sendo posteriormente repostos nos tubos cilíndricos de PVC.

Além disso, os filtros lentos com leitos filtrantes de fibras de coco receberam adição de três camadas de manta não tecida, sobrepostas entre si, e depositadas diretamente no topo dos seus respectivos leitos filtrantes, de modo a verificar possíveis melhorias no efluente do sistema promovidas pela adição das camadas de manta.

Ademais, semelhantemente ao Estágio 1, todas as etapas compreendidas pelo sistema receberam o sufixo “2”, cujo intuito foi evidenciar as alterações realizadas nos leitos filtrantes, bem como associar a etapa do sistema ao referido Estágio. Para tanto, o pré-filtro com leito filtrante de resíduo cerâmico no Estágio 2 (PFRC2), embora não tenha recebido adição de manta, também recebe o sufixo indicador do presente estágio.

Nesse sentido, os filtros lentos com leito filtrante de fibra de coco no Estágio 2, tanto o de escoamento ascendente (FFCA2) quanto o de escoamento descendente (FFCD2), foram monitorados e avaliados conforme desempenho alcançado pela combinação das fibras de coco com as camadas de manta não tecida.

2.2 Materiais do leito filtrante

2.2.1 Fibra de coco

A fibra utilizada foi proveniente de loja de materiais para jardinagem. Para tanto, antes da aplicação como meio filtrante, as fibras foram submetidas à lavagem em duas etapas: primeiramente procedeu-se com o uso da água proveniente da rede de abastecimento para lavagens consecutivas da fibra, até que a água de lavagem não apresentasse coloração excessiva perceptível visualmente, prosseguindo então com a segunda etapa, que consistiu em reservar a fibra imersa em água destilada sucessivas vezes, com intervalos de aproximadamente 24 horas, até que a descoloração da fibra apresentasse redução visual. O material lavado foi exposto à temperatura ambiente para secagem natural antes da aplicação aos filtros.

Anteriormente ao preenchimento dos filtros com a fibra, os filtros foram preenchidos com água, e só então foi dada continuidade com a adição manual das fibras nas estruturas de PVC. Esse procedimento foi realizado de modo a minimizar a formação de bolhas de ar no interior do meio filtrante. Considerando a quantidade de fibra utilizada nesses filtros, como exposto anteriormente, pode-se estabelecer que FFCA1 = FFCA2 e FFCD1 = FFCD2 e as respectivas densidades de aplicação podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1: Densidade de ocupação das fibras de coco como meio filtrante.

	FFCA1 e FFCA2	**FFCD1 e FFCD2**
Quantidade de fibra (g)	231,07	241,64
Volume ocupado (cm^3)	$1{,}26 \times 10^3$	$1{,}26 \times 10^3$
Densidade de aplicação (g/cm^3)	0,18	0,19

Fonte: Autor (2020).

2.2.2 Resíduo cerâmico

Os resíduos de cerâmica vermelha utilizados foram coletados em depósitos temporários dos resíduos de construção e demolição (RCD) da Universidade Federal de Sergipe, de forma que houve inspeção manual rigorosa, a fim de selecionar apenas materiais livres de eventuais impurezas aderidas, como argamassas de cimento, gesso e resquícios de produtos químicos, a exemplo das tintas e vernizes, dentre outros. Além disso, foi considerada a preferência para os resíduos de blocos cerâmicos, uma vez observada sua predominância em meio aos detritos.

Os resíduos cerâmicos foram processados com a utilização de um triturador no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas (LAMCE) do DEC/UFS e, em seguida,

foi realizado o processo de quarteamento da amostra, segundo recomendações da NBR 10007 (ABNT, 2004). Além disso, a fim de reduzir ao máximo a possibilidade de impurezas aderidas ao material triturado, este foi lavado consecutivas vezes com água proveniente da rede de abastecimento, até que a água de lavagem não apresentasse coloração excessiva visualmente perceptível. Em seguida, o material foi exposto à temperatura ambiente para a secagem natural antes da aplicação ao filtro.

Além disso, a caracterização granulométrica foi realizada a partir da obtenção de medidas da maior dimensão, em uma direção, para uma amostragem dos grãos triturados. Esse procedimento foi realizado através da utilização de paquímetro digital, possibilitando obter a relação $D_{máx}/D_{mín}$ da direção considerada (Tabela 2).

Tabela 2: Descrição do resíduo cerâmico triturado.

Média (mm)	**Mediana (mm)**	**Desvio Padrão**	**$D_{máx}$ (mm)**	**$D_{mín}$ (mm)**	**$D_{máx}/D_{mín}$**
22,52	20,93	7,40	42,89	11,58	3,30

Fonte: Autor (2020).

2.2.3 Manta geotêxtil

A manta geotêxtil utilizada foi do tipo não tecida, produzida com fibras cortadas em poliéster, agulhadas e consolidada termicamente por calandragem (MACCAFERRI, 2019), com aquisição através de loja especializada em materiais de impermeabilização e drenagem. As características da manta foram fornecidas pelo fabricante e estão dispostas no Quadro 1.

Quadro 1: Características da manta geotêxtil não tecida

Características físicas		
Gramatura (g/m^2)	150	ASTM D5261 / ABNT NBR ISSO 9864
Espessura (mm)	1,2	ASTM D5199 / ABNT NBR ISSO 9863-1
Ponto de amolecimento (°C)	230 a 249	------
Resistência U.V (%/ horas)	50/500	ASTM D4355
Cor	Preta	------
Características hidráulicas		
Permeabilidade normal (cm/s)	0,23	ASTM D4491 / ABNT NBR ISSO 11058
Permissividade (s^{-1})	1,7	ASTM D4491 / ABNT NBR ISSO 11058
Velocidade do fluxo (m/s)	0,10	ASTM D4491 / ABNT NBR ISSO 11058
Abertura aparente (AOS) (mm)	0,075	ASTM D4751

Fonte: MACCAFERRI (2019).

Com relação ao uso da manta, por não haver necessidade de processamento prévio à sua aplicação, esta foi simplesmente cortada em círculos de mesmo diâmetro que as estruturas de

PVC e adicionada manualmente ao topo dos leitos filtrantes de fibra de coco, atentando à disposição de três camadas sobrepostas entre si.

Ademais, como forma de evitar possíveis deslocamentos entre as camadas de manta, estas foram sobrepostas por uma camada composta por pedras de brita. Para tanto, as pedras foram dispostas de forma espaçada, a fim de que atuassem apenas como contenção da manta, não desempenhando qualquer contribuição ao processo de filtração.

2.3 Água de estudo

A água de estudo foi sintetizada como resultado da mistura entre a água captada de uma fonte subterrânea e adição de 10% de esgoto bruto, a fim de promover a elevação de parâmetros físicos, como cor e turbidez, além de garantir a presença permanente de microrganismos. A fonte subterrânea de água e a Estação de Tratamento de Esgoto, onde foram realizadas as coletas, estavam localizadas na própria UFS.

Nesse sentido, o monitoramento da água bruta sintetizada ocorreu por meio da coleta de amostras com aproximadamente 50 mL através do registro contido no R2. Para tanto, o registro estava localizado à cota de cinco centímetros do fundo do reservatório e o monitoramento foi realizado com frequência de 4 a 5 dias/semana. Outrossim, os parâmetros predefinidos para o monitoramento da água bruta foram os mesmos para a água efluente às etapas de filtração.

2.4 Taxa de filtração e regime de operação

Tendo em vista o já exposto para o funcionamento do sistema piloto, considerando que o R2 dispunha de boia reguladora para carga hidráulica do sistema e torneira para ajustes da vazão, optou-se por vazão de aproximadamente 1 $x10^{-3}$ m^3/h na saída do reservatório, a fim de promover taxa de filtração constante e igual a 3 m^3/m^2 dia ± 10% para os filtros.

Por outro lado, em se tratando do regime de operação, a alimentação do sistema de FiME foi realizada por meio de regime intermitente. Tal decisão foi tomada considerando que o R2, uma vez dispondo de volume útil igual a 18 L e operando sob vazão de 1 $x10^{-3}$ m^3/h, seria esgotado em aproximadamente 18 horas de operação, de modo que não haveria possibilidade de posterior acionamento do sistema de recalque, haja vista que este ocorria de forma manual.

2.5 Análise da água bruta e filtrada

O monitoramento da água bruta e filtrada foi realizado conforme parâmetros apresentados pelo Quadro 2, que expõe também as frequências de análises, metodologias e equipamentos utilizados. Além disso, as análises dos parâmetros físico-químicos foram realizadas no Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente (SAMA) do Departamento de Engenharia Civil da UFS, enquanto as amostras de coliformes totais e termotolerantes foram analisadas no Laboratório de Bioquímica Industrial do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da UFS.

Quadro 2: Parâmetros analisados.

Parâmetro	Unidade	Frequência	Metodologia/Equipamento
Cor aparente	(uC)	4 a 5 dias/semana	Metodologia 2120 (APHA, 2012)/Espectrofotômetro
Turbidez	(uT)	4 a 5 dias/semana	Metodologia 2130 (APHA, 2012)/Espectrofotômetro
pH	-	4 a 5 dias/semana	Metodologia 4500-H (APHA, 2012) /pHmetro
Temperatura	(°C)	4 a 5 dias/semana	Termômetro de Infravermelho
Condutividade elétrica	$\mu S\ cm^{-1}$	4 a 5 dias/semana	Metodologia 2510 (APHA, 2012) /pHmetro
Coliformes totais	NMP/100mL	1 a 2 dias/mês	Metodologia 9221B (APHA, 2012)
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	1 a 2 dias/mês	Metodologia 9221B (APHA, 2012)

Fonte: Autor (2020).

O monitoramento dos parâmetros supracitados permitiu avaliar o desempenho do sistema para ambos os Estágios, entretanto, devido às limitações enfrentadas, as análises de condutividade elétrica e microbiológicas não puderam ser realizadas para o Estágio 1. Nesse sentido, foram realizadas ainda análises estatísticas referentes aos valores apresentados no monitoramento, análises de eficiência quanto à remoção do parâmetro, Índice de Atendimento ao Padrão de Potabilidade (IAPP)[1] e Índice de Decaimento da Qualidade da Água (IDQA)[2].

Ademais, com o objetivo de agregar maior confiabilidade aos resultados, os valores alcançados foram analisados conforme teste de normalidade, através do teste de Shapiro-Wilk, e posterior aplicação de testes estatísticos paramétrico e não paramétrico. Este foi utilizado

[1] Relação entre o número de amostras, de um referido parâmetro, que atenderam ao padrão de potabilidade do Ministério da Saúde (MS) e o número total de amostras, para o mesmo parâmetro, em percentual.

[2] Relação entre o número de amostras que apresentaram piora da qualidade da água, para um referido parâmetro, e o número total de amostras do mesmo parâmetro, em percentual.

quando não verificadas adequações dos resultados à distribuição normal, ou ainda quando necessário comparar variáveis com distribuições normal e não-normal, enquanto aquele, por sua vez, foi utilizado apenas em casos de atendimento à distribuição normal. Para mais, todos os testes estatísticos foram feitos com nível de significância de 5% e as análises dos resultados procederam através de gráficos, figuras, tabelas e softwares, como *Excel* e *IBM SPSS*.

2.6 Parâmetros de estudo e respectivos limites adotados

No que diz respeito à água tratada e destinada ao consumo humano, é imprescindível atentar-se aos padrões de potabilidade instituídos pelo Ministério da Saúde (MS), através da Portaria de Consolidação (PRC) n° 5 de 03 de outubro de 2017 (BRASIL, 2017). Dos parâmetros analisados nesse estudo e citados no Quadro 2, a referida portaria, em seu Anexo XX, apresenta o valor máximo permitido (VMP) para os parâmetros de estudo (cor aparente, turbidez, pH e coliformes totais e termotolerantes), com exceção à condutividade elétrica (CE) e temperatura. O Quadro 3 expõe o VMP instituído pelo MS para os parâmetros monitorados no presente estudo.

Quadro 3: Parâmetros utilizados.

Parâmetro	Unidade	VMP
Cor aparente	uH	15
Turbidez	uT	1,0
pH	-	6,0 a 9,5
Coliformes totais	NMP/100mL	Ausência
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	Ausência

Fonte: Autor (2020).

O valor de referência adotado para condutividade elétrica foi o intermediário dentre os padrões estabelecidos nos países da América do Sul que, segundo Pinto (2006), é o da Bolívia, com VMP de 1500 μS cm^{-1}, já que a Colômbia possui o padrão mais restritivo (VMP de 1000 μS cm^{-1}), enquanto o Peru é o mais permissivo (VMP de 2000 μS cm^{-1}).

Para mais, embora o padrão de potabilidade do MS permita valores de até 5,0 uT para água tratada na rede de distribuição, a exigência para a água efluente aos filtros lentos torna-se mais restritiva, sendo tolerado até 1,0 uT (BRASIL, 2017). Sendo assim, em concordância ao MS, o presente estudo adotou turbidez de até 1,0 uT como parâmetro a ser atendido pela água filtrada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Desempenho do sistema piloto

3.1.1 Parâmetros físico-químicos

3.1.1.1 pH

As Tabelas 3 e 4 apresentam dados referentes à estatística descritiva para as observações de pH nos Estágios 1 e 2, respectivamente, em todas as etapas propostas pelo sistema de FiME, compreendidas desde a água bruta (AB), passando pelos PFRC e FFCA até o FFCD.

Tabela 3: Estatística descritiva para pH – Estágio 1.

	AB1	**PFRC1**	**FFCA1**	**FFCD1**
Média	7,60	7,43	7,29	7,29
Intervalo de maior frequência	7,77 – 7,90 (33,33 %)	7,57 - 7,70 (40,74 %)	7,19 - 7,32 (33,34 %)	7,29 - 7,42 (29,63 %)
Mediana	7,60	7,40	7,30	7,30
Desvio padrão	0,23	0,21	0,18	0,19
Mínimo	7,20	7,00	6,90	7,00
Máximo	7,90	7,70	7,60	7,70
Significância do teste de normalidade (> 5%)	0,026	0,028	0,085	0,263

Fonte: Autor (2020).

Tabela 4: Estatística descritiva para pH – Estágio 2.

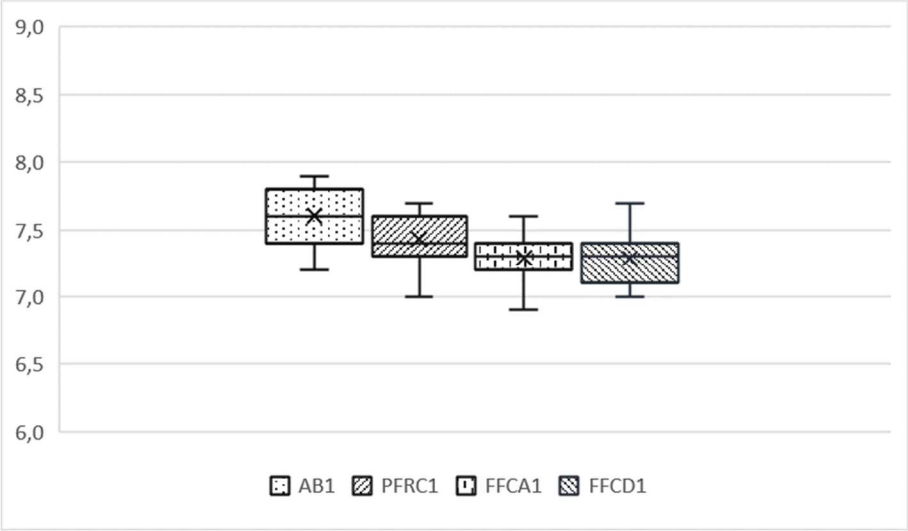
	AB2	**PFRC2**	**FFCA2**	**FFCD2**
Média	7,38	7,11	6,99	7,01
Intervalo de maior frequência	6,93 – 7,38 (26,67 %)	6,87 – 7,24 (33,34 %)	6,79 – 7,12 (26,27 %)	6,77 – 7,14 (30,00 %)
Mediana	7,40	7,10	6,90	6,95
Desvio padrão	0,56	0,51	0,46	0,49
Mínimo	6,00	6,10	6,10	6,00
Máximo	8,30	8,00	7,80	7,90
Significância do teste de normalidade (> 5%)	0,535	0,610	0,499	0,326

Fonte: Autor (2020).

Observados os valores de máximos e mínimos apresentados nas tabelas supracitadas, os resultados demonstram que os valores de pH permaneceram em concordância com as recomendações do MS (BRASIL, 2017), inclusive no que diz respeito à água bruta, que apresentou valores mínimos de 7,20 e 6,00, e máximos de 7,90 e 8,30, para os Estágios 1 e 2, respectivamente.

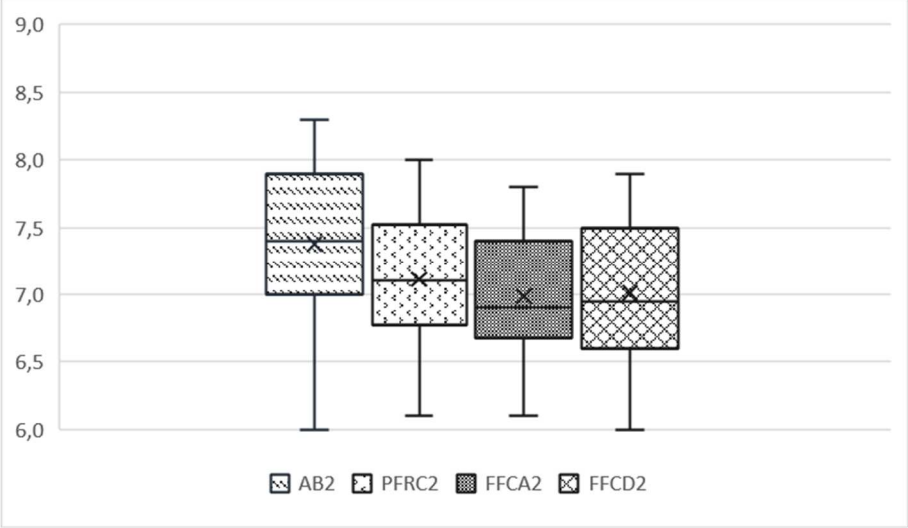
Ainda assim, mesmo estando o pH da água bruta em concordância ao padrão de potabilidade, os resultados expuseram a atuação dos filtros quanto à alteração do referido parâmetro. Tal afirmativa apoia-se na observação dos resultados apresentados pelas estatísticas descritivas, onde foi possível constatar que a água bruta, tanto AB1 quanto AB2, apresentou o maior valor de pH dentre todas as amostras analisadas, sofrendo redução ao passar pelo PFRC. Contudo, os FFCA e FFCD promoveram pouca variação do pH, como pode ser observado nas Figuras 2 e 3, respectivamente, para os Estágios 1 e 2.

Figura 2: Variação do pH – Estágio 1.



Fonte: Autor (2020).

Figura 3: Variação do pH – Estágio 2.



Fonte: Autor (2020).

Nesse sentido, mesmo com a maior parte das amostras efluentes aos filtros apresentando valores entre 7,19 e 7,70, para o Estágio 1, bem como 6,45 e 7,24 no Estágio 2, as Figuras 2 e 3 ilustraram a atuação das unidades de filtração, haja vista que as leituras de pH para a água efluente de cada unidade de filtração apresentaram inclinação para a redução do parâmetro.

Além disso, comparando estatisticamente os valores de pH entre amostras de água bruta e efluentes a cada unidade de filtração, assim como as amostras efluentes a cada filtro entre si, foram encontradas diferenças significativas, como exposto nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5: Comparação estatística entre leituras de pH (p – Valor) – Estágio 1.

	AB1	**PFRC1**	**FFCA1**	**FFCD1**
AB1	-	0,000 [w]	0,000 [w]	0,000 [w]
PFRC1	0,000 [w]	-	0,000 [w]	0,001 [w]
FFCA1	0,000 [w]	0,000 [w]	-	0,758 [T]
FFCD1	0,000 [w]	0,001 [w]	0,758 [T]	-

Fonte: Autor (2020).

Tabela 6: Comparação estatística entre leituras de pH (p – Valor) – Estágio 2.

	AB2	**PFRC2**	**FFCA2**	**FFCD2**
AB2	-	0,000 [T]	0,000 [T]	0,000 [T]
PFRC2	0,000 [T]	-	0,000 [T]	0,007 [T]
FFCA2	0,000 [T]	0,000 [T]	-	0,199 [T]
FFCD2	0,000 [T]	0,007 [T]	0,199 [T]	-

Fonte: Autor (2020).

Os resultados contidos nas Tabelas 5 e 6 explicitaram, além de diferenças significativas entre os valores das leituras de água bruta e de todos os filtros, diferenças entre as leituras do PFRC e FFCA, sempre respeitando os referidos Estágios, mas não demonstraram diferenças significativas entre as leituras do FFCA1 e FFCD1, tampouco entre as amostras dos FFCA2 e FFCD2. Nesse sentido, as análises estatísticas evidenciaram a tendência de redução do pH da água filtrada em relação à água afluente, estabelecendo concordância aos resultados apresentados por Babaei *et al.* (2019) e Pfannes *et al.* (2015), que também observaram redução do pH na água efluente aos seus filtros lentos.

[w] Teste não paramétrico de Wilcoxon: Utilizado quando não verificadas adequações dos resultados à distribuição normal, ou ainda quando necessário comparar variáveis com distribuições normal e não-normal.

[T] Teste paramétrico "T" pareado: Utilizado apenas quando verificado o atendimento à distribuição normal.

3.1.1.2 Temperatura

As Tabelas 7 e 8 expõem dados da estatística descritiva referente às observações de temperatura nos Estágios 1 e 2, respectivamente, em todas as fases propostas pelo sistema de FiME. Através destas é possível visualizar, dentre outros parâmetros, a faixa de variação da temperatura e as médias alcançadas, além da significância do teste de atendimento à distribuição normal (>5%).

Tabela 7: Estatística descritiva para temperatura (°C) – Estágio 1.

	AB1	**PFRC1**	**FFCA1**	**FFCD1**
Média	26,34	26,96	26,94	26,85
Intervalo de maior frequência	26,63-27,68 (55,56 %)	26,57-27,64 (51,86 %)	26,59-27,62 (62,96 %)	26,39-27,42 (77,78 %)
Mediana	27,00	27,00	27,00	27,00
Desvio padrão	0,90	0,95	0,87	0,88
Mínimo	24,50	24,40	24,50	24,30
Máximo	29,80	29,80	29,70	29,50
Significância do teste de normalidade (> 5%)	0,010	0,046	0,004	0,002

Fonte: Autor (2020).

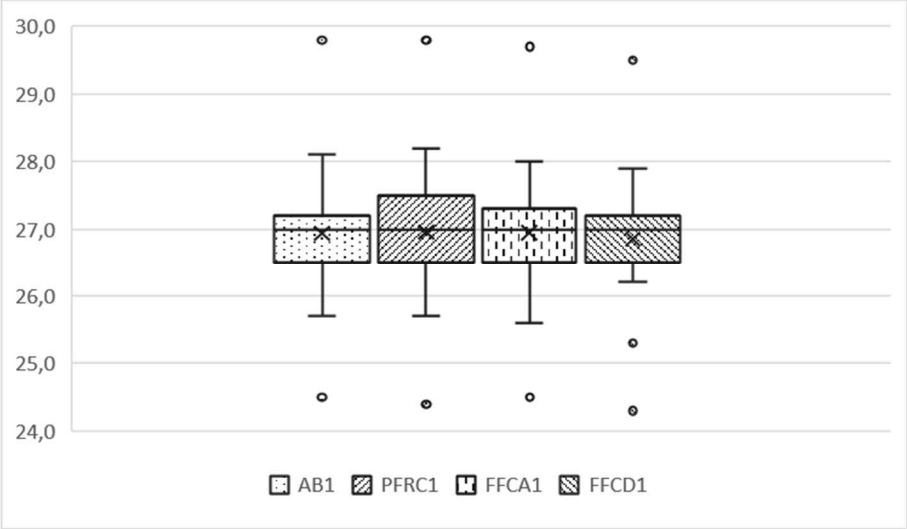
Tabela 8: Estatística descritiva para temperatura (°C) – Estágio 2.

	AB2	**PFRC2**	**FFCA2**	**FFCD2**
Média	27,00	26,99	26,90	26,62
Intervalo de maior frequência	26,39-27,82 (46,67 %)	25,57-26,62 (33,34 %)	26,37-27,34 (36,67 %)	26,97-27,88 (33,34 %)
Mediana	27,05	27,00	26,90	26,70
Desvio padrão	1,09	1,06	1,03	1,07
Mínimo	24,50	24,50	24,40	24,20
Máximo	29,20	29,80	29,30	28,80
Significância do teste de normalidade (> 5%)	0,974	0,860	0,999	0,726

Fonte: Autor (2020).

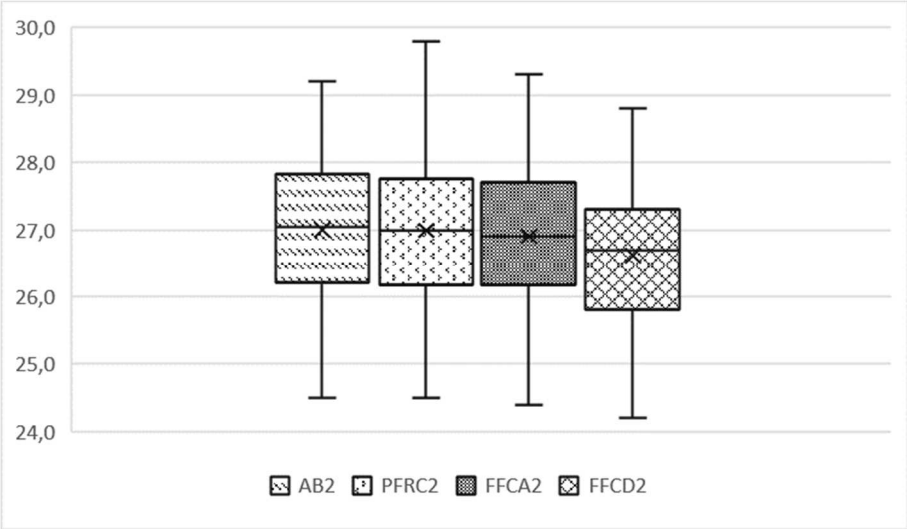
Nesse sentido, segundo as análises estatísticas, a água bruta dos dois Estágios apresentou variação entre 24,50 °C e 29,80 °C, tendo cerca de 55% das leituras compreendidas entre 26,63 °C e 27,68 °C no Estágio 1, enquanto no Estágio 2 cerca de 46% estiveram compreendidas entre 26,39 °C e 27,82 °C. Ademais, as médias alcançadas pelos filtros apresentaram pouca variação, como pode ser observado nas Figuras 4 e 5 (Estágio 1 e 2, respectivamente), que representam a variação do referido parâmetro ao longo do período de operação do sistema.

Figura 4: Variação da temperatura (°C) – Estágio 1.



Fonte: Autor (2020).

Figura 5: Variação da temperatura (°C) – Estágio 2.



Fonte: Autor (2020).

As Figuras 4 e 5, além de ratificarem as informações expressas nas Tabelas 7 e 8, apresentaram variação sutil entre as leituras de temperatura. Nesse sentido, a Figura 4 evidenciou semelhanças entre todas as fases do sistema de FiME para o Estágio 1, onde os *outliers* apresentados correspondem aos valores de mínimo e máximo do referido parâmetro, desde a AB1 até o FFCD1. Entretanto, particularidades foram apontadas para o FFCD1 em relação às demais etapas do sistema, visto que este apresentou um *outlier* intermediário, correspondente à temperatura de 25,30 °C. Para tanto, cabe avaliar os resultados apresentados

pela Tabela 9, que traz comparações entre as etapas do sistema por meio de análises estatísticas entre as médias de temperatura através do teste de Wilcoxon.

Tabela 9: Comparação estatística entre médias de temperatura – Estágio 1.

	AB1	**PFRC1**	**FFCA1**	**FFCD1**
AB1	-	0,498 [w]	0,858 [w]	0,015 [w]
PFRC1	0,498 [w]	-	0,599 [w]	0,001 [w]
FFCA1	0,858 [w]	0,599 [w]	-	0,001 [w]
FFCD1	0,015 [w]	0,001 [w]	0,001 [w]	-

Fonte: Autor (2020).

A tabela supracitada evidenciou ausência de diferenças significativas entre as médias das etapas AB1, PFRC1 e FFCA1, entretanto, foram expressas diferenças significativas acerca da média do FFCD1 em relação as médias das demais etapas. Por outro lado, embora a Figura 5 não tenha apresentado *outliers* para as amostras de temperatura no Estágio 2, a comparação estatística entre médias, exposta na Tabela 10, evidenciou diferenças significativas para as médias dos FFCA2 e FFCD2 quando comparados entre si e com as demais etapas do sistema. Para tanto, foi utilizado o teste "T" pareado, comparando as médias da AB2 com as médias das unidades de filtração, bem como comparadas as médias do PFRC2, FFCA2 e FFCD2 entre si.

Tabela 10: Comparação estatística entre médias de temperatura – Estágio 2.

	AB2	**PFRC2**	**FFCA2**	**FFCD2**
AB2	-	0,868 [T]	0,007 [T]	0,000 [T]
PFRC2	0,868 [T]	-	0,005 [T]	0,000 [T]
FFCA2	0,007 [T]	0,005 [T]	-	0,000 [T]
FFCD2	0,000 [T]	0,000 [T]	0,000 [T]	-

Fonte: Autor (2020).

Embora diferenças significativas entre as médias de temperatura para algumas etapas dos Estágios 1 e 2 tenham sido apontadas, a variação média do parâmetro entre os referidos filtros foi de baixa amplitude, ficando em torno de 5 °C, com médias em torno de 27 °C. As médias apresentadas são características da região onde foi realizado o experimento, onde a temperatura média máxima dos últimos 10 anos para a estação 83096, localizada em Aracaju - SE, foi de aproximadamente 27 °C (INMET, 2020).

Nesse sentido, quando os filtros lentos são submetidos a grandes variações de temperatura, a comunidade biológica pode ser significativamente afetada, entretanto os resultados apresentados evidenciaram pouca capacidade de influência do referido parâmetro sobre o proveito do tratamento. Tal afirmativa pôde ser assegurada pela literatura, através de trabalhos como o desenvolvido por Zhang *et al.* (2018), que apontou a temperatura em torno de

26 °C como ideal para o seu sistema com utilização de filtros lentos, ou ainda pelas constatações levantadas por Arnold *et al.* (2016), os quais defendem que os microrganismos são capazes de se adaptar a variações de temperatura, desde que estas não sejam extremas.

3.1.1.3 Cor aparente

As Tabelas 11 e 12 (para os Estágios 1 e 2, respectivamente) apresentam dados relacionados à estatística descritiva para as observações de cor aparente, bem como dados sobre o IAPP e o IDQA, para cada etapa dos Estágios 1 e 2, respectivamente. Paralelamente, a fim de analisar o parâmetro de entrada e saída no sistema de filtração, a Tabela 13 expõe os IAPP e IDQA globais, considerando, portanto, apenas os valores para a água bruta (AB1 e AB2) e água filtrada (AF1 e AF2) efluente ao sistema de FiME.

Tabela 11: Estatística descritiva de cor aparente para cada etapa do sistema (uC) – Estágio 1.

	AB1	**PFRC1**	**FFCA1**	**FFCD1**
Média	73,44	28,93	36,07	39,37
Intervalo de maior frequência	51,41-79,80 (37,03 %)	3,00-17,00 (33,33 %)	34,61-49,40 (44,45 %)	13,00-31,40 (48,15 %)
Mediana	70,00	24,00	37,00	32,00
Desvio padrão	31,25	18,16	17,50	23,02
Mínimo	23,00	3,00	5,00	13,00
Máximo	165,00	73,00	79,00	105,00
Significância do teste de normalidade (> 5%)	0,317	0,210	0,424	0,007
IAPP (%)	0,00	29,63	11,11	3,70
IDQA (%)	-	0,00	59,26	55,56

Fonte: Autor (2020).

Tabela 12: Estatística descritiva de cor aparente para cada etapa do sistema (uC) – Estágio 2.

	AB2	**PFRC2**	**FFCA2**	**FFCD2**
Média	70,57	35,07	37,63	36,87
Intervalo de maior frequência	27,00-56,40 (43,33 %)	32,61-45,40 (36,67 %)	21,21-40,40 (40,00 %)	23,41-42,80 (50,00 %)
Mediana	70,50	35,50	31,00	33,50
Desvio padrão	31,53	14,32	24,34	23,99
Mínimo	27,00	7,00	2,00	4,00
Máximo	174,00	71,00	98,00	101,00
Significância do teste de normalidade (> 5%)	0,012	0,924	0,048	0,003
IAPP (%)	0,00	6,67	13,33	13,33
IDQA (%)	-	0,00	33,33	43,33

Fonte: Autor (2020).

Tabela 13: IAPP e IDQA do sistema para cor aparente – Estágios 1 e 2.

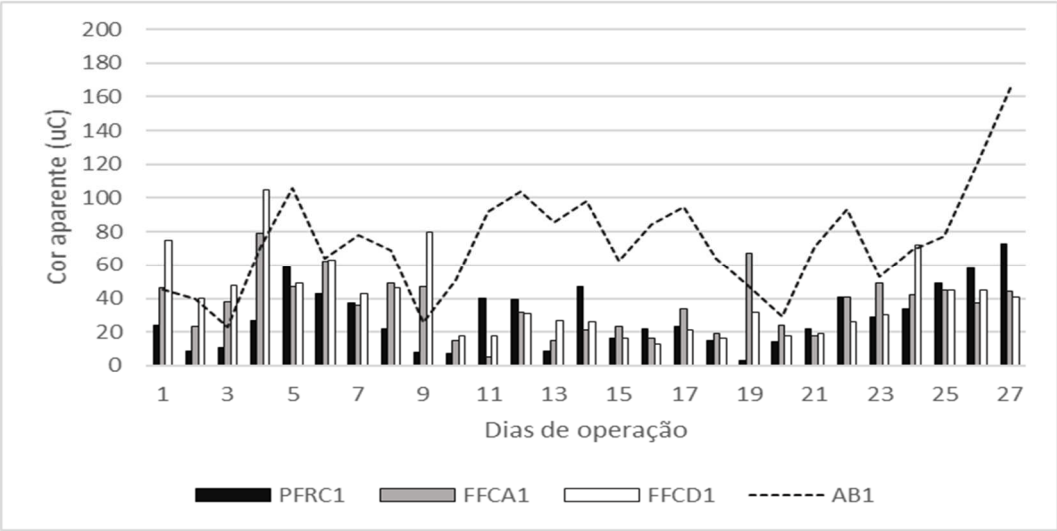
	AB1	AF1	AB2	AF2
IAPP (%)	0,00	3,70	0,00	13,33
IDQA (%)	-	22,22	-	13,33

Fonte: Autor (2020).

Observadas as Tabelas 11 e 12, os valores de cor aparente apresentados para a água bruta de cada Estágio apresentaram semelhanças em suas ordens de grandeza, a exemplo de suas médias, que permaneceram na ordem de 70 uC, podendo ainda observar que os intervalos de maior frequência contemplaram cor aparente em torno de 27,00 uC e 79,80 uC. Além disso, os valores de mínimo para AB1 e AB2 foram 23 uC e 27 uC, respectivamente, ambos acima do VMP estabelecido pelo MS, ratificando os valores descritos para seus respectivos IAPP.

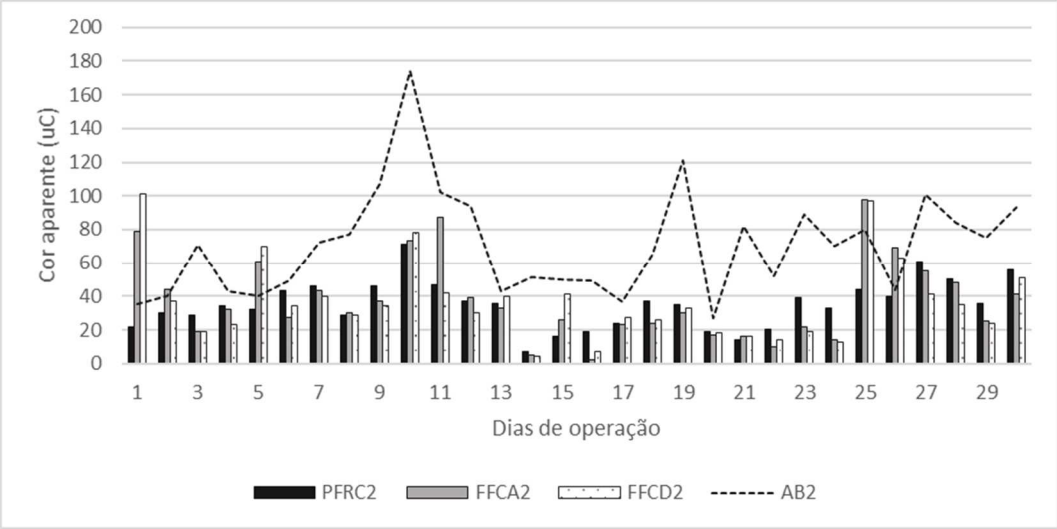
Quanto às análises de cor parente, as Figuras 6 e 7 esboçam o comportamento temporal das etapas de filtração em relação à água bruta para os Estágios 1 e 2, respectivamente.

Figura 6: Comportamento temporal de cor aparente – Estágio 1.



Fonte: Autor (2020).

Figura 7: Comportamento temporal de cor aparente – Estágio 2.



Fonte: Autor (2020).

Embora as unidades de filtração não tenham atingido significativos IAPP, os resultados de monitoramento da cor aparente mostraram que houve melhoria na qualidade da água filtrada em relação a água bruta, corroborando com os valores de IAPP e IDQA expressos na Tabela 13. Entretanto, o monitoramento de desempenho dos filtros apresentou alguns picos de piora da qualidade da água, expondo valores que superaram os valores referentes à água bruta.

O registro dos picos de piora na qualidade da água pode estar associado à influência dos dias em que o sistema permaneceu sem operação, visto que, em geral, esses registros ocorreram nas leituras de amostras imediatamente após finais de semana prolongados devido a feriados, apresentando concordância aos estudos realizados por Verma *et al.* (2017), que pontuam que os filtros lentos podem ser negativamente influenciados por condições ociosas do sistema.

O monitoramento mostrou ainda que a redução de cor aparente ocorreu de forma mais acentuada nos PFRC1 e PFRC2 em comparação às demais etapas de filtração, respeitando seus respectivos Estágios. O comportamento dos PFRC1 e PFRC2 ratificam às análises estatísticas expostas nas Tabelas 11 e 12, que expuseram ausência de piora da qualidade da água afluente, expressa pelo IDQA igual a zero para esses filtros.

Por outro lado, as análises de IDQA dos FFCA1, FFCD1, FFCA2 e FFCD2 evidenciaram queda na qualidade da água, sobretudo nos dois primeiros, que apresentaram IDQA de 59,26% e 55,56%, respectivamente. Tal verificação pôde ser amparada pelos resultados de testes estatísticos apresentados nas Tabelas 14 e 15 (respectivamente para os Estágios 1 e 2), quando

foram comparadas as médias de cor aparente da água bruta e efluente a cada unidade de filtração, bem como as amostras efluentes de cada unidade entre si.

Tabela 14: Comparação estatística entre médias de cor aparente – Estágio 1.

	AB1	**PFRC1**	**FFCA1**	**FFCD1**
AB1	-	0,000 T	0,000 T	0,001 W
PFRC1	0,000 T	-	0,118 T	0,148 W
FFCA1	0,000 T	0,118 T	-	0,328 W
FFCD1	0,001 W	0,148 W	0,328 W	-

Fonte: Autor (2020).

Tabela 15: Comparação estatística entre médias de cor aparente – Estágio 2.

	AB2	**PFRC2**	**FFCA2**	**FFCD2**
AB2	-	0,000 W	0,000 W	0,000 W
PFRC2	0,000 W	-	0,446 W	0,325 W
FFCA2	0,000 W	0,446 W	-	0,927 W
FFCD2	0,000 W	0,325 W	0,927 W	-

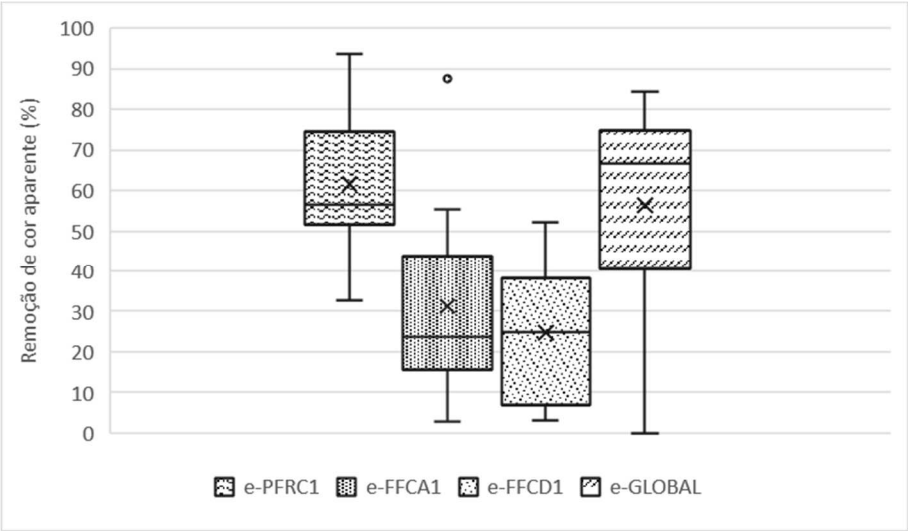
Fonte: Autor (2020).

As análises estatísticas puderam expressar a existência de diferenças significativas entre as médias de água bruta e as médias referentes às unidades de filtração para os dois Estágios, mas não foram encontradas diferenças significativas entre as médias das unidades de filtração entre si. Nesse sentido, os PFRC1 e PFRC2 apresentaram médias com diferenças significativas quando comparados à água bruta, mas não quando comparados às demais etapas de filtração dos respectivos Estágios.

Entretanto, o exposto não contradiz o desempenho dos PFRC1 e PFRC2, tampouco infere que o desempenho dos FFCA e FFCD dos Estágios 1 e 2 tenha sido tão efetivo quanto os PFRC1 e PFRC2, pelo contrário. A ausência de diferenças significativas entre as médias supracitadas indica que os FFCA1, FFCD1, FFCA2 e FFCD2 não foram capazes de promover melhorias na água efluente aos PFRC1 e PFRC2, respectivamente.

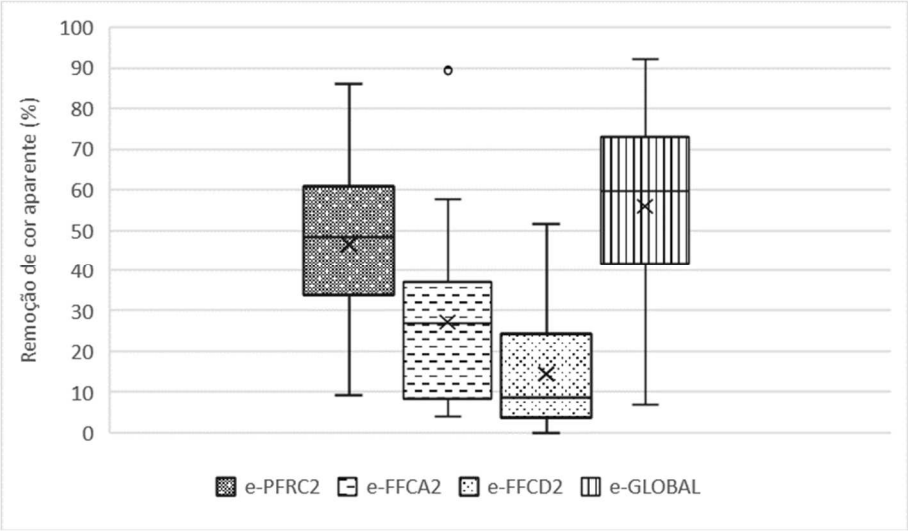
Nesse sentido, as análises estatísticas em conjunto aos IAPP e IDQA, respeitando os respectivos Estágios, evidenciaram o notório desempenho dos PFRC1 e PFRC2. Além disso, ratificando o exposto, as Figuras 8 e 9 ilustram o desempenho de cada etapa de filtração frente à remoção de cor aparente, bem como a eficiência global do sistema de FiME, para os Estágios 1 e 2, respectivamente.

Figura 8: Eficiência de remoção de cor aparente – Estágio 1.



Fonte: Autor (2020).

Figura 9: Eficiência de remoção de cor aparente – Estágio 2.



Fonte: Autor (2020).

Tendo em vista que as Tabelas 11 e 12 apresentaram variação entre as médias de AB1 e AB2, foram realizadas análises estatísticas pelo teste Mann-Whitney sobre as amostras das etapas do sistema de FiME, a fim de que se tornasse possível estabelecer comparações entre as eficiências médias de remoção de cor aparente para as etapas de filtração dos dois Estágios. No entanto, os resultados alcançados não apresentaram diferenças significativas entre as amostras das etapas de filtração do Estágio 1 em relação ao Estágio 2, tampouco sobre AB1 e AB2, evidenciando que os dois Estágios foram alimentados com águas estatisticamente iguais.

Concernente às eficiências globais do sistema, os Estágios 1 e 2 apresentaram médias de remoção de cor aparente em torno de 56% e, de modo geral, apresentaram-se em concordância às análises apresentadas anteriormente. Entretanto, conforme as Figuras 8 e 9, as eficiências médias de remoção de cor aparente para os PFRC2, FFCA2 e FFCD2 apresentaram redução em relação às eficiências médias alcançadas pelos PFRC1, FFCA1 e FFCD1, respectivamente.

Nesse sentido, análises estatísticas pelo teste Mann-Whitney também foram realizadas sobre as eficiências de remoção de cor aparente dos dois Estágios. Os resultados apresentaram diferenças significativas entre as eficiências médias dos PFRC1 e PFRC2, ratificando o exposto nas Figuras 8 e 9, que apresentaram as eficiências médias de aproximadamente 60% para o PFRC1 e 46% para o PFRC2. Contudo, a diferença entre as médias das eficiências supracitadas pode estar associada a um possível processo de colmatação dos poros da cerâmica, muito embora não tenha sido identificada perda de carga associada.

Diferenças significativas quanto à comparação entre as eficiências médias de remoção dos FFCA1 e FFCA2, bem como entre as eficiências médias de remoção dos FFCD1 e FFCD2, não foram apresentadas. Para tanto, uma vez que a água de estudo utilizada nos dois Estágios foi estatisticamente igual, e diante da comparação estatística entre as eficiências dos FFCA1, FFCD1, FFCA2 e FFCD2, infere-se que a adição de três camadas de manta não tecida sobre o leito filtrante de fibra de coco foi insuficiente para promover melhorias frente à eficiência na remoção de cor aparente.

Por outro lado, cabe ressaltar que a adição das camadas de manta foi conveniente para promover maior estabilidade dos FFCA2 e FFCD2, visto que, uma vez avaliados seus respectivos IAPP e IDQA, esses filtros foram capazes de alcançar maiores níveis de atendimento ao padrão de potabilidade e apresentaram menores valores de IDQA, quando comparados aos FFCA1 e FFCD1. Todavia, estudos realizados por Santos (2015) evidenciaram que o bom desempenho dos filtros com leito filtrante de manta não tecida, frente à remoção de parâmetros físicos, ocorre predominantemente em função do amadurecimento biológico do meio filtrante.

Dessa forma, tendo em vista os processos utilizados pelos filtros lentos para melhoria da qualidade água filtrada, Zhang *et al.* (2018) expressam que o sistema só é efetivamente inicializado a partir do alcance de uma faixa de remoção estável e, indo além, Verma *et al.* (2017) apontam que a operação estável dos filtros lentos é alcançada após formação da camada biologicamente ativa. Sendo assim, o período de operação dos filtros nos Estágios 1 e 2 pode

não ter sido suficiente para favorecer a formação da s*chmutzdecke*, visto que é necessário, em média, 30 dias de operação para alcançar os primeiros resultados, como indica CAWST (2012), em conformidade com Zhang *et al.* (2018), que observaram a formação do biofilme a partir de 33 dias de operação do seu sistema.

Nesse contexto, considerando a não formação da s*chmutzdecke*, o processo de adsorção foi predominante para a melhoria na qualidade da água filtrada, entretanto Verma *et al.* (2017) defendem que sua atuação é diretamente afetada quando há redução de profundidade do leito filtrante. Ademais, o desempenho inferior dos FFCA1, FFCD1, FFCA2 e FFCD2, quando comparados aos PFRC1 e PFRC2, pode estar associado à reduzida profundidade dos seus respectivos leitos filtrantes, cerca de 16 cm para os leitos de fibras contra 38 cm para o PFRC.

Além disso, outra interferência pode estar associada ao possível desprendimento de cor por parte das fibras utilizadas como meio filtrante, e posterior incremento de cor na água de estudo. Situação semelhante foi enfrentada por Lima (2020), ao utilizar resíduo de maravalha de angelim-vermelho como camada intermediária em seus filtros lentos. Todavia, as possíveis dificuldades enfrentadas pelos filtros com fibra de coco podem ser potencialmente evitadas e/ou corrigidas através de adequações aos filtros, como aumento de profundidade dos leitos filtrantes e mudanças no pré-tratamento utilizado para as fibras, como permanência em água destilada por mais tempo ou mesmo através da aplicação de pré-tratamentos mais rigorosos, como tratamentos químicos.

Ainda vale ressaltar que, de modo geral, o pré-filtro no sistema de filtração em múltiplas etapas não é projetado com a finalidade de promover a qualidade final da água tratada, entretanto os PFRC1 e PFRC2 apresentaram comportamento promissor frente aos elevados valores de cor aparente encontrados na água bruta, oferecendo estabilidade durante todo o período de operação, visto que o IDQA apresentado foi igual a zero para os dois Estágios. Em conformidade ao exposto, Jayalath *et al.* (2016) e Rajapakse e Fenner (2011) também obtiveram resultados positivos com uso de materiais cerâmicos em detrimento ao uso dos tradicionais seixos nos pré-filtros.

3.1.1.4 Turbidez

As Tabelas 16 e 17 trazem dados acerca das estatísticas descritivas de turbidez para a água afluente e efluente a cada filtro, considerando os Estágios 1 e 2, respectivamente.

Paralelamente, as Figuras 10 e 11 ilustram o comportamento temporal das etapas de filtração em relação à água bruta para os Estágios 1 e 2, respectivamente.

Tabela 16: Estatística descritiva de turbidez (uT) – Estágio 1.

	AB1	**PFRC1**	**FFCA1**	**FFCD1**
Média	7,56	2,70	3,67	3,93
Intervalo de maior frequência	3,61 – 7,20 (37,04 %)	2,81 – 4,20 (40,74 %)	0 – 2,00 (33,33 %)	0 – 2,40 (44,44 %)
Mediana	8,00	3,00	4,00	3,00
Desvio padrão	3,95	1,81	2,43	3,34
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	18,00	7,00	10,00	12,00
Significância do teste de normalidade (> 5%)	0,699	0,112	0,248	0,001
IAPP (%)	7,14	25,93	22,22	25,93
IDQA (%)	-	3,70	48,15	44,44

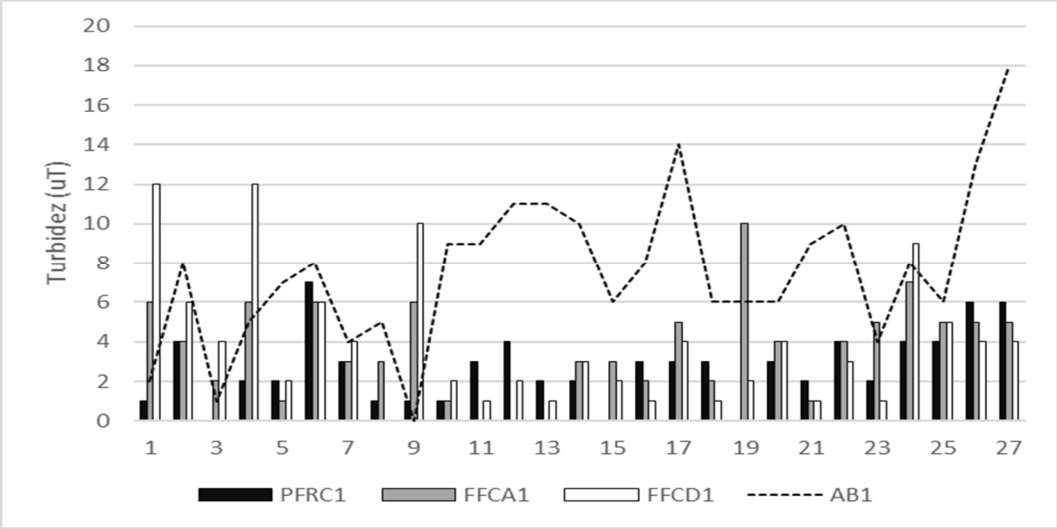
Fonte: Autor (2020).

Tabela 17: Estatística descritiva de turbidez (uT) – Estágio 2.

	AB2	**PFRC2**	**FFCA2**	**FFCD2**
Média	7,43	2,70	3,40	2,90
Intervalo de maior frequência	4,81 – 8,60 (40,00 %)	2,71 – 4,20 (50,00 %)	0 – 2,00 (40,00 %)	0 – 2,00 (53,33 %)
Mediana	6,00	3,00	3,00	2,00
Desvio padrão	4,68	1,51	2,62	2,52
Mínimo	1,00	7,00	10,00	10,00
Máximo	20,00	7,00	10,00	10,00
Significância do teste de normalidade (> 5%)	0,005	0,038	0,028	0,001
IAPP (%)	3,33	26,67	23,33	30,00
IDQA (%)	-	0,00	30,00	13,33

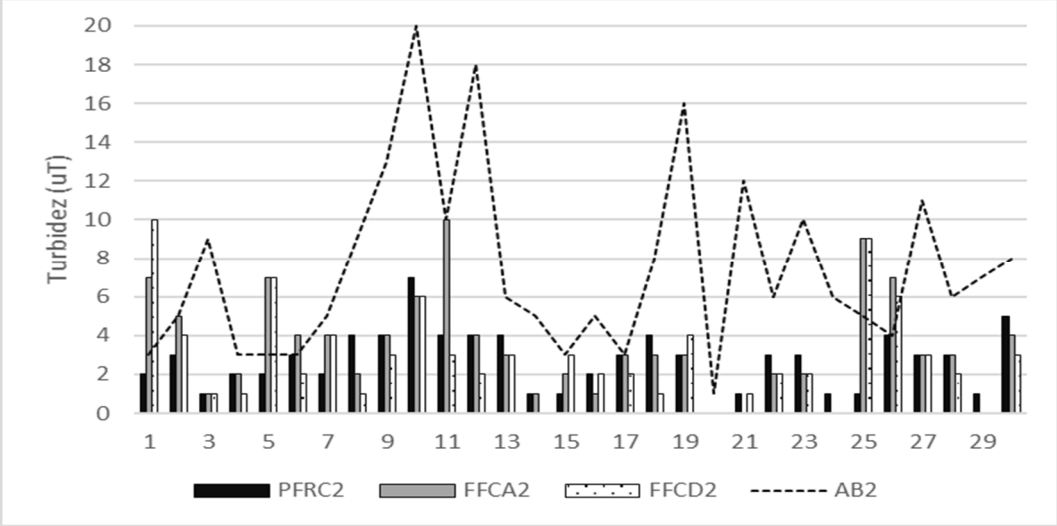
Fonte: Autor (2020).

Figura 10: Comportamento temporal de turbidez – Estágio 1.



Fonte: Autor (2020).

Figura 11: Comportamento temporal de turbidez – Estágio 2.



Fonte: Autor (2020).

De acordo com as análises de estatística descritiva, a turbidez da água bruta apresentou variação média de 0 a 20 uT, salientando que a maior parte das amostras, representadas por aproximadamente 40%, apresentaram valores compreendidos entre 3,61 e 7,20 uT no Estágio 1, enquanto no Estágio 2 os valores ficaram entre 4,81 e 8,60 uT. Para tanto, em se tratando do IAPP para AB1, apenas 7,41% das amostras conseguiram apresentar turbidez menor ou igual a 1 uT, como exige padrão de potabilidade instituído pelo MS para água na saída de filtros lentos, ao passo em que situação mais desfavorecida foi encontrada para AB2, apresentando apenas 3,33% das amostras estiveram em concordância à PRC n° 5 do MS (BRASIL, 2017).

Nesse sentido, a Tabela 18 apresenta os IAPP e IDQA globais do sistema considerando apenas os valores de água bruta (AB1 e AB2) e água filtrada (AF1 e AF2) de ambos estágios.

Tabela 18: IAPP e IDQA do sistema para turbidez – Estágios 1 e 2.

	AB1	**AF1**	**AB2**	**AF2**
IAPP (%)	7,41	25,93	3,33	30,00
IDQA (%)	-	18,52	-	13,33

Fonte: Autor (2020).

Embora o IAPP alcançado pelo sistema não ultrapasse a marca de 30%, o monitoramento de turbidez contido nas Figuras 10 e 11 trouxe resultados positivos sobre a melhoria na qualidade da água filtrada em relação a água bruta, constatando que houve redução de turbidez na água filtrada desde o início de operação do sistema.

Semelhantemente ao monitoramento de cor aparente, o desempenho dos filtros para a turbidez apresentou alguns picos de piora da qualidade da água filtrada, inclusive tendo algumas leituras de água filtrada com valores de turbidez acima dos valores atribuídos à água bruta. Todavia, foi observado que as leituras das amostras efluentes aos filtros que apresentaram picos de turbidez foram realizadas nos mesmos dias das leituras de água filtrada que apresentaram picos de cor aparente, permitindo inferir que os dias em que os filtros permaneceram sem operação foram capazes de influenciar negativamente não apenas os resultados de cor aparente, mas também nos resultados de turbidez.

Para mais, o IDQA dos PFRC1 e PFRC2 para turbidez apresentou resultados satisfatórios, visto que, de modo geral, foi onde ocorreu redução do parâmetro de forma mais acentuada. Tais afirmações apoiam-se ainda nas Tabelas 19 e 20 (Estágios 1 e 2, respectivamente), que trazem informações acerca de comparações entre as análises estatísticas das médias obtidas para cada etapa do sistema.

Tabela 19: Comparação estatística entre médias de turbidez – Estágio 1.

	AB1	**PFRC1**	**FFCA1**	**FFCD1**
AB1	-	0,000 ^{T}	0,000 ^{T}	0,007 ^{w}
PFRC1	0,000 ^{T}	-	0,097 ^{T}	0,373 ^{w}
FFCA1	0,000 ^{T}	0,097 ^{T}	-	0,436 ^{w}
FFCD1	0,007 ^{w}	0,373 ^{w}	0,436 ^{w}	-

Fonte: Autor (2020).

Tabela 20: Comparação estatística entre médias de turbidez – Estágio 2.

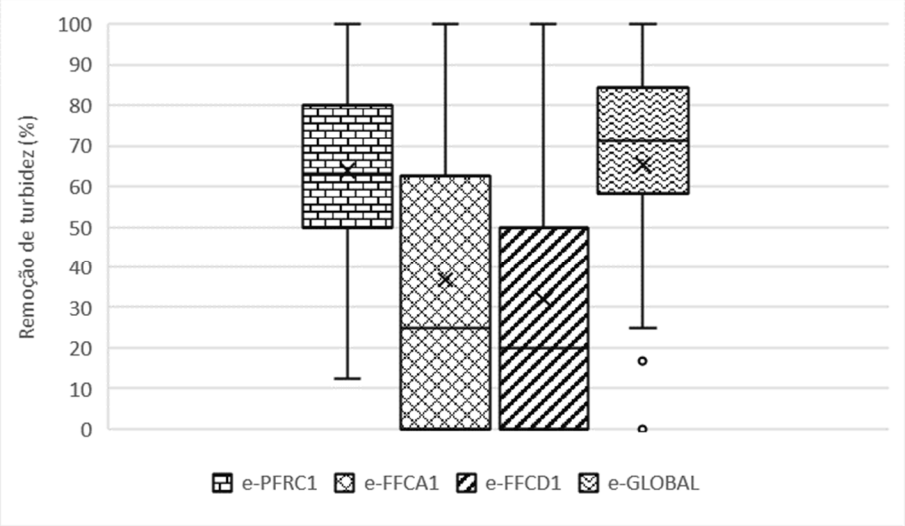
	AB2	PFRC2	FFCA2	FFCD2
AB2	-	0,000 [w]	0,001 [w]	0,000 [w]
PFRC2	0,000 [w]	-	0,319 [w]	0,571 [w]
FFCA2	0,001 [w]	0,319 [w]	-	0,065 [w]
FFCD2	0,000 [w]	0,571 [w]	0,065 [w]	-

Fonte: Autor (2020).

Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre as médias dos PFRC1 e AB1, bem como PFRC2 e AB2, respectivamente, mas não evidenciaram diferenças significativas quando comparadas as médias dos PFRC, FFCA e FFCD entre si, considerando os referidos Estágios. A ausência de diferenças significativas entre as médias supracitadas indica que os FFCA1, FFCD1, FFCA2 e FFCD2 não foram capazes de promover melhorias na água efluente aos PFRC1 e PFRC2.

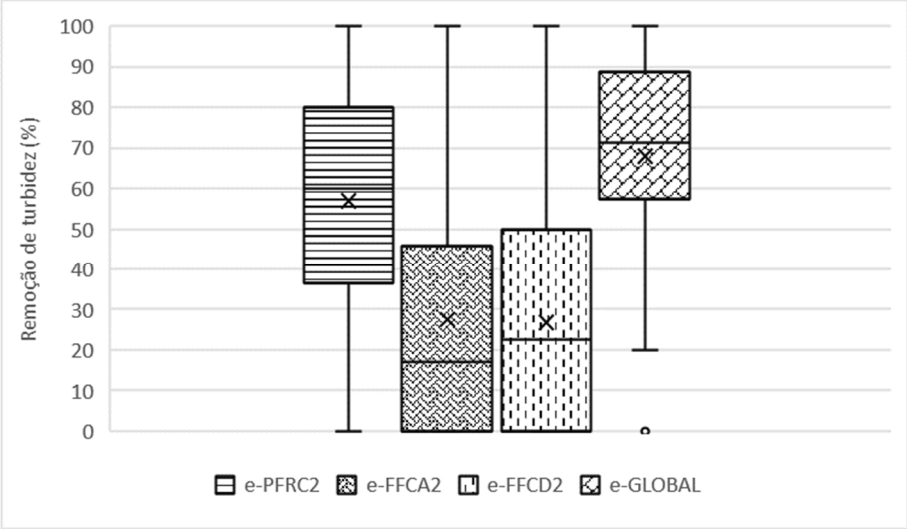
Nesse sentido, as Figuras 12 e 13 ilustram as eficiências de remoção para cada unidade de filtração, bem como a eficiência global do sistema, para os Estágios 1 e 2, respectivamente.

Figura 12: Eficiência de remoção de turbidez – Estágio 1.



Fonte: Autor (2020).

Figura 13: Eficiência de remoção de turbidez – Estágio 2.



Fonte: Autor (2020).

Para tanto, a fim de promover análises comparativas sobre as eficiências médias de remoção de turbidez dos Estágios 1 e 2, análises estatísticas pelo teste Mann-Whitney sobre as amostras das etapas do sistema de FiME foram realizadas. Os resultados estatísticos não apresentaram diferenças significativas entre as amostras das etapas de filtração de ambos os Estágios, tampouco sobre AB1 e AB2, evidenciando que os dois Estágios foram alimentados com águas estatisticamente iguais.

Em se tratando da eficiência de remoção de turbidez, os FFCA1 e FFCD1 apresentaram eficiências médias ultrapassando a marca de 30%, chegando próximo aos 40% para o FFCA1, enquanto as eficiências médias dos FFCA2 e FFCD2 ficaram em torno dos 27%, de sorte que todos os filtros citados conseguiram, em algumas amostras, atingir 100% de eficiência na remoção de turbidez. Por outro lado, os PFRC1 e PFRC2 atingiram eficiências médias de 64% e 57%, respectivamente, ultrapassando as eficiências médias alcançadas pelos FFCA1, FFCA2, FFCD1 e FFCD2.

Nesse sentido, foram realizadas análises estatísticas, através do teste de Mann-Whitney, a fim de comparar as eficiências médias de remoção dos FFCA1 e FFCA2, assim como as eficiências médias de remoção dos FFCD1 e FFCD2. Contudo, os resultados das análises não apresentaram diferenças significativas entre as eficiências médias dos filtros supracitados. Tendo em vista que, para fins estatísticos, os filtros dos dois Estágios foram alimentados com a mesma água de estudo e os resultados alcançados inferem que a adição das camadas de manta não foi preponderante para aumentar a eficiência na remoção de turbidez.

Tal constatação recai sobre as eficiências médias globais alcançadas pelo sistema, visto que, apesar de significativas, 65% e 68% para os Estágios 1 e 2, respectivamente, não apresentaram variações consideráveis entre si.

Por outro lado, os filtros com adição das camadas de manta (FFCA2 e FFCD2) apresentaram maior estabilidade quando comparados aos FFCA1 e FFCD1, uma vez que apresentaram melhores níveis de atendimento ao padrão de potabilidade, além da presença dos menores valores de IDQA, sobretudo no que diz respeito ao FFCD2, que apresentou maior IAPP e menor IDQA dentre todos os filtros com leito filtrante composto por fibra de coco.

Ademais, diante da ausência de diferenças significativas também para as análises estatísticas sobre as eficiências médias dos PFRC1 e PFRC2, cabe ressaltar que ambos apresentaram desempenho promissor, sobretudo por apresentarem eficiência média de remoção de turbidez em torno de 64% no primeiro e 57% para o último, estabelecendo caminhamento para os resultados de testes iniciais apresentados por Jayalath *et al.* (2016), que alcançaram cerca de 75% de eficiência na remoção de turbidez em seus pré-filtros de resíduo cerâmico.

Sendo assim, uma vez que os filtros analisados quanto à turbidez foram os mesmos analisados em relação à cor aparente, o curto período de operação dos filtros não favoreceu a formação da camada biológica, restando, predominantemente, ao processo de adsorção a responsabilidade pela remoção de turbidez. Além disso, os fatores associados ao desempenho inferior dos FFCA e FFCD para remoção cor aparente também podem estar associados quanto à remoção de turbidez.

3.1.1.5 Condutividade elétrica

Em relação à condutividade elétrica, cabe retomar que o monitoramento foi realizado apenas para o Estágio 2, de forma que não foi possível comparar o desempenho deste com o desempenho do Estágio anterior. Além disso, devido à ausência de VMP instituído pelo MS para condutividade elétrica, o presente estudo adotou como referência o padrão estabelecido na Bolívia, que é de 1500 $\mu S\ cm^{-1}$ (PINTO, 2006).

A Tabela 21 apresenta os resultados da estatística descritiva, IAPP e IDQA de condutividade elétrica para a água afluente e efluente a cada filtro, enquanto a Tabela 22 apresenta os resultados de IAPP e IDQA globais do sistema, através dos valores de entrada (AB2) e saída (AF2).

Tabela 21: Estatística descritiva de condutividade elétrica (μS cm^{-1}) – Estágio 2.

	AB2	PFRC2	FFCA2	FFCD2
Média	356,10	334,33	325,37	318,07
Intervalo de maior frequência	314,41 - 346,80 (40,00 %)	311,41 - 337,80 (36,66 %)	313,81 – 335,50 (36,66 %)	295,61 – 316,20 (40,00 %)
Mediana	344,50	328,00	324,00	316,00
Desvio padrão	42,53	34,31	29,71	24,41
Mínimo	282,00	285,00	271,00	275,00
Máximo	444,00	417,00	378,00	378,00
Significância do teste de normalidade (> 5%)	0,477	0,212	0,238	0,846
IAPP (%)	100,00	100,00	100,00	100,00
IDQA (%)	-	10,00	23,33	23,33

Fonte: Autor (2020).

Tabela 22: IAPP e IDQA do sistema – Estágio 2.

	AB2	AF2
IAPP (%)	100,00	100,00
IDQA (%)	-	16,67

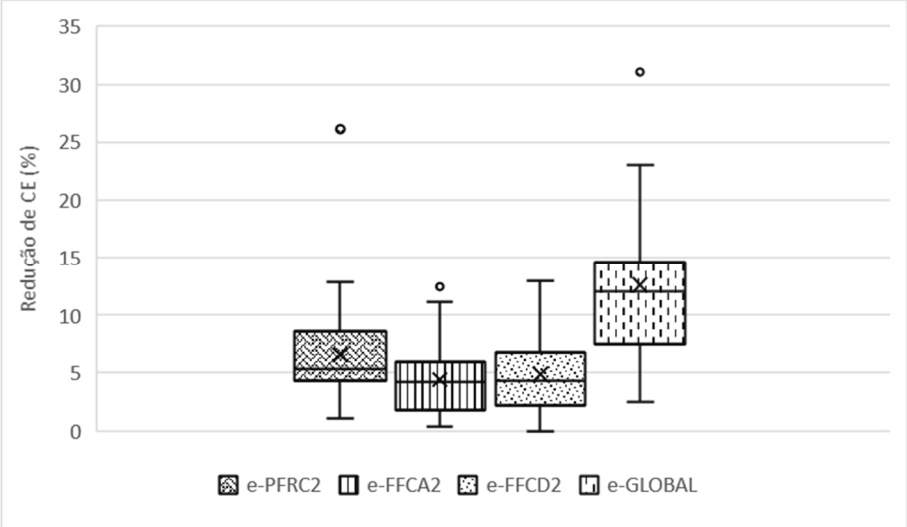
Fonte: Autor (2020).

Os valores de mínimos e máximos apresentados na Tabela 21 demonstram que todos os valores de condutividade elétrica permaneceram abaixo de 1500 μS cm^{-1}, mesmo para a água bruta, variando de 282 a 444 μS cm^{-1}, estabelecendo intervalo de maior frequência com valores compreendidos entre 314,41 μS cm^{-1} e 346,80 μS cm^{-1}, totalizando cerca de 40 % das amostras.

Por outro lado, mesmo a AB2 apresentando valores abaixo do VMP considerado, os filtros promoveram ligeira redução do referido parâmetro, uma vez que a água bruta apresentou maior média dentre as etapas do sistema e, à medida em que foram analisadas as amostras efluentes aos filtros, as médias foram diminuindo. Tal afirmativa está em concordância com o exposto na Tabela 22, visto que mais de 80% das amostras efluentes ao FFCD2 promoveram melhoria na qualidade da água filtrada em relação à água bruta.

Contudo, uma vez que o IAPP foi de 100% para todas as etapas do sistema, a avaliação das eficiências alcançadas em cada etapa de filtração, associada aos resultados de IDQA e da estatística descritiva, pode fornecer informações mais assertivas a respeito da atuação dos filtros quanto à redução do parâmetro. Para tanto, a Figura 14 apresenta as eficiências alcançadas em cada etapa de filtração, bem como a eficiência global do sistema.

Figura 14: Eficiência da redução de condutividade elétrica – Estágio 2.



Fonte: Autor (2020).

De modo geral, as eficiências de remoção alcançadas foram relativamente sutis, considerando que a eficiência global média alcançada ficou em torno de 12%, enquanto as eficiências médias das etapas de filtração atingiram marcas entre 4% e 6%, tendo o PFRC2 como o mais estável frente à remoção de condutividade, visto que apresentou o menor IDQA dentre as unidades de filtração do sistema. Contudo, diferenças significativas entre as médias da AB2 e amostras efluentes às etapas de filtração foram observadas através de comparações por meio de análises estatísticas, como pode ser observado na Tabela 23.

Tabela 23: Comparação estatística entre médias de condutividade elétrica – Estágio 2.

	AB2	**PFRC2**	**FFCA2**	**FFCD2**
AB2	-	0,000 ^{T}	0,000 ^{T}	0,000 ^{T}
PFRC2	0,000 ^{T}	-	0,005 ^{T}	0,002 ^{T}
FFCA2	0,000 ^{T}	0,005 ^{T}	-	0,060 ^{T}
FFCD2	0,000 ^{T}	0,002 ^{T}	0,060 ^{T}	-

Fonte: Autor (2020).

Os resultados expostos na tabela acima evidenciaram diferenças significativas para a AB2 em relação a todas as unidades de filtração, assim como também foram estabelecidas diferenças entre o PFRC2 e os FFCA2 e FFCD2, mas não foram identificadas diferenças significativas entre as médias das etapas FFCA2 e FFCD2 quando comparadas entre si.

Nesse sentido, diante dos baixos índices de eficiência na remoção de condutividade elétrica, do ponto de vista físico-químico, os filtros não promoveram influência significativa frente à redução do parâmetro. Os resultados alcançados pelo sistema de FiME estabelecem concordância com os resultados apresentados por Chan *et al.* (2018) e Pfannes *et al.* (2015),

uma vez que estes também não alcançaram redução significativa da condutividade, enquanto aqueles não observaram alterações do referido parâmetro na água efluente ao sistema de filtros lentos.

3.1.2 Parâmetros microbiológicos

As leituras referentes aos parâmetros microbiológicos foram realizadas apenas para o Estágio 2, inviabilizando análises comparativas com o Estágio 1. Nesse sentido, os resultados das análises de concentração para coliformes totais e termotolerantes em cada etapa do sistema estão dispostos na Tabela 24.

Tabela 24: Análise de coliformes totais e termotolerantes – Estágio 2.

	Campanha	**AB2**	**PFRC2**	**FFCA2**	**FFCD2**
Coliformes totais (NMP/100 mL)	**1**	230	92	> 11000	> 11000
	2	< 30	> 11000	1500	4600
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	**1**	92	92	290	36
	2	0	< 30	< 30	< 30

Fonte: Autor (2020).

Tendo em vista que as análises microbiológicas foram realizadas em duas campanhas, tornou-se inviável a realização de estatística descritiva, bem como o levantamento de IDQA das etapas de filtração e do sistema como um todo. Entretanto, de acordo com o exposto na Tabela 24, as amostras de água bruta, de modo geral, apresentaram baixas concentrações de coliformes totais e termotolerantes. Em contrapartida, as amostras efluentes aos filtros apresentaram acréscimo dos referidos parâmetros em relação a água bruta.

Os resultados apresentaram grande variação para as concentrações de coliformes totais e termotolerantes entre os filtros. Na primeira campanha, o FFCA2 promoveu acréscimo na concentração de coliformes termotolerantes, ao passo em que os efluentes dos PFRC2 e FFCD2 apresentaram comportamentos diferentes, sobretudo no efluente do FFCD2, que promoveu redução na concentração do referido parâmetro. Em contrapartida, os resultados da segunda campanha expuseram que todos os filtros apresentaram água efluente com concentração de coliformes termotolerantes superior à água bruta.

Não obstante, na primeira campanha, os resultados das análises microbiológicas mostraram que apenas o PFRC2 conseguiu promover redução na concentração de coliformes

totais em relação à AB2, ao passo em que os efluentes dos FFCA2 e FFCD2 apresentaram resultados superiores aos da AB2, promovendo picos de concentração do parâmetro. Por outro lado, na segunda campanha, o PFRC2 promoveu considerável aumento na concentração de coliformes totais, estabelecendo equivalência aos picos apresentados pelos FFCA2 e FFCD2 na campanha anterior.

As consideráveis variações entre as concentrações de patógenos, bem como situações onde houve aumento dessas concentrações nos efluentes dos filtros, podem estar associadas à presença de curtos-circuitos nos leitos filtrantes, de forma que vias preferenciais possam ter sido estabelecidas, propiciando passagem direta dos patógenos para o efluente, como foi observado por Letshwenyo e Lebogang (2019). Estes ainda apresentaram que a remoção de patógenos aumentou com o tempo de operação dos filtros, estabelecendo concordância com Webster e Fierer (2019), que atingiram valores mais baixos de coliformes a partir da quarta semana de operação dos seus filtros.

Nesse sentido, cabe ressaltar que, segundo Pinto e Hermes (2006), microrganismos como os coliformes são removidos principalmente no topo da primeira camada filtrante, onde é formada a *schmutzdecke* e que, segundo Tangerino e Di Bernardo (2005), a atividade desempenhada pela camada biológica é um dos fatores chaves para obtenção de água filtrada de boa qualidade. Em concordância, Singer *et al.* (2017) elencam três funcionamentos biológicos distintos para os filtros lentos frente à remoção de patógenos: mecanismo de predação na *schmutzdecke*, predação devido atividade biológica abaixo da *schmutzdecke* e morte do microrganismo na coluna do filtro devido à pouca disponibilidade de oxigênio e/ou nutrientes.

Ademais, as campanhas 1 e 2 foram realizadas nos 20° e 26° dias de operação do sistema, respectivamente, onde, em concordância ao já exposto, ainda não havia indícios do amadurecimento do filtro e consequente atuação da camada biológica. Além disso, as amostras foram coletadas sempre pelas manhãs, em dias imediatamente após períodos ociosos do sistema, compreendidos pelos finais de semana, de forma que o tempo de funcionamento do sistema que antecedeu às coletas pode não ter sido superior ao tempo de detenção hidráulica (TDH) do sistema, implicando na coleta de amostras referentes a água armazenada ainda durante os dias ociosos.

Sendo assim, a associação da ausência de camada biológica atuante, inerente à intermitência prolongada entre as operações dos filtros, pode ter fornecido uma combinação de fatores preponderantes para o desempenho alcançado pelo sistema.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados alcançados, testes estatísticos apontaram que os Estágios 1 e 2 foram alimentados com a mesma água de estudo, viabilizando comparações sobre o desempenho dos filtros atuantes nos dois Estágios.

Os resultados estatísticos evidenciaram diferenças significativas sobre as médias de pH, temperatura, cor aparente, turbidez e condutividade elétrica entre as amostras afluentes e efluentes aos filtros, respeitando seus respectivos Estágios. Entretanto não foram apresentadas diferenças significativas entre as médias dos parâmetros supracitados frente à comparação entre amostras dos Estágios 1 e 2. Ademais, as alterações promovidas pelos filtros nos parâmetros de pH, temperatura e condutividade elétrica não exerceram forte influência sobre o desempenho do sistema, haja vista o baixo nível de variação em relação à água bruta.

De modo geral, as eficiências médias de remoção de cor aparente e turbidez alcançadas pelos filtros lentos com fibra de coco de fluxo ascendente (FFCA1) e descendente (FFCD1), do Estágio 1, não apresentaram diferenças estatísticas significativas em relação às eficiências médias apresentadas pelos filtros lentos com fibra de coco de fluxo ascendente (FFCA2) e descendente (FFCD2) do Estágio 2, respectivamente. Apesar da adição de três camadas de manta não tecida sobre o leito filtrante dos FFCA2 e FFCD2 ter se mostrado pouco efetiva frente à eficiência de remoção dos parâmetros físicos, esta se mostrou atuante quanto à promoção da estabilidade dos filtros, de forma que os FFCA2 e FFCD2 apresentaram menores IDQA que os seus equivalentes no Estágio 1.

Os pré-filtros com leito filtrante de resíduo cerâmico dos dois Estágios (PFRC1 e PFRC2) apresentaram comportamento promissor frente aos elevados valores de cor aparente encontrados na água bruta, com 60% de eficiência média de remoção para o primeiro e 46% para o segundo, além de IDQA igual a zero para ambos, oferecendo estabilidade durante todo o período de operação. Desempenho satisfatório também foi apresentado frente à eficiência na remoção de turbidez, onde o PFRC1 apresentou média de 64%, ao passo que o PFRC2 apresentou 57%.

Nesse sentido, a adição das camadas de manta não tecida proporcionou maior estabilidade aos filtros FFCA2 e FFCD2, enquanto a incorporação de resíduos de cerâmica vermelha e fibras de coco, além de agregar viés ambiental e econômico, promoveu remoção de cor aparente e turbidez baseada, sobretudo, na capacidade de adsorção destes materiais.

Além disso, o amadurecimento dos filtros e consequente formação da camada biológica desempenha papel essencial para a obtenção de água filtrada com qualidade, sobretudo no que diz respeito à remoção de patógenos. A ausência desta, associada a curtos-circuitos no leito filtrante e intermitência de operação dos filtros, pode promover elevação da concentração de microrganismos patogênicos no efluente.

Dessa forma, a fim de fomentar a aplicação da técnica de filtração em múltiplas etapas, recomenda-se a continuidade de trabalhos com incorporação de resíduos e materiais não convencionais na composição de meios filtrantes, objetivando o aprofundamento das informações frente à capacidade de adsorção destes materiais. Por fim, cabe frisar a importância de maiores períodos para operação do sistema de filtração, de forma que seja possível promover o efetivo desenvolvimento da *schmutzdecke* nos filtros.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. *Assoc. Bras. Normas Técnicas*.

ALMAGRO, A. S.; ROCHA, S. M. S. Aplicação de bioadsorvente de casca de coco verde para o tratamento de efluentes oleosos. **Anais do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, p. 1–6, 2015.

APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION (APHA/AWWA/WEF). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. 22 st ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2012.

ARNOLD, N.; ARCHER, A.; BARKDOLL, B. Bacterial adaptation and performance of household biosand water filters in differing temperatures. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 16, p. 794–801, 2016.

BABAEI, F. *et al.* Removal of linear alkylbenzene sulfonate and turbidity from greywater by a hybrid multi-layer slow sand filter microfiltration ultrafiltration system. **Journal of Cleaner Production**, n. 211, p. 922–931, 2019.

BRAINER, M. S. C. P. Produção de coco: O Nordeste é destaque nacional. **Escritório Técnico de Estudos Socioeconômicos do Nordeste (ETENE)**, n. 61, p. 25, 2018.

BRASIL, M. S. 05/2017. Portaria de Consolidação n° 5, de 28 de setembro de 2017.

CARDOSO, M. S.; GONÇALEZ, J. C. Aproveitamento da casca do coco-verde (*Cocos nucifera* L.) para produção de polpa celulósica. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 321–330, 2016.

CAWST. Biosand Filter Construction Manual. **Centre for Affordable Water and Sanitation Technology**, p. 1–122, 2012.

CHAN, S. *et al.* Monitoring biofilm function in new and matured full-scale slow sand filters using flow cytometric histogram image comparison (CHIC). **Water Research**, v. 138, p. 27–36, 2018.

CLARKE, B. A. *et al.* Multi-stage filtration for developing world surface water treatment. **Water Management**, v. 157, p. 7, 2004.

D'ALESSIO, M. *et al.* A low-cost water-treatment system for potable water supplies in developing countries and after a natural disaster: ability to remove total coliforms and E. coli. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 18, n. 3, p. 925–934, 2016.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Carlos: LDIBE LTDA, 2008.

DISA-DISA, P. *et al.* Traitement des eaux de consommation par filtration lente sur sable à plusieurs étapes. **Revue des sciences de l'eau**, v. 27, n. 3, p. 259–268, 2014.

FERRAZ, C. F. **Influência da redução da espessura da camada suporte na eficiência da filtração lenta com uso de mantas sintéticas não tecidas para águas de abastecimento**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

GARCIA, E. *et al.* Resíduo de cerâmica vermelha (RCV): Uma alternativa como material pozolânico. **Cerâmica Industrial**, v. 19, n. 4, p. 31–38, 2014.

INMET. **INMET - Instituto Nacional de Meteorologia**. 2020. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep. Acesso em: 4 abr. 2020.

JAYALATH, C. P. G.; MIGUNTANNA, N. S.; PERERA, H. A. K. C. Burnt clay bricks as an alternative filter media for pebble matrix filters (PMF). **Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka**, v. 49, n. 3, p. 1–9, 2016.

LETSHWENYO, M. W.; LEBOGANG, L. Assessment of roughing and slow sand filter modified with slag and clinker ash for removal of microorganisms from secondary effluent. **Environmental Technology**, p. 1–12, 2019.

LIMA, A. J. **Análise comparativa da eficiência de filtros lentos com meios filtrantes convencionais e não convencionais**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.

MACCAFERRI, G. I. Mactex H.2 geotêxtil não tecido. **Gruppo Industriale Maccaferri**, 2019.

MACHADO, L. S. M. *et al.* Pigmentos indicadores da qualidade da água em instalação piloto de filtração em múltiplas etapas. **XVII Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, 2016.

MENDONZA, A. L. C. *et al.* Sistema de tratamiento de águas superficiales para consumo humano en la microcuenca del Río Carrizal, Ecuador. **La Técnica**, v. 21, 2019.

PERONI, B. L. *et al.* Extração do tanino a partir da casca de coco verde (cocos nucifera) e síntese do poliestireno sulfonado de copos plásticos. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 21316–21330, 2019.

PFANNES, K. R. *et al.* Selective elimination of bacterial faecal indicators in the Schmutzdecke of slow sand filtration columns. **Environmental Biotechnology**, 2015.

PINTO, N. O.; HERMES, L. C. Sistema simplificado para melhoria da qualidade da água consumida nas comunidades rurais do semi-árido do Brasil. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA**, v. 53, p. 1–50, 2006.

PINTO, V. G. **Análise comparativa de legislações relativa à qualidade da água para consumo humano na América do Sul**. 2006. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

RAJAPAKSE, J. P.; FENNER, R. A. Evaluation of alternative media for pebble matrix filtration using clay balls and recycled crushed glass. **Journal of Environmental Engineering**, v. 137, n. 6, p. 517–524, 2011.

SANTOS, F. F. S. **Comparação entre os meios filtrantes areia e nãotecido sintético na eficiência da filtração lenta para tratamento de água**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, 2015.

SILVA, E. J. *et al.* Degradação da fibra de coco imersa em soluções alcalinas de cimento e NaOH. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 10, p. 981–988, 2015.

SILVEIRA, L. R.; COUTINHO, M. M. Utilização de filtro de múltiplas camadas para remoção de turbidez. **Revista Tecnia**, v. 1, n. 2, 2016.

SIMONETTI, R. H. *et al.* Desenvolvimento de um equipamento para trituração de coco verde. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 11, n. 1, p. 37–46, 2017.

SINGER, S.; SKINNER, B.; CANTWELL, R. E. Impact of surface maintenance on BioSand filter performance and flow. **Journal of Water and Health**, v. 15, n. 2, p. 262–272, 2017.

SOUSA, F. W. *et al.* Uso da casca de coco verde como adsorvente na remoção de metais tóxicos. **Química Nova**, v. 30, n. 5, p. 1153–1157, 2007.

TANGERINO, E. P. *et al.* Utilização da filtração em múltiplas etapas, com o uso de carvão ativado granular e mantas não texturizadas na remoção de algas e cianobactérias. p. 7, 2001.

TANGERINO, E. P.; ARAUJO, L. M. R.; BORGES, R. M. Evaluación del desempeño de filtración en múltiples etapas usando carbón activado granular y mantas sintéticas no tejidas. **Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América**, v. 38, n. 10, p. 726–732, 2013.

TANGERINO, E. P.; DI BERNARDO, L. Remoção de substâncias húmicas por meio da oxidação com ozônio e peróxido de hidrogênio e FiME. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 290–298, 2005.

TUNDIA, K. R.; AHAMMED, M. M.; GEORGE, D. The effect of operating parameters on the performance of a biosand filter: a statistical experiment design approach. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 16, n. 3, p. 775–782, 2016.

VERAS, L. R. V.; DI BERNARDO, L. Tratamento de água de abastecimento por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas - FIME. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 109–116, 2008.

VERMA, S.; DAVEREY, A.; SHARMA, A. Slow sand filtration for water and wastewater treatment – a review. **Environmental Technology Reviews**, v. 6, n. 1, p. 47–58, 2017.

WEBSTER, T. M.; FIERER, N. Microbial dynamics of biosand filters and contributions of the microbial food web to effective treatment of wastewater-impacted water sources. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 85, n. 17, 2019.

WWAP. Relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos 2019 - Não deixar ninguém para trás. **UN-Water**, 2019.

ZHANG, C.; HE, J.; ZHENG, Z. Modelling nutrients and organics removal by biological slow filtration in micro-polluted water source treatment. **Processes**, v. 6, n. 128, 2018.