

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO NORTE

JULYENNE KEROLAINY LEITE LIMA

**AVALIAÇÃO DA FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE NO TRATAMENTO DE
ÁGUA DE MANANCIAL COM BAIXA TURBIDEZ E COR ELEVADA**

NATAL
2019

JULYENNE KEROLAINY LEITE LIMA

**AVALIAÇÃO DA FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE NO TRATAMENTO DE
ÁGUA DE MANANCIAL COM BAIXA TURBIDEZ E COR ELEVADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, na linha de pesquisa em Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Calazans
Duarte

Coorientador: Prof. Dr. André Luis Calado
Araújo

NATAL
2019

Lima, Julyenne Kerolainy Leite.
L732a Avaliação da filtração direta descendente no tratamento de água manancial com baixa turbidez e cor elevada / Julyenne Kerolainy Leite Lima. – Natal, 2019.
74 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

Orientador: Dr. Marco Antonio Calazans Duarte.
Coorientador: Dr. André Luis Calado Araújo.

1. Filtração direta. 2. Água - Tratamento. 3. Água - Abastecimento. I. Duarte, Marco Antônio Calazans. II. Araújo, André Luis Calado III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. IV. Título.

CDU 628.16.067.1

JULYENNE KEROLAINY LEITE LIMA

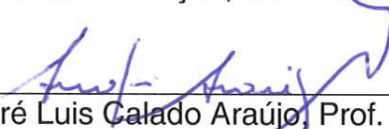
**AVALIAÇÃO DA FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE NO TRATAMENTO DE
ÁGUA DE MANANCIAL COM BAIXA TURBIDEZ E COR ELEVADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, na linha de pesquisa em Saneamento Ambiental.

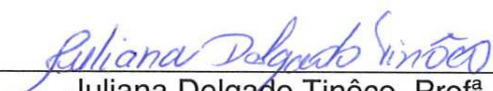
Dissertação apresentada e aprovada em 21/02/2019, pela seguinte Banca Examinadora:



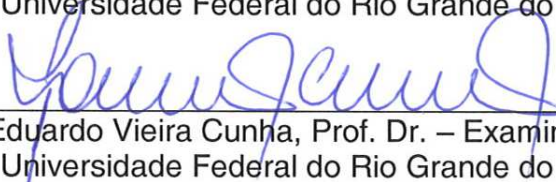
Marco Antonio Calazans Duarte, Prof. Dr. – Presidente
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



André Luis Calado Araújo, Prof. Dr. – Examinador interno
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



Juliana Delgado Tinôco, Prof^a. Dr^a. – Examinadora externa
Universidade Federal do Rio Grande do Norte



Paulo Eduardo Vieira Cunha, Prof. Dr. – Examinador externo
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Às três mulheres da minha vida:
Zilmar, Zuilene e Zulier (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Aos professores Marco Antonio Calazans Duarte e André Luis Calado Araújo, por toda colaboração, paciência, experiência e conhecimento compartilhado.

Aos professores Valdenildo Pedro da Silva, Hélio Rodrigues dos Santos, Juliana Delgado Tinôco e Paulo Eduardo Vieira Cunha pelas valiosas contribuições.

Aos companheiros do Núcleo de Estudos em Saneamento Básico, pelo apoio na realização dos ensaios e análises. Gustavo, Jordânia, Thiago, Bruno, Luciana, Fernanda, Raissa e Ygo, vocês foram essenciais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro ao projeto; à A&E Tratamento de Água e Efluentes e a Acquadrat pela doação do carvão antracito e pedregulho usados na pesquisa.

À Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte por permitir a realização do estudo em uma de suas estações de tratamento; por conceder autorização para redução de minha jornada de trabalho durante a pesquisa; bem como aos colaboradores da ETA Extremoz pelo acolhimento, incentivo e ajuda durante a realização dos ensaios.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, especialmente aos docentes do PPgUSRN por todo conhecimento transmitido; assim como aos servidores, bolsistas e terceirizados do DIAREN, por serem tão solícitos.

Aos meus colegas de turma, especialmente a Abraão e Ana Cláudia. Sou muito grata pela amizade que construímos. Vocês tornaram essa longa caminhada mais leve e divertida. Que venham muitos “dias de glória” para compartilharmos juntos!

Aos amigos, por compreenderem minha ausência e por toda torcida. Especialmente aos amigos da CAERN que tanto animam meus dias; aos amigos da Hemfibra que contribuíram com minha formação pessoal e profissional; e ao meu grupo de engenheiros confidentes, que levo para a vida.

À toda minha família por sempre torcer e vibrar com minhas conquistas; à Zilma e Lydia que incentivam minha dedicação aos estudos desde os meus primeiros livros; à minha mãe pela compreensão, apoio e incentivo; à Tia (*in memoriam*) por ter me amado como sua filha; e à minha primeira professora, minha avó Zilmar.

À Matheus Diniz. Durante todo o mestrado sua dedicação aos estudos foi minha inspiração e motivação para prosseguir. Sou muito grata a você, a Taciana e aos meus cunhados pelo apoio e carinho que tanto me dedicam.

RESUMO

O tratamento da água é realizado por meio de uma associação de processos químicos e físicos visando transformar a água bruta em potável. A adoção do tratamento mais adequado deve ser feita em função das características físico-químicas e biológicas da água bruta. Situada no Rio Grande do Norte, a ETA Extremoz é uma estação do tipo convencional, que realiza o tratamento de 750 l/s de água proveniente da lagoa de Extremoz. Apesar de ter sido projetada como ETA convencional, o histórico dos últimos 26 anos das variáveis cor aparente e turbidez da água bruta não condiz com os parâmetros recomendados para a tecnologia de tratamento adotada e como consequência a ETA passou a operar como filtração direta descendente desde início de 2001. A necessidade de ajustes em ETA similares à ETA Extremoz indica a importância da realização de estudos que visem avaliar as condições ideais do tratamento para água com tais características. Esse trabalho objetivou avaliar em que medida a filtração direta descendente pode ser indicada para o tratamento de água com baixa turbidez e cor elevada. Para isso, a pesquisa comparou os resultados do tratamento da água em leito filtrante simples de areia e leito filtrante duplo de areia e carvão antracito seguido por adsorção com carvão ativado granulado. Os experimentos foram realizados em Instalação Piloto de Tratamento de Água por Oxidação, Adsorção e Dupla Filtração, implantada nas dependências da ETA Extremoz. Foi avaliada a qualidade da água tratada para quatro taxas de filtração, 253, 280, 310 e 340 m³/m².dia. Para o leito filtrante simples de areia foram realizados experimentos em filtros com 700 mm de espessura de camada filtrante e diâmetro efetivo dos grãos (D₁₀) de 0,50, 0,57 e 0,87 mm. Para o leito filtrante duplo, de areia e carvão antracito, a espessura da camada filtrante de areia foi reduzida para 450 mm, sendo incluída camada de carvão antracito com 250 mm de espessura e D₁₀ = 1,00 mm. Para a adsorção em carvão ativado granulado foram realizados experimentos com camada de 650 mm e D₁₀ de 0,23, 0,60 e 0,90 mm. Conclui-se que apenas para o leito duplo de areia e carvão antracito, todas as três granulometrias e quatro taxas de filtração estudadas atenderam a Portaria da Consolidação Nº 5/2017, sendo o filtro F3, para a taxa de filtração de 340 m³/m².dia, a melhor condição para ser adotada em escala real.

Palavras-chave: Filtração direta. Tratamento de água. Abastecimento de água.

ABSTRACT

The treatment of water is carried out by means of an association of chemical and physical processes aimed at transforming raw water into drinking water. The adoption of the most appropriate treatment should be made according to the physical-chemical and biological characteristics of the raw water. Located in Rio Grande do Norte, ETA Extremoz is a conventional type station that treats 750 l / s of water from the lagoon of Extremoz. Although it was designed as a conventional ETA, the history of the last 24 years of the variables apparent color and turbidity of the raw water does not comply with the recommended parameters for the adopted treatment technology and as a consequence the ETA started to operate as a direct descending filtration from the beginning of 2001. The need for ETA adjustments similar to ETA Extremoz indicates the need for studies to evaluate the ideal treatment conditions for water with these characteristics. This work aimed to evaluate to what extent direct downward filtration can be indicated for the treatment of water with low turbidity and high color. For this, the research compared the results of the treatment of the water in a simple sand filter bed and a sand filter and anthracite charcoal followed by adsorption with granulated activated carbon. The experiments were carried out in a Pilot Installation of Water Treatment by Oxidation, Adsorption and Double Filtration, installed in the premises of ETA Extremoz. The treated water quality was evaluated for four filtration rates, 253, 280, 310 and 340 m³ / m².day. For the simple sand filter bed, experiments were carried out on filters with a 700 mm thick filter layer and effective grain diameter (D10) of 0.50, 0.57 and 0.87 mm. For the double bed of sand and anthracite charcoal, the thickness of the sand filter layer was reduced to 450 mm, including anthracite coal layer with 250 mm thickness and D10 = 1,00 mm. For the adsorption in granulated activated carbon, experiments were performed with layer of 650 mm and D10 of 0.23, 0.60 and 0.90 mm. It is concluded that for the double bed of sand and anthracite coal all three grades and four filtration rates studied complied with Ordinance No. 5/2017, the filter F3, for the filtration rate of 340 m³ / m².day, the best condition to be adopted in real scale.

Keywords: Direct filtration. Water treatment. Water supply.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	OXIDAÇÃO	14
2.2	COAGULAÇÃO	15
2.3	FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE	17
2.3.1	Características dos materiais filtrantes	17
2.3.2	Taxas de filtração e carreira de filtração	19
2.4	ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO	20
3	MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO MANANCIAL	22
3.2	INSTALAÇÃO PILOTO DE FLUXO CONTÍNUO	23
3.3	FASES DA PESQUISA	26
3.3.1	Fase 1 – Filtração direta em leito simples de areia	26
3.3.2	Fase 2 – Filtração direta em leito duplo de areia e carvão antracito seguido de adsorção em carvão ativado	27
3.4	ENSAIOS DE GRANULOMETRIA	29
3.5	ENSAIOS DE BANCADA EM LABORATÓRIO	32
3.6	PROTOCOLO DOS ENSAIOS NA IPDF	34
3.7	AMOSTRAGEM E ANÁLISE LABORATORIAL	36
3.8	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS	36
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	38
4.1	FASE 1 – FILTRAÇÃO DIRETA EM LEITO SIMPLES DE AREIA	38
4.1.1	Caracterização da água bruta	38
4.1.2	Avaliação da taxa de filtração e granulometria do meio filtrante utilizando leito simples de areia	39
4.2	FASE 2 – FILTRAÇÃO DIRETA EM LEITO DUPLO DE AREIA E CARVÃO ANTRACITO SEGUIDO DE ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO	52
4.2.1	Ensaio de bancada e caracterização da água bruta	52

4.2.2	Avaliação da taxa de filtração e granulometria do meio filtrante utilizando leito duplo de areia e carvão antracito	55
4.2.3	Avaliação da adsorção em carvão ativado granulado após filtração em leito duplo de areia e carvão antracito	63
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69
	REFERÊNCIAS	70
	ANEXO A – Comprovante de submissão do artigo na Revista Águas Subterrâneas	74

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de tratamento de água conhecida como filtração direta surgiu da dificuldade do tratamento de águas com baixa turbidez e cor em Estações de Tratamento de Água (ETA) do tipo convencional. Nas ETA convencionais a coagulação da água é realizada pelo mecanismo de varredura, porém, quando esse mecanismo é aplicado em águas com baixa turbidez e cor, ocorre a formação de flocos com baixa velocidade de sedimentação, os quais apresentam dificuldades para serem removidos por decantação ou flotação. Nesses casos recomenda-se que a coagulação ocorra por adsorção-neutralização de cargas e que seja dispensada a unidade de sedimentação ou flotação, devendo a água coagulada ser encaminhada diretamente para a unidade de filtração (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Kawamura (2000) considera como limite recomendado para o uso da tecnologia convencional, águas naturais com turbidez inferior a 3.000 uNT e para a filtração direta, turbidez e cor aparente inferiores a 20 uNT e 20 uH, respectivamente. O mesmo autor destaca que águas com valores mais elevados, porém com ocorrência em curtos períodos, podem ainda serem tratadas adequadamente pela filtração direta mediante ajustes operacionais.

De acordo com Sabogal Paz (2007), para águas que em 100% do tempo a turbidez encontra-se abaixo de 50 uNT e a cor verdadeira máxima apresenta valor inferior a 50 uH, pode ser adotada a tecnologia de filtração direta descendente ou ascendente.

Segundo Richter (2009), ETA convencionais são adequadas para águas turvas, com turbidez de média à elevada, suportando cargas de até 1.000 uNT. O autor reforça que quando a turbidez é baixa, por exemplo, menor que 50 uNT, a falta de um núcleo pesado para os flocos torna ineficiente a decantação, provocando sobrecarga nos filtros, e nesse caso, o ideal é o uso da filtração direta. O autor ainda afirma que a tecnologia de filtração direta suporta cor aparente entre 20 e 30 uH.

Na região Nordeste do Brasil há diversas captações em reservatórios naturais ou artificiais de água, que funcionam como decantadores naturais, nos quais a qualidade da água bruta favorece o emprego da filtração direta. Além disso, em algumas ETA convencionais, desvia-se a água previamente coagulada ou floculada diretamente para os filtros nos períodos de baixa precipitação pluviométrica, meses em que as características do manancial dispensam a decantação. No Rio Grande do Norte, das

60 ETA operadas pela Companhia de Águas e Esgotos, 56 utilizam a filtração direta para o tratamento de água (RIO GRANDE DO NORTE, 2018).

A lagoa de Extremoz trata-se de um manancial que abastece uma ETA do tipo convencional, realizando o tratamento de 750 l/s de água e atendendo cerca de 300.000 habitantes da zona norte de Natal, capital do Rio Grande do Norte. Apesar da ETA Extremoz ter concepção convencional, o histórico de 26 anos das variáveis cor aparente e turbidez da água bruta da lagoa de Extremoz não condiz com o tratamento adotado, apresentando cor aparente e turbidez média de 35 uH e 5,17 uNT, respectivamente (PEREIRA, 1993; DUARTE, 1999; RIO GRANDE DO NORTE, 2017; CIRNE, 2014; NG, 2017; FREITAS, 2017; BRITO, 2018; BRITO; DUARTE; ARAÚJO, 2018).

Diante disso, a ETA Extremoz passou a operar com filtração direta descendente desde início de 2001 por meio de arranjos operacionais, onde a coagulação passou a ocorrer por meio do mecanismo de adsorção-neutralização de cargas, os agitadores dos floculadores foram desativados e os decantadores são simples câmaras de passagem para a água coagulada seguir para os filtros. Contudo, apesar dos arranjos realizados na ETA, permitindo que o tratamento ocorra por filtração direta, Ng (2017) ao caracterizar a qualidade da água tratada na ETA Extremoz, no período compreendido entre maio de 2015 e abril de 2016, mostrou valores médios de 1,67 uNT e 18 uH, para turbidez e cor aparente, respectivamente. Ambas as médias se encontram acima do estabelecido pela Portaria Nº 2.914/2011, vigente na época, que limita para a água potável a cor aparente em 15 uH e estabelece como valor máximo permitido para turbidez 0,50 uNT na saída do tratamento, para sistemas que usam filtração rápida (BRASIL, 2011).

A necessidade de adequações em estações de tratamento similares à ETA Extremoz indica a relevância da realização de estudos que visem avaliar as condições ideais do tratamento para água com estas características. Nesse sentido, importa-se saber em que medida a filtração direta descendente pode ser indicada para o tratamento de água de manancial com baixa turbidez e cor elevada.

1.1 OBJETIVO GERAL

Esse trabalho tem como proposta avaliar a filtração direta descendente para o tratamento de água de manancial com baixa turbidez e cor elevada.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular hidraulicamente em instalação piloto de fluxo contínuo o funcionamento de uma ETA de filtração direta descendente;
- Avaliar a influência da taxa de filtração na qualidade da água filtrada;
- Avaliar a influência da composição da camada filtrante na qualidade da água filtrada;
- Avaliar a influência da granulometria da camada filtrante na qualidade da água filtrada;
- Avaliar a influência da adsorção em carvão ativado granulado após a filtração.

O presente estudo, cujos objetivos estão descritos acima, resultou em um artigo científico submetido para publicação na Revista Águas Subterrâneas, classificada como B2 na área das ciências ambientais (ANEXO A).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 OXIDAÇÃO

A oxidação química ou a oxidação por aeração podem ser utilizadas visando a remoção de contaminantes orgânicos (tais como as substâncias húmicas causadoras de cor) e inorgânicos (precipitando metais como ferro e manganês) que não são normalmente removidos de modo satisfatório nas unidades que usualmente compõem as ETA. A oxidação por aeração destina-se a introduzir ar na água, por meio de aeradores. Nos casos em que a aeração não é eficiente, pode-se optar pelo uso de oxidantes químicos como cloro, ozônio, dióxido de cloro, perclorato de potássio e peróxido de hidrogênio. Devido ao seu baixo custo de aquisição, praticidade operacional, residual persistente e eficiência na inativação de microrganismos patogênicos, quando comparados aos demais oxidantes, o cloro pode ser considerado o principal agente oxidante utilizado nas ETA.

No entanto, apesar dos benefícios, pesquisas demonstram que na presença de matéria orgânica natural (MON) na água, derivada da decomposição de vegetação terrestre e aquática ou de matéria orgânica algogênica,, o uso do cloro pode contribuir com a formação de subprodutos orgânicos halogenados (SOH). Os principais subprodutos potencialmente prejudiciais à saúde humana, decorrentes da cloração da água, relatados na literatura são: trihalometanos, ácidos haloacéticos, halocetonas e haloacetoneitrilas, (LEGAY *et al.*, 2010; LIMA, 2014; CARDADOR; SALGUEIRO; GALLEGU,2015).

Mondardo (2004) investigou o desempenho do ozônio e do cloro, utilizados na pré-oxidação de água com elevadas concentrações de cianobactérias e microalgas, a ser submetida à filtração direta descendente seguida de desinfecção por cloro, avaliando a qualidade da água após tratamento, principalmente no que se refere à formação de trihalometanos e a testes toxicológicos. A pesquisa concluiu que a ozonização demonstrou ser uma excelente alternativa para o tratamento de água com elevadas concentrações de fitoplâncton, pois proporcionou melhores resultados de remoção de turbidez, cor aparente, carbono orgânico, clorofila a, números e espécies de cianobactérias e microalgas e menor formação de trihalometanos, comparada à pré-cloração.

Dantas *et al.* (2014) verificaram a formação de 22 SOH na pré-oxidação de água bruta com alto teor de substâncias húmicas aquáticas. Os resultados indicaram que a pré-oxidação com o cloro melhorou a eficiência de remoção de cor aparente por coagulação-filtração, com diminuição da cor aparente da água filtrada de 8 uH para 3 uH. No entanto, com o uso da pré-oxidação, tanto com cloro quanto com dióxido de cloro, houve formação significativa de SHO, principalmente de ácidos haloacéticos. Ainda assim, a formação de SOH com o cloro foi maior que a obtida com o dióxido de cloro para todos os SOH estudados.

Oliveira (2017) avaliou o potencial de formação de trihalometanos resultante da aplicação de cloro na água bruta da Lagoa de Extremoz-RN, bem como quantificou as concentrações de THM na rede de distribuição. Os resultados indicaram a presença de matéria orgânica hidrofílica com a preponderância de ácidos fúlvicos na água do manancial. O estudo demonstrou que a água da Lagoa de Extremoz possui forte potencialidade para formação de compostos orgânicos, fato confirmado pelos altos níveis de THM encontrados na rede de distribuição de água. As concentrações de THM obtidas nas análises da água da rede variaram de 0,39 mg/L a 1,11 mg/L, acima do valor máximo permitido pela Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/2011, vigente na época.

2.2 COAGULAÇÃO

A coagulação trata-se da adição de coagulantes a um meio líquido para que estes provoquem através de ações físicas e químicas, a desestabilização das partículas em suspensão e de natureza coloidal presentes na água. As partículas desestabilizadas juntamente com o coagulante, formam partículas maiores capazes de serem removidas mais facilmente nas etapas posteriores ao tratamento. Os tipos de coagulantes mais usados em ETA são: sulfato de alumínio, sulfato férrico, sulfato ferroso clorado, cloreto férrico e hidroxicloreto de alumínio. Pode-se ainda utilizar auxiliares na coagulação: ácidos, basificantes, polímeros sintéticos ou naturais.

A coagulação ocorre na unidade de mistura rápida, podendo ser hidráulica ou mecanizada, dependendo da vazão a ser tratada, da variação na qualidade da água e das condições de operação e manutenção disponíveis. Os parâmetros de projeto dessa unidade são o tempo e o gradiente de velocidade. Os gradientes de velocidade médios podem variar desde 500 s^{-1} a valores superiores a 7.000 s^{-1} e o tempo de

mistura rápida é da ordem de 1 segundo a mais de 3 minutos. As unidades mecanizadas são mais versáteis que as hidráulicas, pois possibilitam a variação do gradiente de velocidade médio em função das variações da qualidade da água bruta e da vazão afluente a ETA

Santos *et al.* (2007) compararam a eficiência dos coagulantes cloreto férrico, sulfato de alumínio, sulfato férrico e hidroxicloreto de alumínio – isoladamente ou combinados com polímeros catiônicos – na redução da cor aparente, turbidez e fitoplâncton visando ao tratamento por filtração direta descendente. Os resultados obtidos mostraram que não houve diferença significativa, considerando nível de significância de 5%, entre a eficiência dos coagulantes testados.

A coagulação é o resultado da ação de quatro mecanismos distintos que atuam individualmente ou combinados, são eles: compressão da camada dupla elétrica, adsorção e neutralização de cargas, varredura e adsorção e formação de pontes. Entretanto, no tratamento de águas ocorre com maior frequência os mecanismos de varredura e adsorção e neutralização de cargas. O mecanismo de varredura é caracterizado pelo uso de dosagens maiores de coagulante e é utilizado em estações que possuem as etapas de floculação e decantação ou flotação. Durante a coagulação, à medida que se eleva a dosagem do coagulante na mistura rápida, as partículas presentes na água começam a serem adsorvidas pelo precipitado dos sais de alumínio ou ferro e passa a predominar o mecanismo de varredura. Já o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas, indicado para o tratamento de água por filtração direta, as ligações das partículas com a água são desestabilizadas ocorrendo a neutralização das cargas das impurezas. Não há a formação flocos grandes, dispensando assim etapas de crescimento de floco (floculação) e de decantação ou flotação (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Fagundes (2006) estudou a remoção de Oocistos de *Cryptosporidium* por filtração direta, verificando a influência de aspectos operacionais, como a dosagem de coagulante, taxas de filtração e características da água bruta. Na pesquisa optou-se por trabalhar com subdosagens, dosagens ótimas e superdosagens de sulfato de alumínio. Os resultados obtidos indicaram que, independente da origem da água bruta e da taxa de filtração utilizada, ao se adotar dosagens “ótimas” e superdosagens de coagulante os efluentes apresentaram turbidez inferiores a 0,5 uNT. A autora concluiu que um dos fatores de risco que merece ser considerado nas operações de ETA é a possível falha na dosagem de coagulante com a aplicação de subdosagem.

2.3 FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE

Nas ETA de filtração direta, os filtros são as únicas unidades responsáveis pela retenção do material em suspensão presente na água. Essa tecnologia surgiu da dificuldade do tratamento de águas com turbidez e cor verdadeira relativamente baixas em ETA que adotam a tecnologia convencional, a qual engloba os processos unitários: coagulação, floculação, sedimentação ou flotação e filtração

O termo filtração direta abrange a filtração direta ascendente, a filtração direta descendente (FDD) e a dupla filtração. Na FDA o fluxo de filtração ocorre dos grãos mais grossos, que estão dispostos na parte inferior do filtro, para os grãos mais finos, localizados na parte superior do filtro. Na FDD, a água flui inicialmente pelos grãos mais finos e posteriormente pelos grãos maiores, garantindo maior segurança sanitária a água filtrada produzida. A tecnologia de dupla filtração associa os dois tipos de filtração, onde a água passa inicialmente pelo filtro ascendente e posteriormente pelo filtro descendente.

Quando comparadas as ETA que usam a FDD aos sistemas de tratamento convencional, destacam-se o custo da construção de 30% a 50% menor, pois há um menor número de unidades de tratamento envolvidas; a redução dos custos de operação e manutenção, uma vez que se tem menor consumo de coagulante e de energia elétrica, pois são eliminados os equipamentos de remoção de lodo dos decantadores e, também, algumas vezes, os equipamentos de floculação; uma menor produção de lodo, o que torna menos oneroso o tratamento e disposição final dos resíduos gerados; e maior facilidade no tratamento de água bruta com baixa turbidez.

No entanto, é importante ressaltar que a FDD apresenta algumas limitações em relação ao tratamento convencional, pois como o tempo de detenção em todo o tratamento é curto, necessita-se de um controle mais rigoroso da dosagem de produtos químicos durante as mudanças da qualidade da água bruta.

2.3.1 Características dos materiais filtrantes

Nos filtros, diversos materiais granulares podem ser usados como meio poroso. A areia é o mais comum, seguido do antracito, areia de granada e carvão ativado granulado. Na filtração direta todas as partículas removidas da água ficam retidas no meio filtrante. Nesse sentido, o meio filtrante ideal é aquele em que o escoamento

ocorre no sentido dos grãos maiores para os menores, para que todo o leito participe da filtração e propicie filtração mais longa. No entanto, na FDD, quando os leitos são compostos apenas de areia, os grãos menores ficam nas camadas superiores, pois do contrário há inversão das camadas durante a lavagem. Uma melhor alternativa, nesse sentido é a escolha de filtros com múltiplas camadas filtrantes. Porém, camadas de areia praticamente uniforme e com grãos maiores, em algumas situações podem resultar mais apropriadas que meios filtrantes de antracito e areia, evidenciando a necessidade de ensaios para definir a composição ideal do meio filtrante. Na Tabela 1 são apresentadas as principais características dos meios filtrantes utilizados na FDD.

Tabela 1 – Principais características dos meios filtrantes utilizados na FDD

Características	Duas ou três camadas			Areia praticamente uniforme	Antracito
	Antracito	Areia	Granada		
Tamanho dos grãos (mm)	0,71 – 2,4	0,45 – 2,0	0,21 – 0,59	1,0 – 1,68	1,0 – 2,4
Tamanho efetivo (mm)	1,0 – 1,3	0,5 – 0,6	0,25 – 0,35	1,1 – 1,3	1,2 – 1,5
Coefficiente de desuniformidade	<1,6	<1,6	<1,6	<1,25	<1,3
Espessura da camada (m)	0,5 – 0,8	0,2 – 0,3	0,1 – 0,15	1,0 – 1,5	1,2 – 1,8

Fonte: Di Bernardo e Sabogal Paz (2008).

O tamanho dos grãos e o percentual de vazios entre os mesmos (porosidade) tem grande influência na remoção de matéria em suspensão pelo filtro e no seu desempenho hidráulico. O coeficiente de desuniformidade (CD) é a relação correspondente entre os tamanhos dos grãos correspondentes às porcentagens de 60% e 10% em peso do material que passa no teste de peneiramento. A penetração de impurezas ao longo do meio filtrante está relacionada ao CD, que quanto menor, mais uniforme o material granular e maior a carreira de filtração. O diâmetro efetivo (D_{10}) é o tamanho equivalente a 10% em peso do material que passa no peneiramento, parâmetro que permanece inalterado em meios granulares não estratificados, como os adotados na FDD. A escolha da granulometria de um meio filtrante depende de diversas variáveis, como taxa de filtração, carga hidráulica disponível, sistema de lavagem, espessura da camada filtrante, etc

Fernandes et. al. (2010) operaram em escala piloto FDD com taxa de filtração de 210 m³/m².dia, para água do córrego do Torto, Brasília – DF, que apresentava valores de turbidez na faixa de 3,8 a 24,8 uNT. O meio filtrante de camada dupla adotado, possuía 55 cm de antracito (diâmetro efetivo de 0,92 mm e CD de 1,52) e 40 cm de areia (diâmetro efetivo de 0,55 mm e CD de 1,6). Utilizou-se sulfato de alumínio como coagulante e valores de pH de coagulação entre 5,0 e 7,5. Os valores médios de turbidez obtidos ao longo da duração dos experimentos de filtração foram inferiores a 0,15 uNT. Além disso, os experimentos realizados em valores de pH de coagulação mais baixo, em torno de 5,0, promoveram eficiência de remoção de oocistos de *Cryptosporidium*.

2.3.2 Taxas de filtração e carreira de filtração

No dimensionamento dos filtros, a área necessária para filtração será definida pela taxa de aplicação (velocidade de aproximação) adotada. A taxa de filtração é dada pela vazão afluyente dividida pela área do filtro em planta. Esse parâmetro de dimensionamento está intimamente relacionado à granulometria do meio filtrante, à qualidade da água e às dosagens de produtos químicos. A taxa de filtração interfere na velocidade em que ocorre o transporte das partículas suspensas para os coletores (grãos de areia, por exemplo). Caso a taxa de filtração não esteja adequada, ocorre o desprendimento dos sólidos no meio filtrante e o arraste dessas impurezas, comprometendo a eficiência do tratamento. Segundo a NBR 12.216 (ABNT, 1992), em projetos de estação de tratamento de água para consumo humano, quando não é possível a realização de ensaios em filtros-pilotos, a taxa de filtração máxima a ser utilizada para filtros rápidos de areia de leito simples é 180 m³/m².dia

Santos et. al. (2007) avaliaram em ensaios de bancada e em escala piloto o comportamento da FDD para distintos coagulantes em água de manancial na região metropolitana de Belo Horizonte – MG. O monitoramento da água bruta mostrou turbidez sempre inferior a 7 uNT e cor aparente inferior a 35 uH. Nos ensaios utilizando como coagulante o sulfato de alumínio (8,0 mg/L) e ácido para corrigir o pH de coagulação, ou quando se empregou o PAC (5,0 mg/L) todas as amostras apresentaram cor aparente inferior a 10 uH e turbidez inferior a 0,50 uNT, para uma taxa de filtração de 436 m³/m².dia.

Quando o nível da água no interior do filtro atingi a altura máxima (perda de carga máxima) ou quando a qualidade da água começar a ficar comprometida, é necessário realizar a lavagem do filtro que estiver apresentando piores resultados. A previsão quantitativa do comportamento da perda de carga de meios filtrantes limpos estratificados pode ser feita com a Equação 1 (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

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

Na qual: Δh = perda de carga no leito; ΔL = espessura do leito; U = velocidade relativa a seção transversal vazia do leito; ρ = densidade do fluido; μ = viscosidade do fluido; f = porosidade média do meio filtrante; ψ = coeficiente de esfericidade do grão coletor; X_i = fração correspondente da camada i ; dg_i = média geométrica entre os tamanhos das aberturas de duas peneiras consecutivas (ensaio de granulometria) da camada i .

Os filtros são normalmente lavados aplicando-se água ou ar e água, em escoamento ascendente, com velocidade capaz de assegurar expansão adequada do meio filtrante. Dependendo da granulometria, a lavagem pode ser feita com velocidades ascensionais entre 0,70 e 1,05 m/min e tempo de lavagem variando entre 7 e 10 minutos. A água necessária para a lavagem dos filtros pode vir por meio de bombas, reservatório elevado ou proveniente dos demais filtros, uma análise técnica e econômica deve ser feita para determinar qual sistema de lavagem será mais adequado para a ETA (RICHTER, 2009).

2.4 ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO

A adsorção é um processo de atração e acumulação de uma substância em um fluido (adsorvato) na superfície sólida de outra (adsorvente). Os compostos orgânicos permanecem na superfície do adsorvente devido a ligações de hidrogênio, interações dipolo-dipolo e forças de Van der Waals. Dentre os adsorventes, o carvão ativado é o mais utilizado comercialmente para remoção de cor verdadeira, sabor e odor causados por substâncias orgânicas e inorgânicas, naturais e sintéticas, entre elas as

cianotoxinas. Além disso, a adsorção em carvão ativado, seja ele pulverizado ou granular, é atualmente a técnica mais adotada para a remoção dos subprodutos da oxidação (COCENZA, 2014).

Duarte (2011) avaliou arranjos de dupla filtração com pré e interoxidação e adsorção com CAP e CAG no tratamento de água de reservatório eutrofizado com elevada densidade de cianobactérias - Açude Gargalheiras – RN. Foi verificada intensa formação de trihalometanos totais resultante da aplicação de cloro na água bruta e filtrada, sendo eficientemente removidos com a aplicação de carvão ativado pulverizado em suspensão e em colunas de adsorção com carvão ativado granulado.

Dantas *et al.* (2014a) estudaram a eficiência da oxidação com o cloro precedida de coagulação, filtração em areia e adsorção em CAG na remoção de cor, de ferro e de manganês em água com elevada concentração de matéria orgânica dissolvida. Os resultados mostraram que a adsorção em CAG após a coagulação com sulfato de alumínio e filtração em areia foi a única condição de tratamento estudada cujos resultados atenderam ao estabelecido pela Portaria do Ministério da Saúde nº 518/2004, vigente na realização dos ensaios.

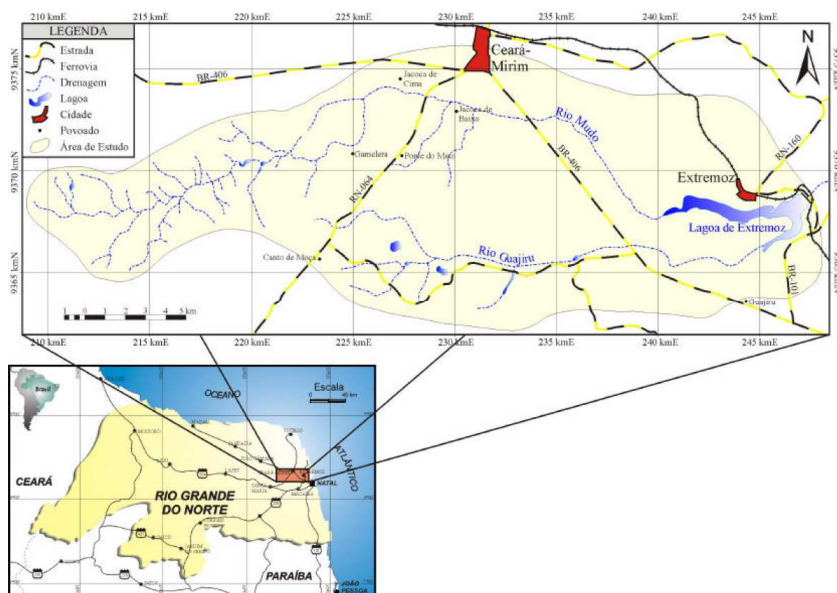
A etapa de adsorção nas ETA tem se tornado cada vez mais usual em virtude da degradação contínua e progressiva da qualidade da água dos mananciais. A remoção de diurium e hexazinona, herbicidas com elevado potencial de contaminação em águas superficiais e subterrâneas, foi estudada por Voltan (2014), que investigou as combinações de pré-oxidação com cloro e dióxido de cloro e de adsorção em carvão ativado pulverizado e granular, associados ao tratamento de ciclo completo. O autor concluiu que a adsorção em carvão ativado granular mostrou ser 12% mais eficiente que em carvão ativado pulverizado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MANANCIAL

A lagoa de Extremoz está localizada a 15 km de Natal (35°18'26''W e 05°42'20''S), possui capacidade de armazenar 11.019.525 m³ e ocupa uma área de 359 ha. Integra a bacia hidrográfica do Rio Doce, que possui 38.780 ha de área de drenagem (RIO GRANDE DO NORTE, 2018b). A Figura 1 apresenta a localização da lagoa de Extremoz com suas principais vias de acesso.

Figura 1 – Localização geográfica da lagoa de Extremoz



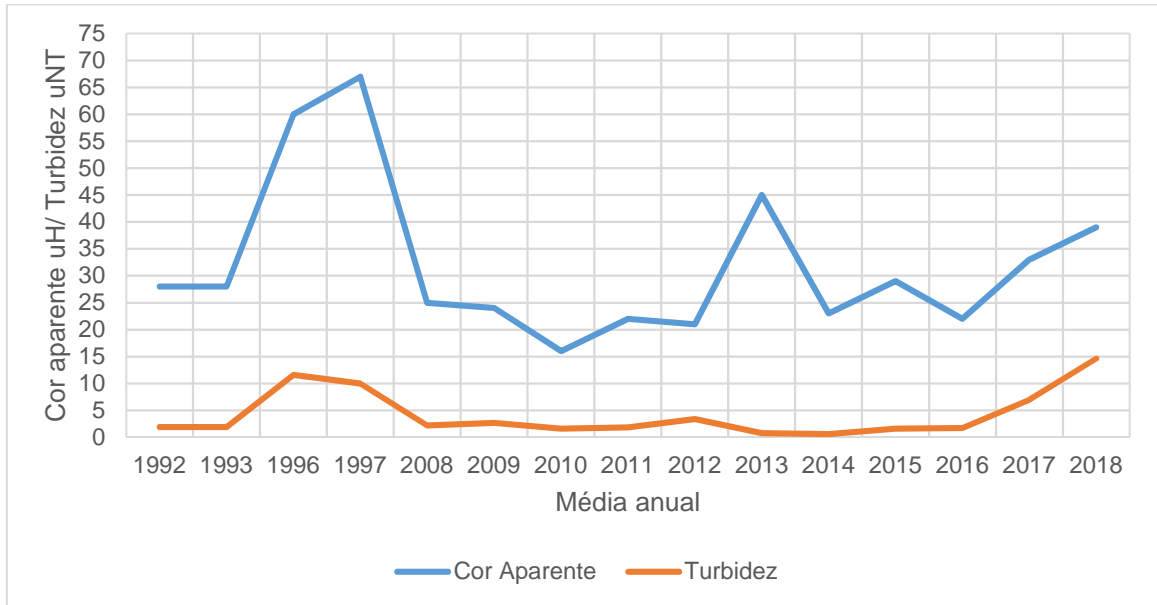
Fonte: Engesoft (2004).

A recarga da lagoa de Extremoz se dá por água subterrânea oriunda dos tabuleiros arenosos que predominam em sua bacia hidrográfica, por precipitação pluviométrica média anual de 1.300 mm, além de ter os rios Guajiru e Mudo como afluentes. A temperatura média do ar no verão está entre 30°C e 32°C e a temperatura média no inverno está entre 24°C e 26°C. A temperatura média anual da água é de 28°C (RIO GRANDE DO NORTE, 2018a).

Com relação à qualidade da água bruta da lagoa de Extremoz, Duarte (1999) afirma que a cor tem predominância sobre a turbidez, devido, principalmente ao fitoplâncton e à matéria orgânica dissolvida presente no manancial. Esse fato pode ser observado na Figura 2 durante o histórico de qualidade da água bruta dos últimos

26 anos, no qual o manancial apresentou para o período cor aparente média de 35 uH e turbidez de 5,17 uNT.

Figura 2 – Qualidade da água bruta da lagoa de Extremoz – RN no período de 1992 a 2018



Fonte: Adaptado de Pereira (1993), Duarte (1999), Rio Grande do Norte (2017), Cirne (2014), NG (2017), Freitas (2017), Brito (2018), Brito; Duarte; Araújo (2018).

3.2 INSTALAÇÃO PILOTO DE FLUXO CONTÍNUO

Nas dependências da ETA Extremoz, foi montada no período de junho de 2012 a março de 2013, a Instalação Piloto de Tratamento de Água para Abastecimento por Oxidação, Adsorção e Dupla Filtração (IPDF), para a realização de testes e pesquisa. A IPDF foi projetada e instalada inicialmente em Acari – RN, para a pesquisa de Duarte (2011), que estudou o tratamento de água de reservatório eutrofizado (Açude Gargalheiras – RN) por pré e interoxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração. Maiores informações sobre a concepção, montagem e custos de construção da IPDF podem ser obtidas no trabalho de Duarte (2011).

A IPDF possui vazão de operação de 100 à 2.000 L/h, ocupando uma área de 110 m² e no sentido da montante para jusante das linhas de tratamento, é composta por reservatório de água bruta (RAB), caixa de distribuição de vazão (CDV), quatro câmaras de pré-oxidação (CPOX), quatro câmaras de adsorção em carvão ativado pulverizado (CCAP), câmara de sucção intermediária (CS INT), câmara de mistura rápida (CMR), quatro filtros de fluxo ascendente de pedregulho (FAP), três câmaras

de inter-oxidação (CIOX), três filtros rápidos de fluxo descendente de areia (FRDA), três filtros de contato em leito de carvão ativado granulado (FCAG), câmara de sucção de água tratada/lavagem, (CS AT/AL), reservatório de água tratada e de lavagem dos filtros (RAT/AL) e conta com conjuntos de preparação e dosagem de produtos químicos.

A concepção da IPDF permite, por meio de arranjos hidráulicos, a operação com diferentes combinações de tecnologias de tratamento de água, como filtração direta descendente, filtração direta ascendente e dupla filtração; possibilita a operação das unidades filtrantes com diferentes taxas de filtração, granulometria e meios filtrantes; e tem possibilidade de introduzir as etapas de pré ou inter-oxidação e adsorção com carvão ativado pulverizado ou granulado. As quantidades, diâmetro interno, altura útil e altura total dos principais equipamentos que compõem o sistema encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais dimensões das unidades de tratamento da IPDF

Unidade	Quantidade	DI (mm)	HU (m)	HT (m)
CPOX	04	300	0,80	0,85
CCAP	04	300	0,80	0,85
FAP	04	200	1,85	1,95
CIOX	03	100	4,50	4,55
FRDA	03	100	3,85	3,85
FCAG	03	100	2,00	2,00
CS (INT e AT/AL)	02	500	0,75	0,90

Legenda: CPOX: câmaras de pré-oxidação; CCAP: câmaras de adsorção em carvão ativado pulverizado; FAP: filtros de fluxo ascendente de pedregulho; CIOX: câmara de inter-oxidação; FRDA: filtros rápidos de fluxo descendente de areia; FCAG: filtros de contato em leito de carvão ativado granulado; CS (INT ou AT/AL): câmaras de sucção (intermediária e de água tratada/lavagem); DI: diâmetro interno; HU: altura útil; HT: altura total.

Fonte: Adaptada de Duarte (2011).

Para esse estudo, a IPDF foi alimentada pela água natural da lagoa de Extremoz e simulou hidráulicamente as condições de operação de uma ETA de filtração direta descendente. Para isso foi necessário o desvio hidráulico das CCAP, FAP e CIOX. A Figura 3 apresenta vista longitudinal da IPDF e a Figura 4 as unidades que foram utilizadas nesta pesquisa.

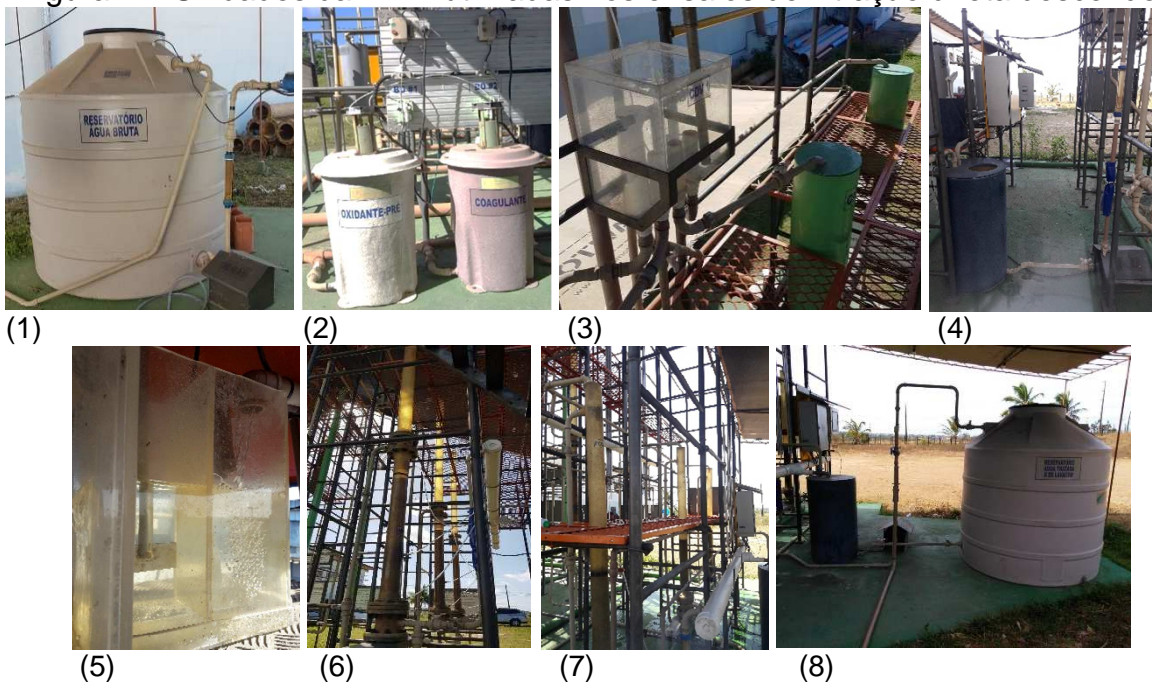
Figura 3 – Vista longitudinal da IPDF



Legenda: (1) reservatório de água bruta; (2) conjuntos de preparação e dosagem de produtos químicos; (3) caixa de distribuição de vazão; (4) câmaras de pré-oxidação; (5) câmaras de adsorção em carvão ativado pulverizado; (6) câmara de sucção intermediária; (7) câmara de mistura rápida (8) filtros de fluxo ascendente de pedregulho; (9) câmaras de inter-oxidação; (10) filtros rápidos de fluxo descendente de areia; (11) filtros de contato em leito de carvão ativado granulado; (12) câmara de sucção de água tratada/lavagem; (13) reservatório de água tratada e de lavagem dos filtros.

Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 4 – Unidades da IPDF utilizadas nos ensaios de filtração direta descendente



Legenda: (1) reservatório de água bruta; (2) dois conjuntos de preparação e dosagem de produtos químicos; (3) caixa de distribuição de vazão e duas câmaras de pré-oxidação; (4) câmara de sucção intermediária; (5) câmara de mistura rápida; (6) três filtros rápidos de fluxo

descendente de areia; (7) três filtros de contato em leito de carvão ativado granulado; (8) câmara de sucção e reservatório de água tratada e de lavagem dos filtros.

Fonte: A autoria própria (2019).

3.3 FASES DA PESQUISA

O presente estudo constituiu um recorte do projeto “Caracterização de resíduos líquidos gerados em instalação piloto de dupla filtração e em ETA de ciclo completo em escala real”, CNPq-SETEC/MEC N° 17/2014, coordenado pelo professor Dr. André Luis Calado Araújo, executado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), com colaboração da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) e da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Esta pesquisa foi conduzida em duas fases, sendo: Fase 1 – Filtração direta em leito simples de areia e Fase 2 – Filtração direta em leito duplo de areia e carvão antracito seguido de adsorção em carvão ativado. No estudo foi avaliado o uso da filtração direta descendente para diferentes taxas de filtração, meios filtrantes e granulometrias.

3.3.1 Fase 1 – Filtração direta em leito simples de areia

Na primeira fase da pesquisa foi avaliada a qualidade da água tratada para quatro diferentes taxas de filtração: 253 m³/m².dia, 280 m³/m².dia, 310 m³/m².dia, e 340 m³/m².dia. Cada ensaio na IPDF teve duração de 8 horas e usou de forma aleatória uma das taxas de filtração do planejamento. Os ensaios foram realizados em triplicata, ou seja, três ensaios para cada taxa de filtração, totalizando 12 ensaios.

Os experimentos foram realizados em filtros com leito filtrante simples de areia e 700 mm de espessura de camada filtrante. O diâmetro mínimo (D₀), efetivo (D₁₀), máximo (D₁₀₀) e o coeficiente de desuniformidade (CD) dos grãos, para cada filtro estudado, encontram-se apresentados na Tabela 3. Em cada ensaio da IPDF os três FRDA foram operados, desse modo, para o leito simples de areia, em cada taxa de filtração testada obteve-se o resultado para três granulometrias distintas, conforme planejamento apresentado na Tabela 4.

Devido ao curto tempo para a realização da pesquisa, optou-se por na fase subsequente realizar os ensaios apenas em duplicata.

Tabela 3 – Características dos FRDA estudados na Fase 1 da pesquisa

Filtro	Leito filtrante	D ₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₁₀₀ (mm)	CD (mm)
FRDA 1	Areia	0,35	0,50	1,00	1,60
FRDA 2	Areia	0,35	0,57	1,19	1,84
FRDA 3	Areia	0,42	0,87	1,65	1,67

Legenda: FRDA = Filtro rápido de fluxo descendente de areia; D₀= diâmetro mínimo dos grãos; D₁₀ = diâmetro efetivo dos grãos; D₁₀₀ = diâmetro máximo dos grãos; CD = coeficiente de desuniformidade.

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 4 – Ensaio da Fase 1 – Filtração direta em leito simples de areia

Ensaio	Taxa (m ³ /m ² .dia)	Filtro
E1, E2, E3	253	FRDA 1 D ₁₀ = 0,50 mm
		FRDA 2 D ₁₀ = 0,57 mm
		FRDA 3 D ₁₀ = 0,87 mm
E4, E5, E6	280	FRDA 1 D ₁₀ = 0,50 mm
		FRDA 2 D ₁₀ = 0,57 mm
		FRDA 3 D ₁₀ = 0,87 mm
E7, E8, E9	310	FRDA 1 D ₁₀ = 0,50 mm
		FRDA 2 D ₁₀ = 0,57 mm
		FRDA 3 D ₁₀ = 0,87 mm
E10, E11, E12	340	FRDA 1 D ₁₀ = 0,50 mm
		FRDA 2 D ₁₀ = 0,57 mm
		FRDA 3 D ₁₀ = 0,87 mm

Legenda: FRDA = Filtro rápido de fluxo descendente de areia; D₁₀ = diâmetro efetivo dos grãos.

Fonte: Autoria própria (2019).

3.3.2 Fase 2 – Filtração direta em leito duplo de areia e carvão antracito seguido de adsorção em carvão ativado

Na segunda fase da pesquisa foi avaliada a qualidade da água tratada para quatro diferentes taxas de filtração: 253 m³/m².dia, 280 m³/m².dia, 310 m³/m².dia, e 340 m³/m².dia. Cada ensaio na IPDF teve duração de 8 horas e usou de forma aleatória uma das taxas de filtração do planejamento. Os ensaios foram realizados em duplicata, ou seja, dois ensaios para cada taxa de filtração, totalizando 8 ensaios.

Os experimentos foram realizados com leito filtrante duplo de areia e carvão antracito com 700 mm de espessura de camada filtrante, sendo a espessura da camada filtrante de areia de 450 mm e a camada de carvão antracito de 250 mm. A camada filtrante de carvão antracito teve as seguintes características para os três filtros: D₀ = 0,42 mm, D₁₀ = 1,0 mm, D₁₀₀ = 1,80 mm, CD = 1,40. A camada filtrante de

areia manteve as características da primeira fase, reduzindo apenas a espessura, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Características dos FRDA estudados na Fase 2 da pesquisa

Filtro	Leito filtrante	D₀ (mm)	D₁₀ (mm)	D₁₀₀ (mm)	CD (mm)
FRDA 1	Areia	0,35	0,50	1,00	1,60
	Antracito	0,42	1,00	1,80	1,40
FRDA 2	Areia	0,35	0,57	1,19	1,84
	Antracito	0,42	1,00	1,80	1,40
FRDA 3	Areia	0,42	0,87	1,65	1,67
	Antracito	0,42	1,00	1,80	1,40

Legenda: FRDA = Filtro rápido de fluxo descendente de areia; D₀= diâmetro mínimo dos grãos; D₁₀ = diâmetro efetivo dos grãos; D₁₀₀ = diâmetro máximo dos grãos; CD = coeficiente de desuniformidade.

Fonte: A autoria própria (2019).

Nessa fase também foi avaliado o desempenho do uso de FCAG após os FRDA com leito duplo. De modo que após a água ser filtrada nos três FRDA foi reunida em tubulação de PVC e distribuída para os três FCAG. Para o leito filtrante dos FCAG foram realizados experimentos em meio filtrante de contato com 650 mm de espessura. A Tabela 6 apresenta o resumo dos ensaios realizados nesta fase da pesquisa e a Tabela 7 as características de cada FCAG estudado.

Tabela 6 – Ensaio da Fase 2 – Filtração direta em leito duplo de areia e carvão antracito seguido de adsorção em carvão ativado

Ensaio	Taxa (m³/m².dia)	FRDA	FCAG
E13, E14	253	FRDA 1 (D ₁₀ areia = 0,50 mm/ D ₁₀ antracito = 1,00 mm) FRDA 2 (D ₁₀ areia = 0,57 mm/ D ₁₀ antracito = 1,00 mm) FRDA 3 (D ₁₀ areia = 0,87 mm/ D ₁₀ antracito = 1,00 mm)	FCAG1 (D ₁₀ = 0,23 mm) FCAG2 (D ₁₀ = 0,60 mm) FCAG3 (D ₁₀ = 0,90 mm)
E15, E16	280		
E17, E18	310		
E19, E20	340		

Legenda: FRDA = Filtro rápido descendente de areia; FCAG = filtros de contato de carvão granulado D₁₀ = diâmetro efetivo.

Fonte: A autoria própria (2019).

Tabela 7 – Características dos FCAG estudados na Fase 2 da pesquisa

Filtro	Leito filtrante	D₀ (mm)	D₁₀ (mm)	D₁₀₀ (mm)	CD (mm)
FCAG 1	CAG	0,20	0,23	1,18	2,22
FCAG 2	CAG	0,42	0,60	1,90	2,17
FCAG 3	CAG	0,80	0,90	1,95	1,94

Legenda: FCAG = filtros de contato em leito de carvão ativado granulado; CAG= carvão ativado granulado/ D₀= diâmetro mínimo dos grãos; D₁₀ = diâmetro efetivo dos grãos; D₁₀₀ = diâmetro máximo dos grãos; CD = coeficiente de desuniformidade.

Fonte: Autoria própria (2019).

3.4 ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

Para a distribuição granulométrica do material filtrante por peneiramento, foram utilizadas peneiras granulométricas e agitador eletromagnético. O material filtrante existente nos FRDA, proveniente de pesquisas anteriores, incluindo a camada torpedo, foi lavado, seco em estufa, peneirado por 10 minutos a uma frequência de 5 rpm e posteriormente pesada a massa retida em cada uma das peneiras, até obter a quantidade necessária para cada filtro com as características pré-estabelecidas para cada camada. Quando necessário, para completar a quantidade de massa desejada, foi peneirada areia de praia, previamente lavada e seca. Após a obtenção do material filtrante necessário, foi realizada a montagem dos FRDA da IPDF para o início dos ensaios da primeira fase.

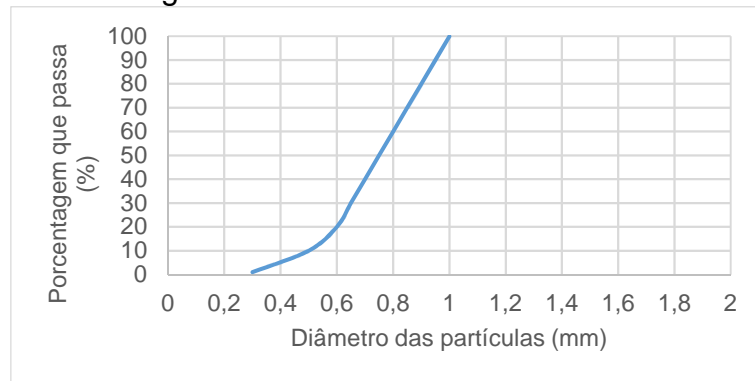
As Figuras 5,6, e 7 apresentam as curvas granulométricas do material preparado e a Tabela 8 apresenta a composição da camada suporte utilizada para os FRDA, considerando o fundo dos filtros similar ao de blocos distribuidores.

Tabela 8 – Composição da camada suporte dos FRDA

Subcamada	Espessura (cm)	Tamanho (mm)
1 (topo)	5	19,00 – 12,50
2	5	12,50 – 6,40
3	5	6,40 – 3,40
4	5	3,40 - 2,00
5	5	6,40 – 3,40
6	5	12,50 – 6,40
7 (fundo)	5	19,00 – 12,50

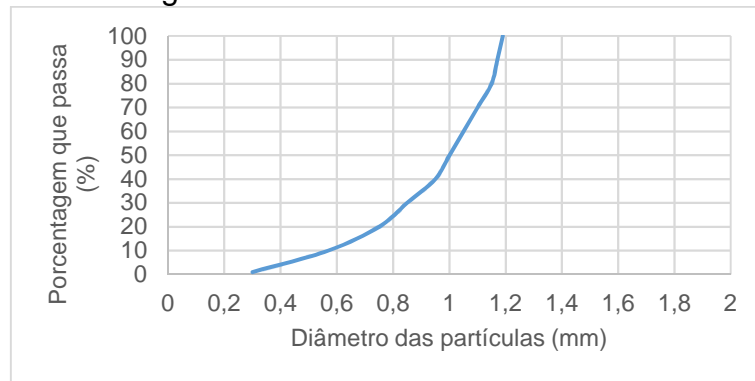
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 5 – Curva granulométrica das camadas de areia do FRDA 1



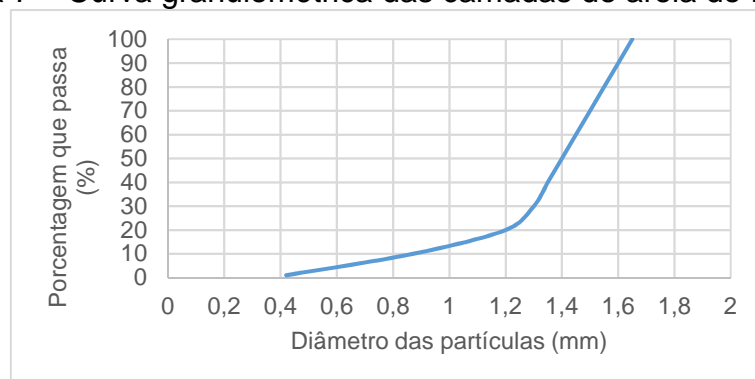
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 6 – Curva granulométrica das camadas de areia do FRDA 2



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 7 – Curva granulométrica das camadas de areia do FRDA 3

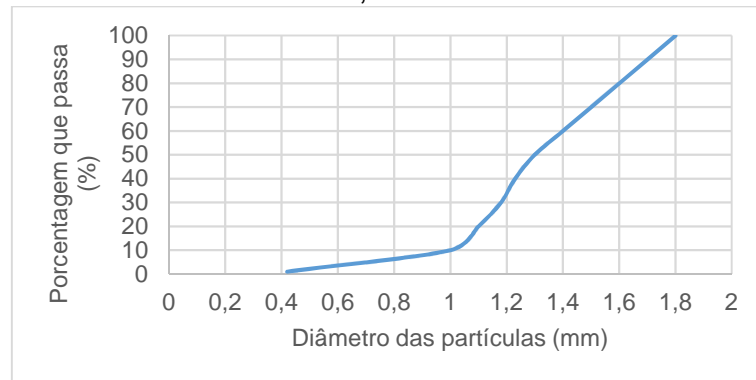


Fonte: Autoria própria (2019).

Para a segunda fase da pesquisa os FRDA passaram a ter leito filtrante duplo, de areia e carvão antracito. Foi realizada a retirada de todo material filtrante dos três filtros e repetidos os processos de limpeza e peneiramento. O carvão antracito utilizado passou também por peneiramento, apresentando a curva granulométrica expressa na Figura 8. Após a classificação, os FRDA foram novamente montados, não havendo alteração na camada suporte dos FRDA. Nessa fase da pesquisa a

espessura da camada filtrante de areia foi reduzida de 700 mm para 450 mm, e foi incluída camada de carvão antracito com 250 mm de espessura.

Figura 8 – Curva granulométrica da camada de carvão antracito usada nos FRDA 1,2 e 3



Fonte: Autoria própria (2019).

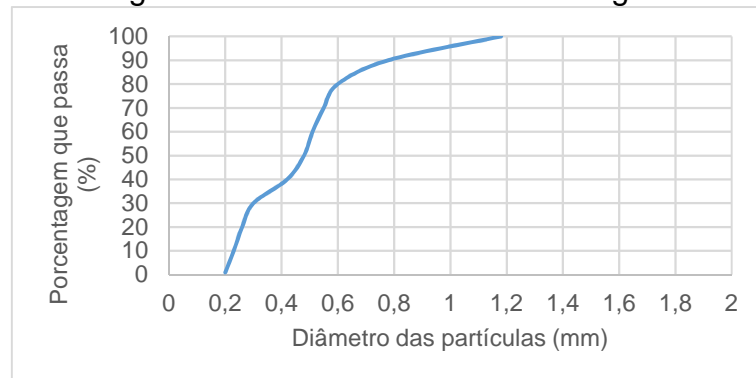
Para a segunda fase da pesquisa foi utilizado os FCAG após os FRDA. Tanto a camada suporte quanto a camada filtrante dos FCAG são compostas de carvão de endocarpo de coco. Também foi realizada a distribuição granulométrica por peneiramento antes da montagem dos FCAG. A Tabela 9 apresenta a composição da camada suporte dos FCAG e as Figuras 9,10 e 11 as curvas granulométricas das camadas filtrantes.

Tabela 9 – Composição da camada suporte dos FCAG

Subcamada	Espessura (cm)	Tamanho (mm)
1 (topo)	5	1,70 – 1,18
2	5	3,35 – 1,70
3	5	6,30 – 3,35
4 (fundo)	5	9,50 – 6,30

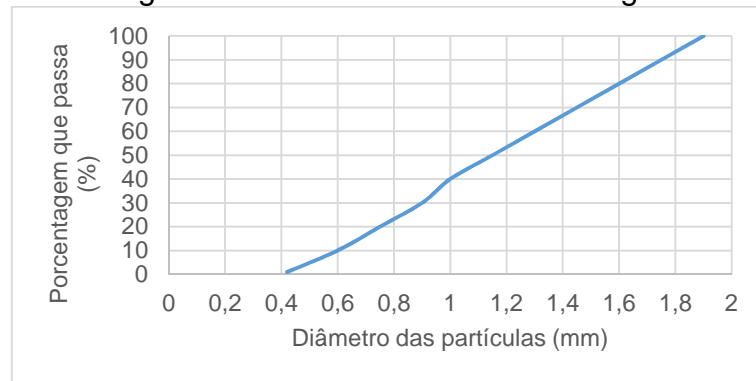
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 9 – Curva granulométrica do carvão ativado granular do FCAG 1



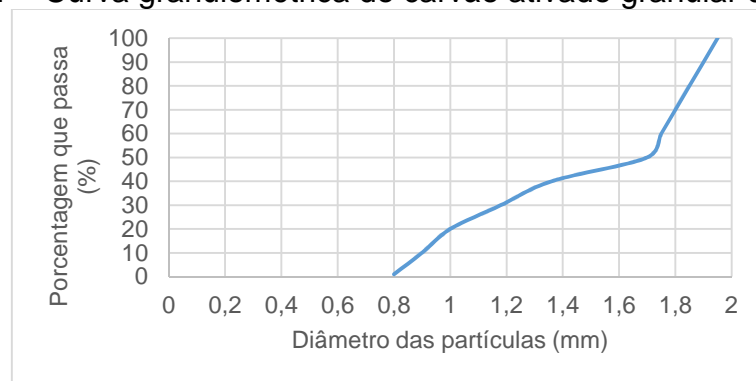
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 10 – Curva granulométrica do carvão ativado granular do FCAG 2



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 11 – Curva granulométrica do carvão ativado granular do FCAG 3



Fonte: Autoria própria (2019).

3.5 ENSAIOS DE BANCADA EM LABORATÓRIO

Na primeira fase da pesquisa as condições de pré-oxidação e coagulação dos ensaios da IPDF foram fixadas considerando os resultados obtidos pela pesquisa de Freitas (2017) que realizou, em etapa anterior do projeto, estudo em reatores estáticos de laboratório, avaliando a tratabilidade da água bruta da lagoa de Extremoz em diferentes situações. De modo que para a pré-oxidação foi adotada dose de 3 mg/L de hipoclorito de cálcio e tempo de contato na faixa de 20 minutos, a depender da vazão reproduzida na IPDF; e para a coagulação dose de 6 mg/L de hidroxicloreto de alumínio, para o pH natural da água, gradiente de mistura rápida de 1.000 s^{-1} e tempo de mistura na faixa de 20s, a depender da vazão reproduzida na IPDF.

No entanto, devido às variações na qualidade da água observadas no decorrer da execução dos ensaios na IPDF, optou-se por realizar novos ensaios de bancada em laboratório para definir as condições de pré-cloração e coagulação a serem utilizadas na segunda fase da pesquisa.

Os novos ensaios em bancada foram realizados no laboratório de toxicologia do IFRN com agitador jarteste. O equipamento utilizado possui seis jarros em acrílico transparente com o volume de dois litros cada. Para cada jarro há uma palheta metálica capaz de empregar uma rotação que varia entre 200 e 1600 rpm. Essa rotação em rpm pode ser convertida em gradiente de mistura (s^{-1}) utilizando as dimensões do jarro e da palheta metálica. Para o equipamento em questão, a relação entre rpm e gradiente de mistura foi de 0,9998, sendo considerado 1:1.

Foram adaptados ao jarteste seis filtros de acrílico com diâmetro de 20 mm e 160 mm de espessura de material filtrante, compreendendo a faixa de tamanho dos grãos de 0,30 mm a 0,60 mm de diâmetro, apresentando D_{10} de 0,37 mm, de acordo com recomendações de Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011). Antes de começar cada experimento, foi realizada a lavagem dos filtros acoplado uma mangueira no dispositivo de saída, proporcionando um fluxo ascendente e a expansão do leito. As lavagens tiveram duração de um minuto e utilizaram água potável. Após a lavagem, os filtros eram preenchidos com água destilada e posteriormente iniciado o ensaio.

As soluções químicas foram preparadas utilizando água destilada. Foram utilizados hipoclorito de cálcio ($Ca(ClO)_2$) com 65% de pureza como oxidante e hidroxicloreto de alumínio (HCA 23) com 23% de alumina como coagulante. Em ambos os casos foram preparadas soluções base com concentração de um grama por litro, de modo a variar os volumes a serem pipetados nos jarros, com a finalidade de gerar dentro do jarro uma dosagem por litro. As soluções foram preparadas no início dos ensaios, para uso imediato. Foi observado na prática que o hipoclorito utilizado possuía apenas 40% de pureza, sendo este o valor utilizado como base para o cálculo no preparo da solução. Cada dosagem estudada foi testada em duplicata.

A primeira série de ensaios objetivou definir a melhor condição de pré-oxidação. Para esse ensaio a água foi apenas oxidada e posteriormente filtrada, não houve coagulação. Foi fixado gradiente de mistura de $250 s^{-1}$ e o tempo de contato em 20 minutos, referente ao tempo de contato proporcionado nas CPOX da IPDF para a maior vazão a ser estudada (menor tempo de contato). Foram testadas dosagens de 3, 5, 7, 8, 9 e 10 mg/L de $Ca(ClO)_2$.

Após definida a melhor condição de pré-oxidação, esta foi fixada e realizada a segunda série de ensaios, com água oxidada, para definir os parâmetros de coagulação. O gradiente de mistura foi fixado em $1000 s^{-1}$ e o tempo de mistura de

22s, equivalente ao tempo de mistura rápida proporcionado na IPDF para a maior vazão a ser estudada. Foram testadas dosagens de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mg/L de HCA 23. As dosagens de oxidante e coagulante que apresentaram os melhores resultados foram utilizadas na IPDF, nos ensaios da segunda fase da pesquisa.

3.6 PROTOCOLO DOS ENSAIOS NA IPDF

Em cada ensaio realizado na IPDF, inicialmente os FRDA eram lavados por 8 minutos em fluxo ascendente com o objetivo de expandir o material filtrante. Em paralelo era realizado o preparo das soluções do pré-oxidante e coagulante a serem utilizados no experimento. Após pesagem, os produtos químicos eram depositados cada um em seu respectivo tanque de preparação e dosagem de produto químico para a mistura por agitador elétrico e preparo da solução com água tratada proveniente do RAT/AL.

Na sequência era realizado o ajuste na rotação da bomba centrífuga de eixo horizontal de recalque de água bruta, para proporcionar a vazão a ser utilizada em cada ensaio, compatível com a taxa de filtração fixada para o experimento. Para as taxas de filtração de 253 m³/m².dia, 280 m³/m².dia, 310 m³/m².dia, e 340 m³/m².dia, as vazões de tratamento utilizadas, considerando o tamanho dos FRDA, foram de 249 L/h, 275 L/h, 301 L/h e 333 L/h, respectivamente.

Dado o acionamento da bomba de recalque de água bruta, a bomba dosadora de pré-oxidante era ativada e aguardava-se a água pré-oxidada encher o volume das duas câmaras de pré-oxidação (56 litros, cada) utilizadas nos ensaios. Após as câmaras cheias era acionada a bomba dosadora de coagulante, o motor da mistura rápida mecanizada e a bomba intermediária (câmara de sucção intermediária). O início de cada ensaio era dado no momento em que a água coagulada preenchia os FRDA, iniciando a contagem das 8 horas.

Os volumes e vazões bombeados foram monitorados por hidrômetro com vazão nominal de 1,5 m³/h (para a água bruta) e rotâmetros em acrílico, de área variável, com faixa de medição de 125 L/h a 1250 L/h para a água bruta, intermediária e tratada/lavagem. A vazão instantânea de cada FRDA e FCAG (FCAG apenas na segunda fase da pesquisa) foi monitorada por rotâmetro em acrílico, com faixa de medição de 60 a 500 L/h, instalado na tubulação de saída de cada filtro.

A medição da perda de carga no meio filtrante foi realizada pela leitura da pressão estática nos piezômetros instalados na base (P_0), interface das camadas suporte e filtrante (P_1), e acima da camada filtrante (P_2) dos filtros. Os níveis dos piezômetros (P_0 , P_1 e P_2) foram verificados a cada hora para acompanhamento das perdas de carga no meio filtrante dos FRDA e FCAG (FCAG apenas na segunda fase da pesquisa). A carreira de filtração de cada FRDA era interrompida quando as perdas de carga do filtro totalizavam 2,40 m. Ocorrendo nova lavagem por 8 minutos em fluxo ascendente.

No início de cada ensaio foi feita a coleta de água bruta em torneira situada na tubulação de entrada de água da ETA Extremoz, próximo à IPDF, para proporcionar a caracterização da água bruta no período da pesquisa. As coletas de água filtrada foram realizadas a cada hora através da torneira de saída instalada em cada FRDA e em cada FCAG (apenas na segunda fase).

A Tabela 10 apresenta resumo das condições operacionais para cada taxa de filtração estudada.

Tabela 10 – Taxas de filtração, vazões afluentes e tempos de contato estudados

Taxa FRDA (m ³ /m ² .dia)	Vazão (L/h)	Tempos de contato		
		TPOX (min)	TMR (s)	TFCAG (min)
253	249	27	29	4
280	275	25	26	3
310	301	23	24	3
340	333	20	22	3

Legenda: FRDA = filtro rápido descendente de areia; TPOX = tempo de pré-oxidação; TMR = tempo de mistura rápida; TFCAG = tempo nos filtros de contato de carvão granulado.

Fonte: Autoria própria (2019).

3.7 AMOSTRAGEM E ANÁLISE LABORATORIAL

Os ensaios realizados na IPDF tiveram duração de oito horas, com amostras coletadas a cada hora, na saída de cada um dos três FRDA e dos FCAG (na segunda fase da pesquisa). Na primeira fase, para cada ensaio foram coletadas 24 amostras de água filtrada e uma de água bruta, totalizando 25 amostras, enquanto na segunda fase foram coletadas 48 amostras de água filtrada e uma de água bruta, totalizando 49 amostras por ensaio.

No próprio laboratório da ETA Extremoz foram realizadas as análises de cor aparente, turbidez, pH e temperatura. Na sequência as amostras eram refrigeradas. Ao final de cada ensaio todas as amostras eram encaminhadas ao laboratório de saneamento do IFRN para a realização das análises de cor verdadeira e ABS_{254} . A água bruta também foi avaliada para os mesmos parâmetros.

Os procedimentos de coleta, preservação, armazenamento e análise das amostras foram realizados segundo orientação da American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) e Water Environment Federation (WEF), (2012). As variáveis analisadas e respectivas metodologias analíticas utilizadas estão resumidas no Quadro 1.

Quadro 1 – Variáveis de controle e metodologias de análise

Variáveis	Metodologia de Análise	Referência
Temperatura	Potenciometria	APHA, AWWA e WEF 2550 B
pH	Potenciometria	APHA, AWWA e WEF 4500-H+ B
Turbidez	Nefelometria	APHA, AWWA e WEF 2130 B
Cor aparente e verdadeira	Espectrofotometria UV/visível	APHA, AWWA e WEF 2120 B
Absorbância a 254 nm (UV _{254nm})	Espectrofotometria UV/visível	APHA, AWWA e WEF 5910 B

Fonte: Adaptado de APHA; AWWA; WEF (2012).

3.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Os dados obtidos foram analisados considerando parâmetros de estatística descritiva para obter a tendência central dos resultados (média) e para indicar a dispersão ocorrida (desvio padrão, valores mínimos e máximos).

Com o objetivo de verificar se existem diferenças significativas entre as respostas médias das variáveis obtidas nas diferentes amostras avaliadas, foram realizadas análises de variância ANOVA com nível de significância de 5%. O uso da ANOVA permite comparar ao mesmo tempo médias de dois ou mais grupos para uma mesma variável. Nesse sentido foi possível comparar o tratamento da água para as diferentes taxas de filtração, composições e granulometrias das camadas filtrantes estudadas (grupos) para cada variável de controle analisada. A análise gráfica foi feita por meio

de gráficos de interação que apresentaram, ao mesmo tempo, resultados da estatística descritiva e as correlações entre os grupos avaliados.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados desta pesquisa são apresentados e discutidos em duas fases, considerando as composições de camadas filtrantes estudadas, sendo: Fase 1 – Leito simples de areia e Fase 2 – Leito duplo de areia e carvão antracito seguido de adsorção em carvão ativado.

4.1 FASE 1 – FILTRAÇÃO DIRETA EM LEITO SIMPLES DE AREIA

4.1.1 Caracterização da água bruta

De março a julho de 2017 foram realizados os 12 ensaios da primeira fase da pesquisa na IPDF. A Tabela 11 apresenta as características da água bruta para o período da realização dos experimentos, contendo os valores máximos, médio, mínimo e o desvio padrão obtido.

Tabela 11 – Características da água bruta no período de março a julho de 2017

Variável	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio Padrão
Temperatura (°C)	26	27	28	1,0
pH	7,56	7,70	7,80	0,1
Turbidez (uNT)	2,20	3,16	6,37	1,1
Cor aparente (uH)	22	27	35	4,0
Cor verdadeira (uH)	8	13	24	5,0
ABS ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0,09	0,16	0,18	0,1

Legenda: ABS₂₅₄ = absorbância UV 254 mm.

Fonte: Autoria própria (2019).

De modo geral, comparando os valores de turbidez e cor aparente da Tabela 11 com o apresentado na Figura 2 – Qualidade da água bruta da lagoa de Extremoz – RN no período de 1992 a 2018, percebe-se que os valores obtidos estão coerentes com os apresentados nos anos anteriores. Porém, para o curto período estudado, quatro meses, pode-se considerar uma significativa dispersão nos resultados.

Com relação ao pH, apresentou-se neutro com leve alcalinidade, e valores dentro do recomendado para o abastecimento humano pela Portaria da Consolidação nº 5/2017. Duarte (1999) relaciona essa estabilidade à geologia da bacia hidrográfica do Rio Doce, que compreende solos calcáreos e areno-argilosos. O monitoramento

desse parâmetro é importante pois, a depender da faixa em que se encontra, pode prejudicar o tratamento da água, nas etapas de coagulação, remoção de dureza e desinfecção, além ser responsável por processos de incrustações ou corrosão nas unidades constituintes do sistema de abastecimento de água.

No período dos ensaios a temperatura apresentou oscilação em torno de 2°C, que pode ter ocorrido devido aos meses em que foram realizadas as análises, entre março e julho, período que caracteriza a transição entre o verão e o inverno no Nordeste. Ainda assim, o valor médio encontrado, 27°C está coerente com a média anual informada pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte, de 28°C, referente ao ano de 2017 (RIO GRANDE DO NORTE, 2018a).

A determinação da absorbância em luz UV 254 nm, ABS_{254} , foi usada como alternativa rápida para estimar o conteúdo de matéria orgânica das amostras de água bruta (Penitsky, 2003). No período analisado o parâmetro demonstrou constância nos resultados, com valor médio de 0,16 cm^{-1} e desvio padrão de 0,1. Brito (2018) avaliou a qualidade da água bruta da lagoa de Extremoz no mesmo período e constatou pelo coeficiente de correlação de Pearson, uma forte correlação entre os valores médios de ABS_{254} e clorofila a ($\rho = 0,84$) e uma correlação moderada entre a ABS_{254} e a MON ($\rho = 0,63$).

4.1.2 Avaliação da taxa de filtração e granulometria do meio filtrante utilizando leito simples de areia

Na primeira fase da pesquisa foi avaliada a qualidade da água tratada para quatro taxas de filtração e três granulometrias em leito filtrante simples de areia. Foram realizados três ensaios para cada taxa de filtração, totalizando 12 ensaios de 8 horas e em cada ensaio da IPDF os três FRDA foram operados, cada um com uma granulometria. Desse modo, para o leito simples de areia, em cada taxa de filtração testada obteve-se o resultado para três granulometrias distintas. A Tabela 12 apresenta o resumo estatístico dos valores médios remanescentes das variáveis de controle para cada condição de tratamento.

As condições de pré-oxidação e coagulação dos ensaios da IPDF nesta fase foram estabelecidas considerando os resultados obtidos pela pesquisa de Freitas (2017). Sendo, para pré-oxidação, dose de 3 mg/L de hipoclorito de cálcio e tempo de contato na faixa de 20 minutos, a depender da vazão estudada; e para a coagulação,

dose de 6 mg/L de hidroxocloreto de alumínio, gradiente de mistura rápida de 1.000 s⁻¹ e tempo de mistura na faixa de 20s, a depender da vazão reproduzida.

Tabela 12 – Resumo estatístico dos ensaios adotando leito simples de areia

TXT (m³/m².dia)	FRDA	MEDIA/DP	T (°C)	pH	Turb (uNT)	CorA (uH)	CorV (uH)	ABS₂₅₄ (cm⁻¹)
253	1	MEDIA	28	7,68	1,43	18	7	0,12
		DP	1,6	0,2	0,3	2,6	3,0	0,0
	2	MEDIA	28	7,74	1,5	18	7	0,12
		DP	1,5	0,2	0,3	2,8	2,9	0,0
	3	MEDIA	28	7,78	1,6	18	7	0,11
		DP	1,4	0,1	0,4	2,7	2,6	0,0
280	1	MEDIA	29	7,7	1,29	12	5	0,09
		DP	2,3	0,2	0,4	2,7	1,7	0,0
	2	MEDIA	28	7,74	1,35	12	5	0,09
		DP	1,9	0,1	0,3	2,4	1,7	0,0
	3	MEDIA	28	7,77	1,49	12	4	0,09
		DP	1,8	0,1	0,3	2,1	1,8	0,0
310	1	MEDIA	28	7,8	1,33	13	6	0,11
		DP	2,0	0,1	0,3	2,6	2,3	0,0
	2	MEDIA	27	7,78	1,33	13	6	0,11
		DP	1,8	0,1	0,3	2,5	2,6	0,0
	3	MEDIA	27	7,81	1,48	14	6	0,11
		DP	1,7	0,1	0,4	2,7	2,7	0,0
340	1	MEDIA	28	7,67	1,44	13	5	0,11
		DP	1,9	0,2	0,7	3,1	1,1	0,0
	2	MEDIA	28	7,68	1,57	13	5	0,11
		DP	1,4	0,1	0,7	2,5	1,2	0,0
	3	MEDIA	28	7,73	1,76	14	5	0,11
		DP	1,4	0,1	0,8	2,6	0,9	0,0

Legenda: TXT = taxa de filtração; FRDA = filtro rápido descendente de areia; DP= desvio padrão; T= temperatura; pH = potencial hidrogenionico; Turb. = turbidez; Cor A = cor aparente; Cor V= cor verdadeira; ABS₂₅₄ = absorvância UV 254 mm.

Fonte: Autoria própria (2019).

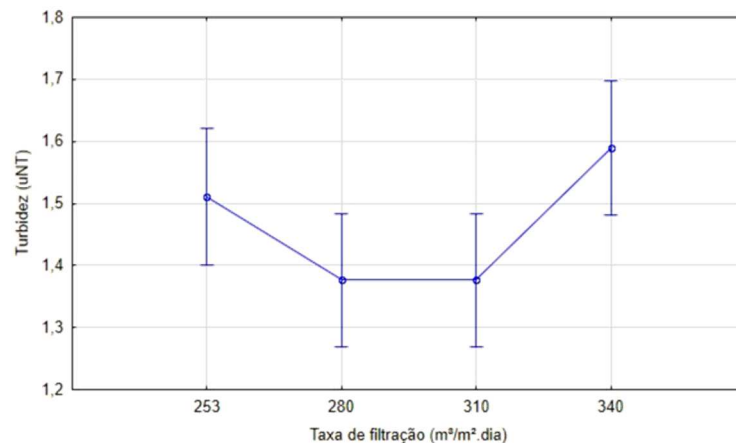
Ao analisar a Tabela 12 é possível perceber que não houve alterações no pH após o tratamento, desse modo não foi necessário a correção da variável mesmo após a coagulação. Essa pouca variação do pH no meio tratado é comum quando se faz uso do hidroxocloreto de alumínio como coagulante, tendo em vista que durante a hidrólise

o hidroxicloreto libera, para uma mesma dosagem de íons metálicos, uma quantidade de ácido consideravelmente menor quando comparado a outros coagulantes, como cloreto de alumínio, sulfato de alumínio ou cloreto férrico (PAVANELLI, 2001).

Para todos os filtros e taxas de filtração avaliados, a turbidez encontrada esteve acima do estabelecido pela Portaria da Consolidação nº 5/2017, que limita para sistemas que usam filtração rápida, turbidez inferior a 0,50 uNT na saída do tratamento (BRASIL, 2017). A taxa filtração de 253 m³/m².dia também não atendeu o limite estabelecido pela Portaria para a cor aparente, ultrapassando, nas três granulometrias de leito filtrante estudadas, o valor de 15 uH. No entanto, para as demais taxas de filtração estudadas, a cor aparente obtida esteve dentro do especificado pela legislação.

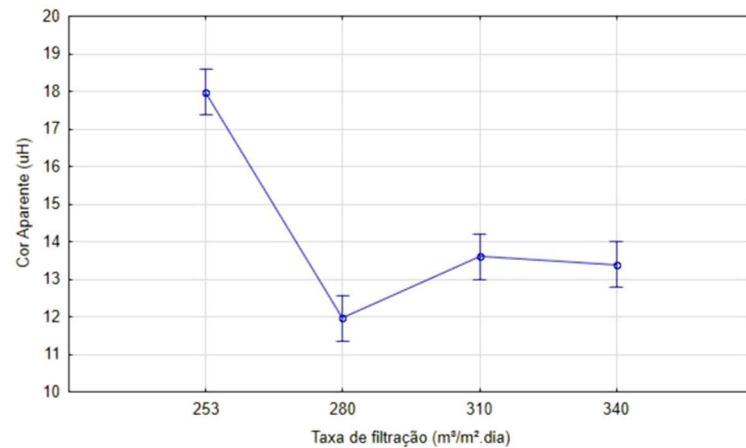
As Figuras 12, 13, 14 e 15, apresentam os valores médios remanescentes para turbidez, cor aparente, cor verdadeira e ABS₂₅₄ respectivamente, considerando as taxas de filtração analisadas na pesquisa. Ao avaliar o valor médio (centro) e o intervalo de confiança (dispersão dos resultados) para cada taxa de filtração (grupo), pode-se perceber que em vários momentos os intervalos de confiança se sobrepõem.

Figura 12 – Turbidez remanescente para cada taxa de filtração em leito simples de areia



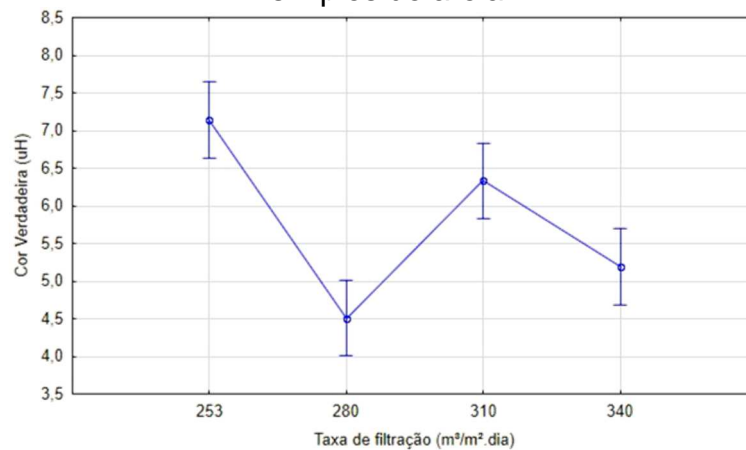
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 13 – Cor aparente remanescente para cada taxa de filtração em leito simples de areia



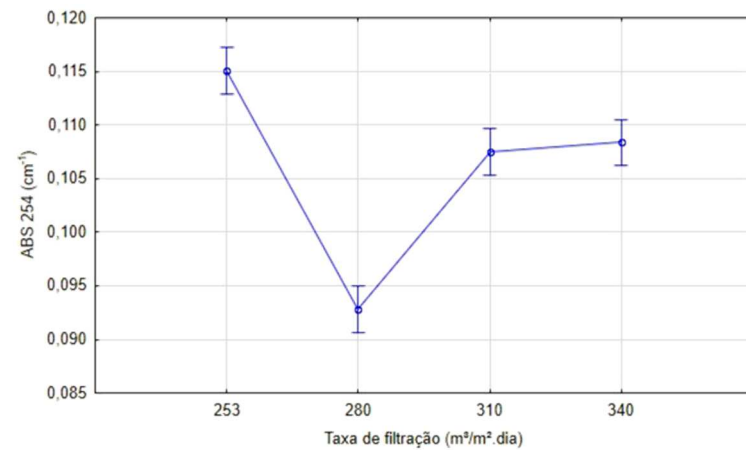
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 14 – Cor verdadeira remanescente para cada taxa de filtração em leito simples de areia



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 15 – ABS₂₅₄ remanescente para cada taxa de filtração em leito simples de areia



Fonte: Autoria própria (2019).

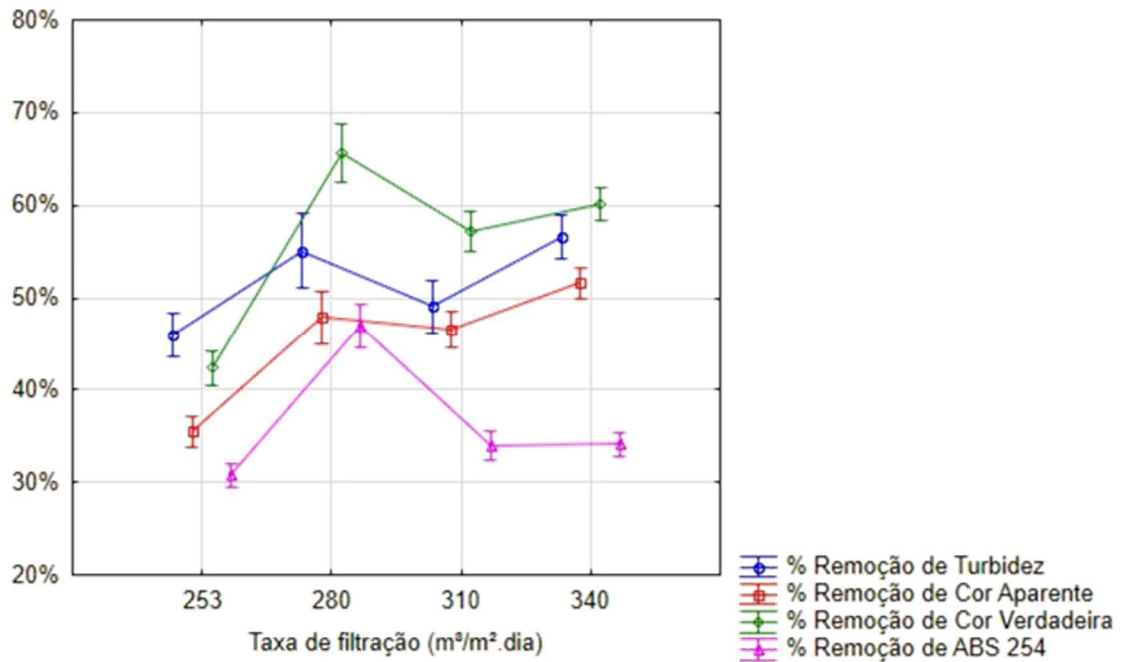
Na Figura 12, gráfico referente a turbidez remanescente, para as taxas de filtração estudadas, os intervalos alusivos às taxas de 253 e 340 m³/m².dia apresentam os piores valores de turbidez remanescente e sobrepõem-se entre si, mostrando equivalência estatística para a remoção da variável. A mesma sobreposição ocorre entre os intervalos referentes às taxas de 280 e 310 m³/m².dia, nesse caso, indicando equivalência estatística para os melhores valores de turbidez remanescente. Independente da taxa de filtração aplicada a turbidez média remanescente foi de aproximadamente 1,5 uNT, considerada inadequada pelos padrões de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde (Brasil, 2017).

Quanto as Figuras 13 e 15, referentes a cor aparente e ABS₂₅₄ remanescentes, respectivamente, percebe-se que para as taxas de 253 e 280 m³/m².dia os intervalos de confiança não sobrepõem com os demais, por conseguinte, suas médias são significativamente diferentes em relação às médias dos outros dois grupos. Nesse caso, tanto para a cor aparente quanto para a ABS₂₅₄, a taxa de filtração de 253 m³/m².dia apresentou o pior resultado para o tratamento, e a taxa de filtração de 280 m³/m².dia o melhor resultado. Para as taxas de 310,0 e 340,0 m³/m².dia, não houve diferenças estatisticamente significativas entre as médias e, em ambas as taxas de filtração, os resultados de cor aparente atenderam ao valor máximo permitido pela Portaria da Consolidação nº 5/2017 (BRASIL, 2017). O gráfico referente aos valores médios de cor verdadeira remanescente, Figura 14, apresentou a mesma tendência dos resultados demonstrados para cor aparente e ABS₂₅₄, no entanto, para essa variável, as taxas de 280 e 340 m³/m².dia apresentaram eficiência equivalentes, sendo os melhores resultados para o tratamento.

É sabido que a água tratada deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da saúde e não oferecer riscos à saúde da população. No entanto, diferentemente de quando se realiza ensaios com água sintética, com características previamente definidas, os valores remanescentes das variáveis de controle estudadas nesta pesquisa podem ter refletido as variações da qualidade da água bruta no período.

Nesse sentido, uma alternativa para mensurar de forma mais precisa a influência das diferentes taxas de filtração estudadas é comparar o percentual de remoção das variáveis de controle após o tratamento, considerando os valores da água bruta para cada ensaio. A Figura 16 apresenta os percentuais de remoção para cada taxa de filtração estudada.

Figura 16 – Percentual de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e ABS₂₅₄ para cada taxa de filtração em leito simples de areia



Fonte: Autoria própria (2019).

Analisando a Figura 16 nota-se que a taxa de 253 m³/m².dia, assim como ocorreu quando analisado os valores remanescentes ao tratamento nas Figuras 12 a 15, também obteve o pior desempenho considerando os percentuais de remoção, com cerca de 10% a menos de remoção para cada variável por taxa de filtração estudada. Foi observado em campo que na realização do terceiro ensaio com esta taxa de filtração ocorreu perda do material filtrante durante a lavagem que antecede o ensaio, reduzindo a camada filtrante de cada filtro em cerca de 5 cm. No decorrer das 8 horas, notou-se que os valores de cor aparente e turbidez remanescentes estavam cerca de 25% acima do obtido nos ensaios anteriores para a mesma taxa. Considerando que a filtração ocorre ao longo de todo material filtrante, a redução na camada filtrante em 7% pode ter comprometido negativamente os resultados deste dia e refletido nos valores remanescentes das variáveis estudadas e percentuais de remoção. A reposição do material filtrante ocorreu ao final do ensaio, não comprometendo os ensaios subsequentes.

A remoção da cor verdadeira e ABS₂₅₄ evidenciaram estar fortemente relacionadas, apresentando melhor percentual de remoção para taxa de 280 m³/m².dia e pior desempenho para a taxa de 253 m³/m².dia. Pode-se perceber que, apesar das taxas de filtração maiores proporcionem um tempo de contato menor nas câmaras de

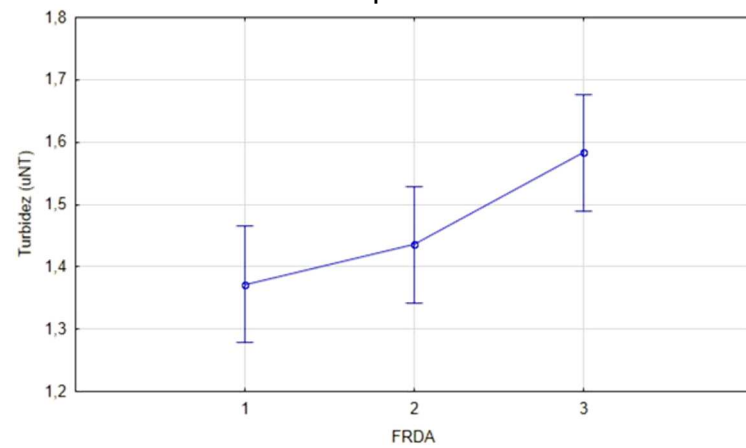
pré-oxidação, não ocorreu relação entre o aumento do tempo de pré-oxidação e a redução de cor. Para a turbidez, as taxas de 280 e 340 m³/m².dia demonstraram remoção média em torno de 56%, sendo os melhores resultados para remoção de turbidez.

Quando analisados apenas os valores remanescentes das variáveis de controle, a taxa de 280 m³/m².dia destaca-se entre as demais apresentando os melhores resultados. Porém, quando consideradas as variações na qualidade da água bruta entre os ensaios, os percentuais de remoção indicam que houve equivalência estatística entre esta taxa e a de 340 m³/m².dia para as variáveis cor aparente e turbidez. Desse modo, considerando os resultados apontados nas análises de variância ANOVA para a remoção das variáveis cor aparente e turbidez, e tendo em vista que o uso de maiores taxas de filtração permite o uso de menores unidades filtrantes, pode-se considerar a taxa de 340 m³/m².dia, maior entre as quatro taxas estudadas, como a melhor alternativa para o tratamento por filtração direta descendente quando adotado leito simples de areia com as granulometrias especificadas no item 3.3.1.

Segundo a NBR 12.216 (ABNT, 1992), em projetos de estação de tratamento de água para consumo humano, quando não é possível a realização de ensaios em filtros-pilotos, a taxa de filtração máxima a ser utilizada para filtros rápidos de areia de leito simples é 180 m³/m².dia. Porém, os resultados dessa pesquisa mostram que, entre as taxas analisadas, o aumento na taxa de filtração para até 340,0 m³/m².dia não prejudicou o tratamento da água para as variáveis cor aparente e turbidez, apresentando, ora equivalência estatística entre as taxas analisadas, ora melhores resultados. Desse modo, evidencia-se como estudos em escala piloto podem refletir em economia nos custos de implantação ou otimização de uma ETA, podendo, nesse caso, significar uma redução no tamanho das unidades filtrantes de quase 90%, considerando a taxa de filtração como parâmetro de dimensionamento para determinação da área superficial dos filtros.

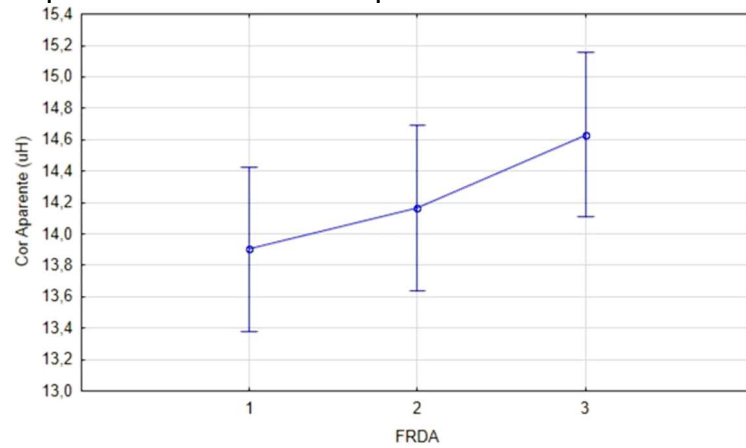
Com relação às granulometrias estudadas, em cada ensaio foram operados os três filtros da IPDF, todos com camada filtrante de 700 mm de areia, sendo para o FRDA 1: D₁₀ = 0,50 mm, FRDA 2: D₁₀ = 0,57 mm e FRDA 3: D₁₀ = 0,87 mm. As Figuras 17, 18, 19 e 20, apresentam os valores médios remanescentes para turbidez, cor aparente, cor verdadeira e ABS₂₅₄ respectivamente, considerando as três granulometrias analisadas na pesquisa.

Figura 17 – Turbidez remanescente para cada FRDA em leito simples de areia



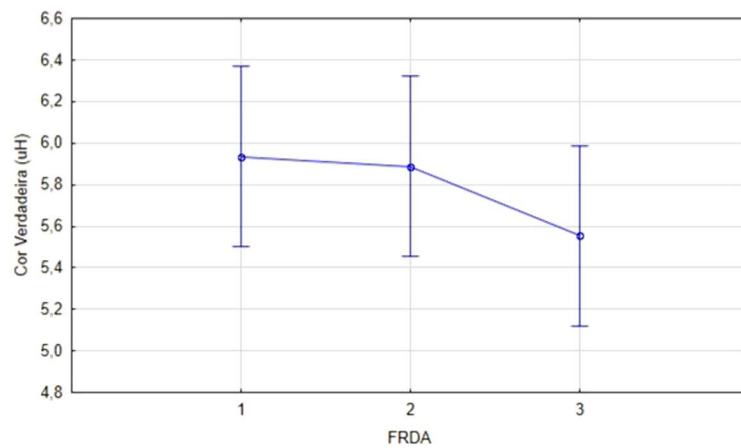
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 18 – Cor aparente remanescente para cada FRDA em leito simples de areia



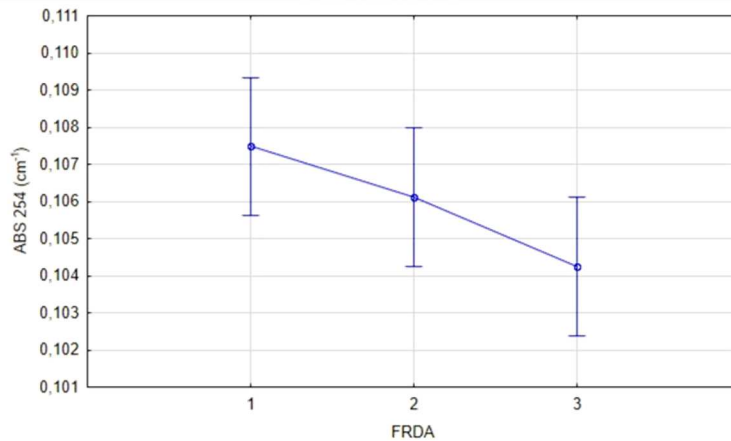
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 19 – Cor verdadeira remanescente para cada FRDA em leito simples de areia



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 20 – ABS₂₅₄ remanescente para cada FRDA em leito simples de areia



Fonte: Autoria própria (2019).

Como já mencionado anteriormente, para o leito filtrante simples de areia, todos os resultados apresentados para a turbidez remanescente encontram-se fora dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria da Consolidação n° 5/2017 (Brasil, 2017). Ainda assim, os FRDA 1 e 3 demonstraram diferença estatística, na qual o filtro com menor granulometria, FRDA 1, apresentou os melhores resultados para a variável e o filtro com maior granulometria, FRDA 3, os piores valores.

Os resultados indicaram que para as variáveis influenciadas diretamente pela concentração de partículas suspensas na água, como a turbidez e a cor aparente, quanto maior a granulometria do meio filtrante, pior foram os valores de turbidez remanescente. Ainda assim, para a cor aparente remanescente, os três filtros demonstraram equivalência nos resultados ($p = 0,14752$). Enquanto as variáveis cor verdadeira e ABS₂₅₄ demonstraram estar correlacionadas e apresentaram equivalência estatística para as três granulometrias estudadas ($p = 0,41018$ $p = 0,5360$, respectivamente).

Com relação à espessura da camada filtrante, Kawamura (2000) propõe que a relação L/D_{10} , sendo L a espessura da camada filtrante e D_{10} o diâmetro efetivo dos grãos, seja maior ou igual a 1.000 para leitos filtrantes de areia. Na IPDF, os FRDA1, FRDA2 e FRDA3, apresentam L/D_{10} iguais a 1.400, 1.228 e 804, respectivamente. Considerando a ação de filtração em profundidade, a altura do meio filtrante fixada em 700 mm para as três granulometrias pode ter comprometido a eficiência das unidades filtrantes, em especial o FRDA 3 que apresentou a relação L/D_{10} inferior a 1.000.

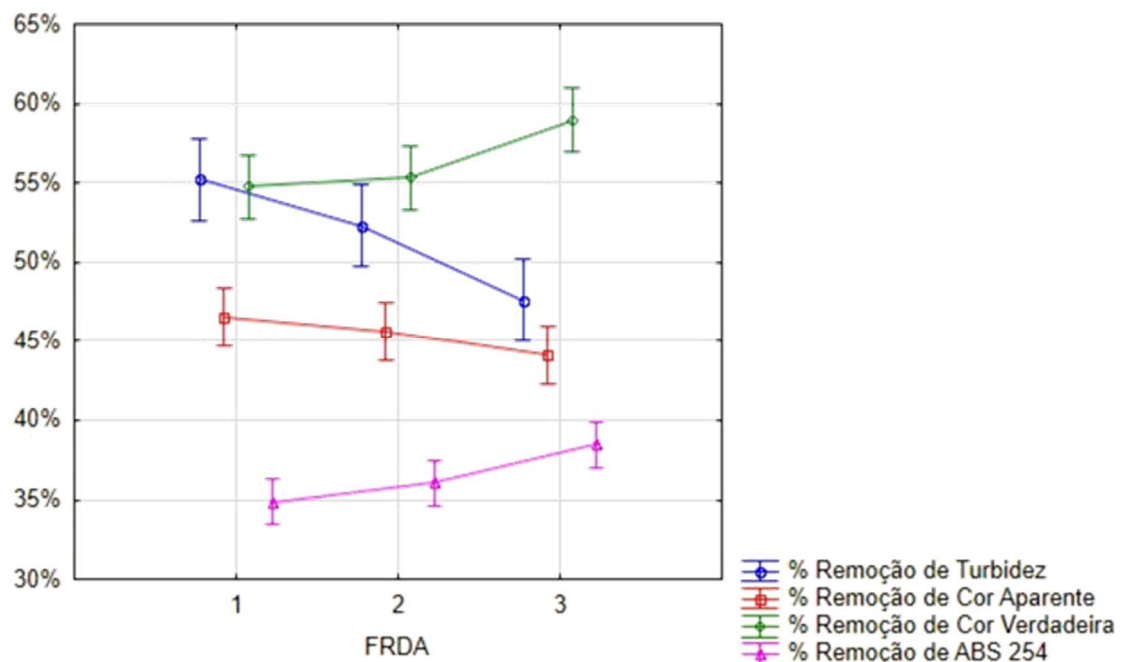
Uma das dificuldades encontradas na realização dos ensaios foi controlar as vazões afluentes a cada filtro. A distribuição da água entre os três filtros era controlada

por meio de abertura e fechamento de registro de esfera existente na entrada de cada FRDA e aferida nos rotômetros de acrílico instalados nas tubulações de saída de cada unidade filtrante. No entanto, os ajustes nos registros ocasionavam uma divisão imprecisa da água entre os filtros, o que pode ter sobrecarregado ou subutilizado algum filtro. Além disso, a soma das vazões instantâneas de cada filtro por vezes não era compatível com a vazão de água bruta, aferida na tubulação de saída do reservatório de água bruta. De modo que houve também imprecisão quanto as taxas de filtração que foram de fato proporcionadas em campo, quando comparadas às taxas de filtração do planejamento.

Outra dificuldade percebida em campo foi a possível ocorrência de caminhos preferenciais nas paredes dos filtros durante a carreira de filtração. Na ocasião da troca do material filtrante foi possível perceber a ausência de rugosidade nas paredes das unidades filtrantes. Para minimizar esse efeito Duarte (2011) sugere fixar na superfície interna dos filtros uma camada de areia com grãos entre 0,60 e 1,00 mm sobre a resina fresca, conferindo rugosidade equivalente à superfície de concreto sem acabamento.

Considerando os valores da água bruta para cada ensaio, a Figura 21 apresenta os percentuais de remoção para cada unidade filtrante.

Figura 21 – Percentual de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e ABS₂₅₄ para cada FRDA em leito simples de areia



Fonte: Autoria própria (2019).

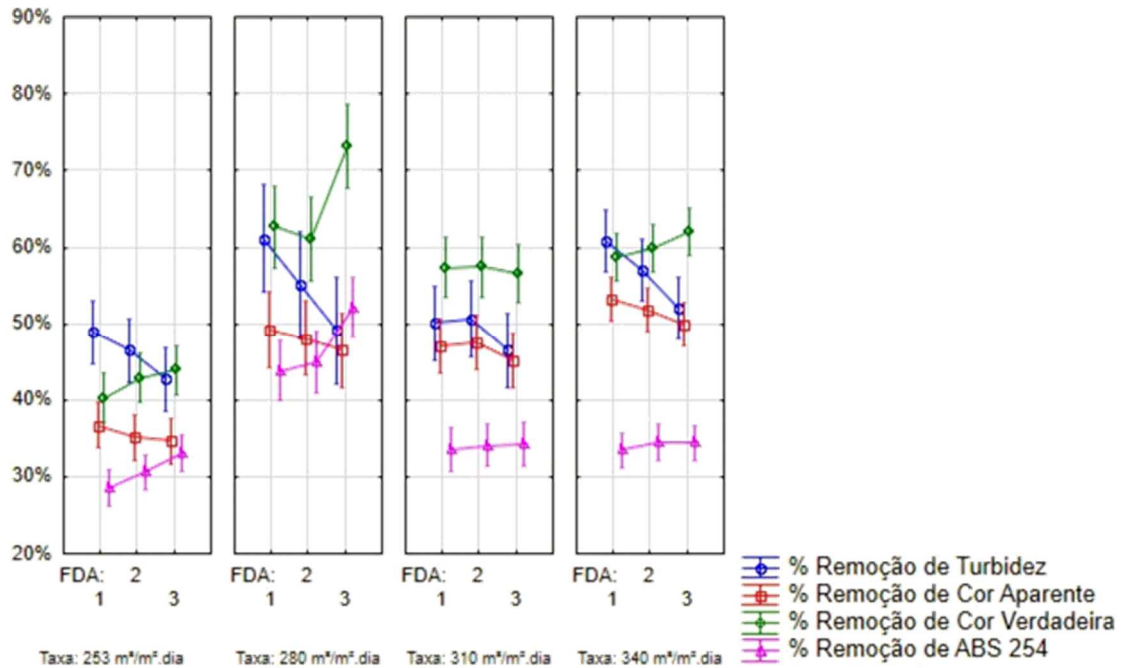
Os resultados apresentados na Figura 21 apontam o FRDA 1, $D_{10} = 0,50$ mm, como o melhor desempenho para a remoção das variáveis turbidez e cor aparente, considerando as variações da água bruta afluente. Nas Figuras 17 e 18 o FRDA 1 também apresentou os melhores valores remanescentes para estas variáveis. No entanto, nos ensaios em campo esse filtro apresentou carreiras de filtração demasiadamente curtas, extravasando em todas as taxas de filtração estudadas, sendo necessária a lavagem em média a cada 4 horas.

Devido aos resultados insatisfatórios da qualidade da água tratada para a variável turbidez, estando os valores remanescentes sempre acima do valor máximo permitido pela legislação, o final das carreiras de filtração foi determinado pelo alcance da perda de carga permissível pela hidráulica do filtro. Quando adotadas as maiores taxas de filtração, 310 e 340 $m^3/m^2.dia$, o FRDA 1 chegou a atingir a perda de carga máxima disponível duas vezes em um mesmo ensaio, sendo necessária duas lavagens em um período de 8 horas. De modo que, em escala real, o uso desta granulometria seria uma alternativa inviável operacionalmente. Em paralelo, durante as 8 horas de duração dos ensaios, os FRDA 2 e 3 não atingiram a perda de carga máxima disponível, não ocorrendo a lavagem destes durante os ensaios.

Logo, considerando a equivalência estatística apontada nas análises de variância ANOVA para a remoção das variáveis cor aparente e turbidez entre o FRDA 1 e 2, conforme apresentado na Figura 21 e por apresentar uma maior carreira de filtração, pode-se considerar a granulometria adotada no FRDA 2 como a melhor alternativa para o tratamento por filtração direta descendente quando adotado leito simples de areia.

A Figura 22 apresenta um resumo dos resultados obtidos na pesquisa, relacionando as granulometrias às taxas de filtração estudadas. Nota-se que o pior resultado obtido foi para a taxa de filtração de 253 $m^3/m^2.dia$ adotando o FRDA 3 e o resultado considerado mais exequível para aplicação em escala real foi a taxa de filtração de 340 $m^3/m^2.dia$ adotando o FRDA 2.

Figura 22 – Percentual de remoção relacionando os FRDA e as taxas de filtração aplicadas em leito simples de areia



Fonte: Autoria própria (2019).

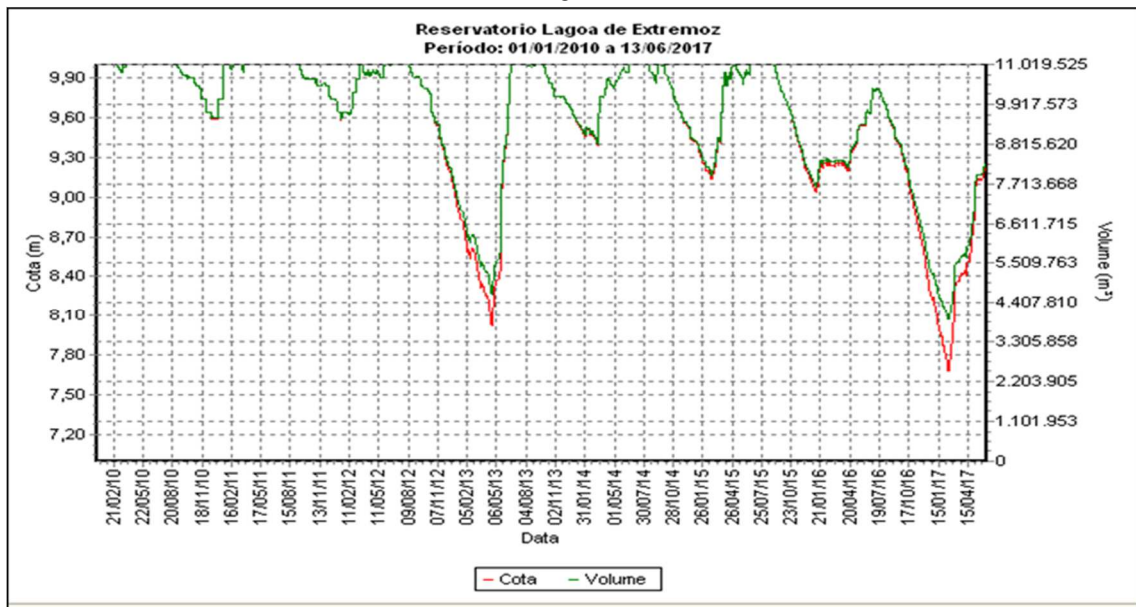
Salienta-se que os filtros e taxas de filtração foram comparados e avaliados entre si, no entanto os resultados apresentados não estão em conformidade com o estabelecido pela Portaria da Consolidação nº 5/2017, que determina as condições de potabilidade da água (BRASIL, 2017).

Uma das possibilidades para os resultados insatisfatórios obtidos com a primeira fase da pesquisa, seria as mudanças que ocorreram nas características do manancial quando comprados o período de junho a agosto de 2016, analisado por Freitas (2017) e que definiu as condições de pré-oxidação e coagulação adotadas na IPDF, e o período em que foram realizados os ensaios da primeira fase dessa pesquisa, de março a julho de 2017. A autora obteve no período analisado cor aparente na faixa de 19 - 24 uH e turbidez de 1,30 – 2,40 uNT, enquanto nessa pesquisa os valores encontrados foram para cor aparente na faixa de 22 - 35 uH e turbidez de 2,20 – 6,37 uNT.

O relatório de monitoramento da lagoa de Extremoz, fornecido pela Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos, mostra que de junho a agosto de 2016, período em que Freitas (2017) realizou o estudo de tratabilidade, o volume da lagoa de Extremoz variou entre 84 e 94% de sua capacidade. Enquanto que de março a julho de 2017, meses em que ocorreram os ensaios na IPDF, o volume da lagoa de

Extremoz variou de 40 a 100%, o que causou um elevado estresse hídrico e instabilidade nas características da lagoa. O rebaixamento da lagoa para esse período foi representativo de tal modo que de fevereiro a julho de 2017 foi implantado o sistema de rodízio de abastecimento entre os bairros da zona norte de Natal como medida preventiva de racionamento (Rio Grande do Norte, 2018c; Rio Grande do Norte, 2019). A Figura 23 apresenta o volume da lagoa de Extremoz de 2010 a 2017, demonstrando como a redução no volume do reservatório foi atípica. Nota-se que o ano de 2013 também foi marcado por uma significativa redução no volume do manancial e, comparando com a Figura 2, percebe-se que também ocorreram mudanças relevantes nas características da água natural.

Figura 23 – Variação no volume da lagoa de Extremoz – RN no período de 2010 a 2017



Fonte: Rio Grande do Norte (2018c).

Desse modo, corrobora-se a importância da realização de testes de jarros em bancada concomitantemente aos ensaios na IPDF e de forma periódica em operações de ETA, tendo em vista a necessidade de adaptar as dosagens de produtos químicos a serem utilizados de acordo com as variações da qualidade da água. Pois, até mesmo mananciais com características historicamente constantes, como a Lagoa de Extremoz, sofrem variações e necessitam de adequações.

4.2 FASE 2 – FILTRAÇÃO DIRETA EM LEITO DUPLO DE AREIA E CARVÃO ANTRACITO SEGUIDO DE ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO

4.2.1 Ensaios de bancada e caracterização da água bruta

Assim como abordado nos resultados da primeira fase, outros estudos desenvolvidos utilizando a água natural da lagoa de Extremoz em paralelo a esta pesquisa relataram oscilações nas suas características, especialmente para as variáveis cor aparente e turbidez (Duarte, 2018; Brito, 2018; Araújo, 2018; Brito; Duarte; Araújo, 2018). Sendo assim, optou-se por realizar uma sequência de ensaios de laboratório para definir novas condições de oxidação e coagulação a serem reproduzidas na segunda fase da pesquisa.

Os ensaios de tratabilidade em bancada de laboratório foram realizados no laboratório de toxicologia do IFRN com agitador jarreste. A primeira série de ensaios objetivou definir a melhor condição de pré-oxidação. Para esse ensaio a água foi apenas oxidada e posteriormente filtrada, não havendo coagulação. O tempo de contato foi fixado em 20 minutos, referente ao tempo de contato proporcionado nas CPOX da IPDF para a maior vazão a ser estudada (menor tempo de contato). Foi fixado gradiente de mistura de 250 s^{-1} . Nesse teste somente a dosagem do oxidante foi adotada como parâmetro de variação.

Os ensaios foram realizados em duplicata e os valores médios encontrados estão descritos na Tabela 13. A dosagem que apresentou melhor resultado para a pré-oxidação, considerando o parâmetro cor aparente como determinante, foi $7,0\text{ mg/L}$. Destaca-se que na ocasião dos ensaios de bancada para definir a condição de pré-oxidação, a cor aparente média da água bruta era de 43 uH , 59% acima da cor aparente média apresentada nos ensaios da primeira fase desta pesquisa.

Tabela 13 – Ensaio de pré-oxidação em jarreste sem coagulação

Água bruta				Mistura lenta		Filtração
pH	Turb (uNT)	CA (uH)	T (°C)	TC (min)	GML (s ⁻¹)	Meio filtrante
7,6	1,50	43	27	20	250	D ₁₀ = 0,37

Jarro	Dosagem Ca(ClO) ₂ (mg/L)	Água Remanescente		Remoção (%)	
		CA(uH)	Turb (uNT)	CA	Turb
1	3	20	0,88	53%	41%
2	5	17	0,80	60%	47%
3	7	15	0,97	65%	35%
4	8	19	1,05	56%	30%
5	9	19	0,91	56%	39%
6	10	19	1,15	56%	23%

Legenda: pH = potencial hidrogenionico; Turb. = turbidez; CA = cor aparente; T= temperatura; TC = tempo de contato; GML = gradiente de mistura lenta; D₁₀ = diâmetro efetivo do grão.

Fonte: Autoria própria (2019).

A segunda série de ensaios objetivou definir a melhor condição de coagulação. Para esse ensaio a água foi inicialmente oxidada com Ca(ClO)₂ ao tempo de contato fixado em 20 minutos, gradiente de mistura de 250 s⁻¹ e dosagem de 7,0 mg/L, condições definidas no ensaio anterior. Posteriormente foi realizada a coagulação com HCA 23, onde somente a dosagem do coagulante foi adotada como parâmetro de variação. O gradiente de mistura foi fixado em 1000 s⁻¹ e o tempo de mistura de 22s, equivalente ao tempo de mistura rápida proporcionado na IPDF para a maior vazão a ser estudada (menor tempo de contato). As dosagens testadas variaram entre 1 e 6 mg/L. Não foi realizada a correção do pH tendo em vista a qualidade da água natural da lagoa de Extremoz apresentar-se adequada para ocorrer o processo de coagulação. Os ensaios foram realizados em duplicata e os valores médios encontrados estão descritos na Tabela 14.

A dosagem que apresentou melhor resultado para a coagulação foi 1,0 mg/L. A turbidez remanescente obtida, mesmo com o uso do coagulante, encontra-se fora do recomendado pelo Ministério da Saúde, no entanto a granulometria dos filtros acoplados ao agitador jarrest não é a mesma utilizada na IPDF, de modo que o ensaio em jarros foi considerado apenas norteador quanto as melhores dosagens a serem utilizadas na IPDF.

Tabela 14 – Ensaio de coagulação em jarreste com água pré-oxidada

Água bruta				Mistura rápida		Filtração
pH	Turb (uNT)	CA (uH)	T (°C)	TC (s)	GMR (s ⁻¹)	Meio filtrante
7,5	1,50	37	26	22	1.000	D ₁₀ = 0,37

Jarro	Dosagem HCA 23 (mg/L)	Água Remanescente		Remoção (%)	
		CA (uH)	Turb (uNT)	CA	Turb
1	1	15	1,06	65%	29%
2	2	17	1,06	60%	29%
3	3	19	1,06	56%	29%
4	4	13	1,13	70%	25%
5	5	18	1,07	58%	29%
6	6	16	1,17	63%	22%

Legenda: pH = potencial hidrogenionico; Turb. = turbidez; CA = cor aparente; T= temperatura; TC = tempo de contato; GMR = gradiente de mistura rápida; D₁₀ = diâmetro efetivo do grão.
Fonte: Autoria própria (2019).

Os testes de jarros necessitaram de respostas imediatas para a continuidade das demais fases. Por isso não foram realizadas as análises de cor verdadeira e ABS₂₅₄, que necessitam filtrar a amostra em membrana antes da realização da leitura. As condições fixadas nos ensaios de laboratório foram reproduzidas na IPDF, dando andamento a segunda fase da pesquisa.

A Tabela 15 apresenta as características da água bruta para o período da realização dos experimentos na IPDF, contendo os valores máximos, médio, mínimo e o desvio padrão obtido. Pode-se perceber uma significativa mudança dos valores médios quando comparados aos ensaios de bancada, mesmo a realização dos ensaios na IPDF ocorrendo em sequência aos ensaios de laboratório.

Tabela 15 – Características da água bruta nos meses de setembro e outubro de 2018

Variável	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio Padrão
Temperatura (°C)	24	26	29	0,7
pH	6,12	7,58	8,34	0,5
Turbidez (uNT)	1,07	1,51	2,71	0,7
Cor aparente (uH)	16	18	21	2,0
Cor verdadeira (uH)	11	16	23	4,0
ABS ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0,18	0,19	0,20	0,1

Legenda: ABS₂₅₄ = absorvância UV 254 mm.
Fonte: Autoria própria (2019).

Já no primeiro ensaio da segunda fase da pesquisa realizado na IPDF, foi observado as mudanças na qualidade da cor da água bruta em relação ao estudado nos ensaios de bancada, a água apresentou cor aparente de 21(uH) e turbidez de 2,63 (uNT). Nesse ensaio foram adotadas as condições definidas no ensaio de laboratório para dosagem de 7,0 mg/L e 1,0 mg/L, para pré-oxidante e coagulante, respectivamente. No entanto, foi feito acompanhamento do cloro residual após a pré-oxidação, que apresentou valores na faixa de 3 mg/L durante as 8 horas de ensaio. Desse modo, optou-se por nos ensaios seguintes reduzir a dosagem do pré-oxidante para 5,0 mg/L e manter a dosagem do coagulante em 1,0 mg/L.

4.2.2 Avaliação da taxa de filtração e granulometria do meio filtrante utilizando leito duplo de areia e carvão antracito

Nos meses de setembro e outubro de 2018 foram realizados os ensaios da segunda fase da pesquisa, adotando leito duplo de areia e carvão antracito nos FRDA seguido de adsorção em carvão ativado nos FCAG. Foram realizados dois ensaios para cada taxa de filtração, totalizando 8 ensaios com 8 horas de duração. Em cada ensaio da IPDF os três FRDA e os três FCAG foram operados, cada um com uma granulometria, conforme especificado no item 3.3.2.

A Tabela 16 apresenta o resumo estatístico dos valores médios remanescentes das variáveis de controle para os FRDA. Os resultados para adsorção em carvão ativado granulado serão apresentados no item 4.2.3.

Conforme o resumo estatístico, diferentemente dos resultados apresentados para água tratada em leito simples de areia, quando adotado leito duplo de areia e carvão antracito, todas as taxas de filtração e granulometrias filtrantes estudadas proporcionaram resultados satisfatórios e em conformidade com o estabelecido pela Portaria da Consolidação nº 5/2017, que determina o padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2017).

As Figuras 24 e 25, apresentam os valores médios remanescentes para turbidez e cor aparente, respectivamente, considerando as taxas de filtração analisadas na segunda fase da pesquisa. Pode-se perceber que todos os valores médios para turbidez se encontram abaixo de 0,50 uNT e para cor aparente abaixo de 15 uH.

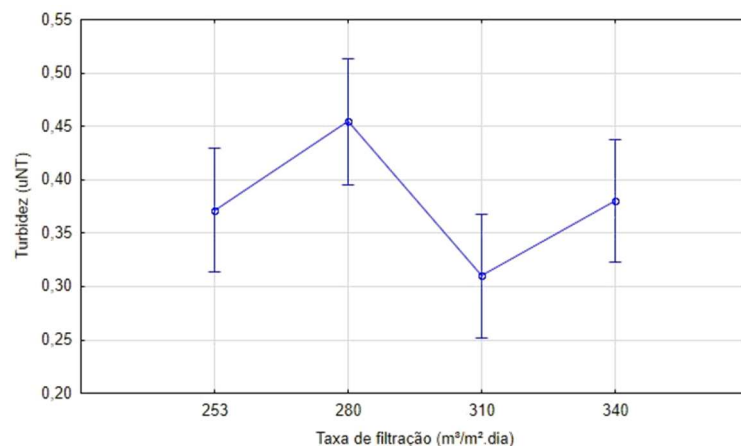
Tabela 16 – Resumo estatístico dos ensaios adotando leito duplo de areia e carvão antracito

TXT (m ³ /m ² .dia)	FRDA	MEDIA/DP	T (°C)	pH	Turb (uNT)	CorA (uH)	CorV (uH)	ABS ₂₅₄ (cm ⁻¹)
253	1	MEDIA	26	7,11	0,34	8	9	0,15
		DP	0,9	0,6	0,2	0,9	1,0	0,0
	2	MEDIA	26	7,13	0,36	8	8	0,15
		DP	0,9	0,6	0,2	0,5	1,1	0,0
	3	MEDIA	26	7,15	0,42	8	8	0,15
		DP	0,9	0,6	0,2	0,9	1,1	0,0
280	1	MEDIA	25	7,6	0,47	9	9	0,15
		DP	0,4	0,6	0,3	1,0	1,3	0,0
	2	MEDIA	26	7,77	0,47	9	9	0,16
		DP	0,5	0,4	0,3	0,4	1,2	0,0
	3	MEDIA	26	7,8	0,42	9	10	0,16
		DP	0,5	0,3	0,2	0,4	1,2	0,0
310	1	MEDIA	26	7,67	0,29	9	9	0,15
		DP	0,6	0,4	0,2	0,6	0,9	0,0
	2	MEDIA	26	7,71	0,29	9	8	0,15
		DP	1,0	0,3	0,2	0,5	0,8	0,0
	3	MEDIA	26	7,74	0,35	9	8	0,15
		DP	0,6	0,3	0,2	0,6	1,0	0,0
340	1	MEDIA	26	7,71	0,38	9	9	0,15
		DP	0,6	0,4	0,2	0,4	1,1	0,0
	2	MEDIA	26	7,57	0,36	9	8	0,15
		DP	0,6	0,8	0,1	0,5	1,1	0,0
	3	MEDIA	26	7,8	0,4	9	9	0,15
		DP	0,5	0,3	0,2	0,6	1,0	0,0

Legenda: TXT = taxa de filtração; FRDA = filtro rápido descendente de areia; DP= desvio padrão; Temp.= temperatura; pH = potencial hidrogenionico; Turb. = turbidez; Cor A = cor aparente; Cor V= cor verdadeira; ABS₂₅₄ = absorvância UV 254 mm.

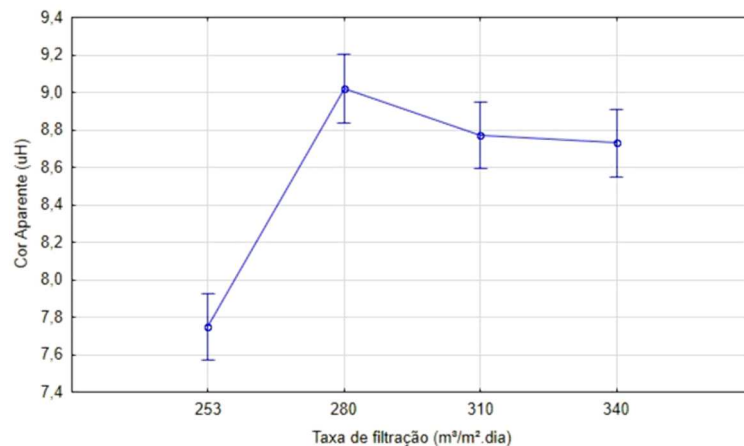
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 24 – Turbidez remanescente para cada taxa de filtração em leito duplo de areia e antracito



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 25 – Cor aparente remanescente para cada taxa de filtração em leito duplo de areia e antracito



Fonte: Autoria própria (2019).

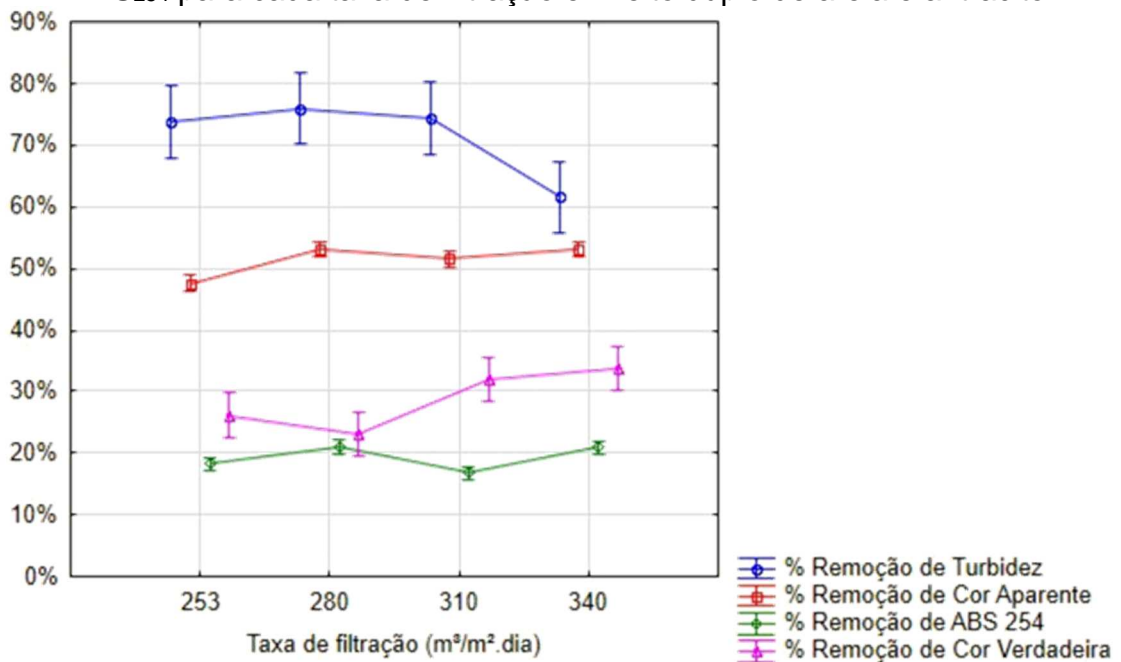
Adotando o leito filtrante duplo de areia e antracito, a taxa de filtração de 253 m³/m².dia, que anteriormente apresentou resultados inferiores às demais na remoção de turbidez, demonstrou aumento na qualidade, apresentando assim como as taxas de 310 e 340 m³/m².dia os melhores resultados de turbidez remanescente. Para a cor aparente, a taxa demonstrou diferença estatística considerável, apresentando valores remanescentes abaixo de 8 uH, sendo a melhor condição de tratamento para a variável.

A taxa de 253 m³/m².dia foi a primeira taxa examinada nos ensaios da segunda fase, sendo neste ensaio utilizada a dosagem de 7 mg/L de Ca(ClO)₂ para pré-oxidação. Foi feito acompanhamento em campo e após as câmaras de pré-oxidação a água apresentou cloro residual na faixa de 3 mg/L e após a filtração 0,1 mg/L. O tempo de contato do oxidante dentro do leito filtrante do FRDA pode ter contribuído para os valores baixos de cor remanescente apresentados neste ensaio, influenciando os valores médios apresentados pela taxa.

Com relação aos dados de cor verdadeira e ABS₂₅₄ foi observado na Tabela 16 inconsistências nos resultados. Quando comparados os valores remanescentes das variáveis aos valores apresentados na primeira fase da pesquisa ou quando comparados aos valores de cor aparente resultantes da segunda fase, percebe-se que a variável cor verdadeira apresentou valores remanescentes iguais ou superiores ao de cor aparente. Tal incoerência ocorreu, possivelmente, devido à mudança no aparelho de medição das variáveis cor verdadeira e ABS₂₅₄ ocorrida na segunda fase da pesquisa. Nesse sentido, é razoável que a comparação entre os resultados destas

variáveis para a segunda fase da pesquisa ocorra apenas considerando os percentuais de remoção. Porém, ainda assim os valores não estão coerentes com os percentuais de remoção da primeira fase, podendo comprometer a análise. A Figura 26 apresenta o percentual de remoção das variáveis analisadas para as quatro taxas de filtração estudadas.

Figura 26 – Percentual de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e ABS₂₅₄ para cada taxa de filtração em leito duplo de areia e antracito

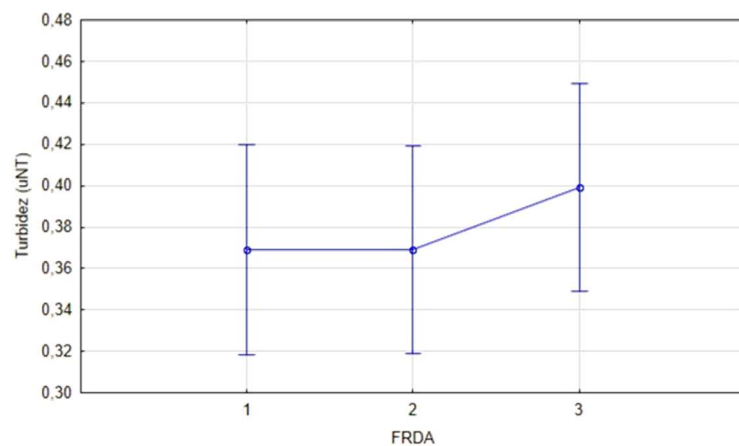


Fonte: Autoria própria (2019).

Pode-se perceber que com o aumento da taxa de filtração de 310 m³/m².dia para 340 m³/m².dia ocorreu diminuição na eficiência para a remoção de turbidez, mas eficiência superior ou estatisticamente equivalente para as demais variáveis. Considerando que a taxa de 340 m³/m².dia, maior entre as taxas estudadas, apresentou todos os resultados de acordo com o limitado para abastecimento pela Portaria da Consolidação N°5/2017 (Brasil,2017), e que o uso desta taxa, quando reproduzida a condição em ETA de escala real, permite adotar maiores unidades filtrantes, e nesse caso, sem comprometer a qualidade da água tratada, a taxa foi considerada como a melhor alternativa para o tratamento por filtração direta descendente quando adotado leito duplo de areia e carvão antracito, para as granulometrias especificadas no item 3.3.3.

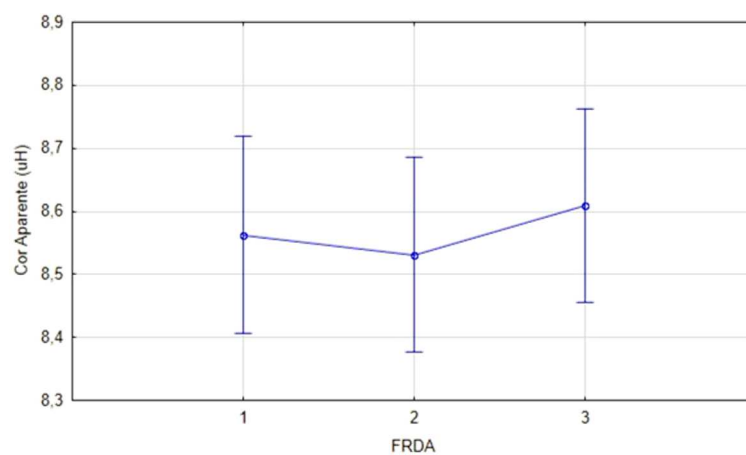
Com relação às granulometrias estudadas, em cada ensaio foram operados os três filtros da IPDF, todos com camada filtrante de 700 mm de areia, sendo para o FRDA 1: $D_{10} = 0,50$ mm, FRDA 2: $D_{10} = 0,57$ mm e FRDA 3: $D_{10} = 0,87$ mm. As Figuras 27 e 28, apresentam os valores médios remanescentes para turbidez e cor aparente, respectivamente, considerando as três granulometrias analisadas na pesquisa e a Figura 29 apresenta os percentuais de remoção para cada variável estudada após o tratamento em leito duplo.

Figura 27 – Turbidez remanescente para cada FRDA em leito duplo de areia e antracito



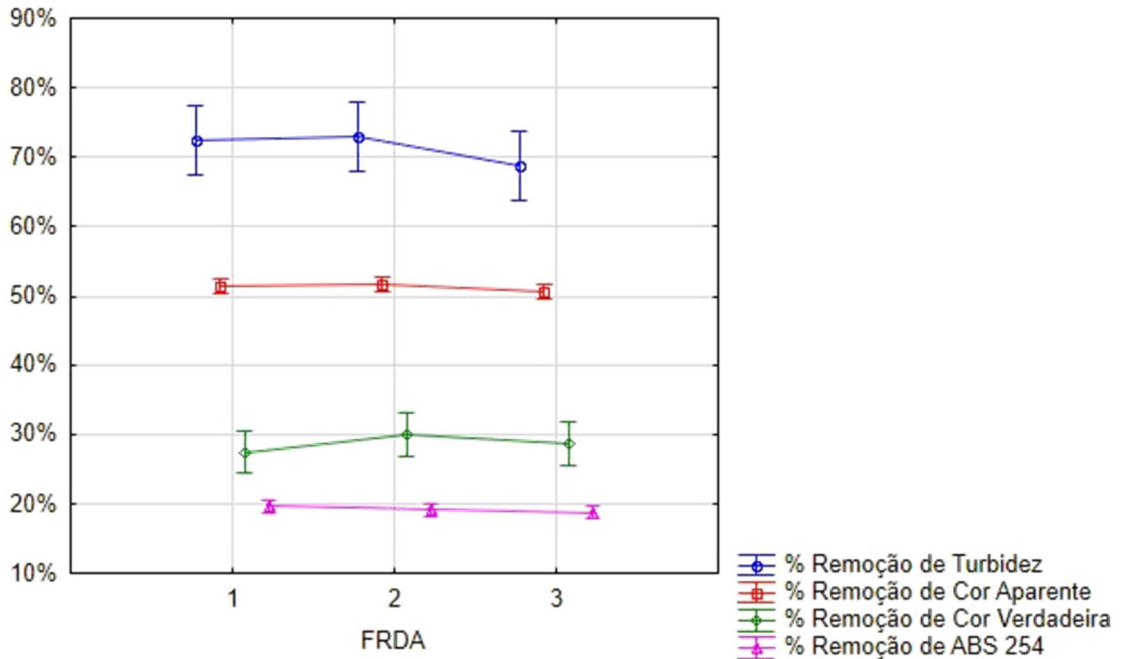
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 28 – Cor aparente remanescente para cada FRDA em leito duplo de areia e antracito



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 29 – Percentual de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e ABS₂₅₄ para cada FRDA em leito duplo de areia e antracito



Fonte: Autoria própria (2019).

Com o uso do leito duplo de areia e carvão antracito, todos os FRDA demonstraram equivalência estatística, tanto para os valores remanescentes das variáveis quanto para o percentual de remoção ($p > 0,05$). O uso do leito duplo proporcionou resultados para as taxas e granulometrias estudadas dentro do estabelecido pelo Ministério da saúde para o tratamento de água para consumo humano, viabilizando o uso de filtros com estas características em ETA de escala real.

Comparando os resultados com os demonstrados em leito simples de areia, para remoção de turbidez, por exemplo, o melhor filtro havia apresentado 55% de remoção, enquanto com o uso do leito duplo de areia e antracito, todos os FRDA apresentaram remoção acima de 70%. Evidenciando assim que todos os filtros foram mais eficientes com o leito duplo de areia e carvão antracito em relação ao leito simples de areia.

Destacou-se na segunda fase da pesquisa os resultados apresentados pelo FRDA 3, o qual na primeira fase exibiu resultados diferentes estatisticamente dos FRDA 1 e 2, sendo os piores resultados de turbidez e cor aparente remanescente bem como os piores percentuais de remoção destas variáveis. Com a substituição de parte do material filtrante por carvão antracito, o filtro aumentou cerca de 30% sua eficiência para a remoção de turbidez e 15% para remoção de cor aparente.

Com relação à espessura da camada filtrante discutida anteriormente, à qual Kawamura (2000) propõe que a relação L/D_{10} , seja igual ou superior a 1000, foi observado que com a camada de antracito as camadas filtrantes aproximaram-se do recomendado. Os FRDA1, FRDA2 e FRDA3, apresentam L/D_{10} iguais a 1.150, 1.039 e 892, respectivamente, o que pode ter contribuído para que a filtração ocorresse em todo meio granular, não apenas por ação superficial, refletindo nos resultados satisfatórios apresentados para a fase.

Durante a realização da segunda fase foi observado ainda que o FRDA 1 não atingiu a perda de carga máxima disponível para o filtro em nenhum dos ensaios, não sendo necessário interrompê-lo para lavagem durante os ensaios, demonstrando assim um ganho na carreira de filtração do filtro. Contudo, foi observado que no primeiro ensaio, realizado logo após a troca do material filtrante, o FRDA 1 criou bolhas de ar de difícil remoção, perdendo toda a camada de antracito durante os ajustes e ficando paralisado por cerca de duas horas para reposição do material filtrante e adequações. Richter (2009) aponta que a ocorrência de bolhas de ar é comumente observada após trocas de material filtrante e recomenda, para evitá-la, que o material seja sempre depositado com o filtro cheio de água.

Além das dificuldades apontadas na primeira fase da pesquisa, com relação à distribuição da vazão entre os FRDA e a formação de caminhos preferenciais nas paredes de PRFV, a maior dificuldade operacional observada na segunda fase da pesquisa foi relacionada a expansão do material filtrante na lavagem. Ocorreu perda do antracito e dos grãos mais finos de areia em vários ensaios e foi observado que a altura entre a saída de água de lavagem e o topo do meio filtrante era insuficiente para que ocorresse a fluidificação adequada do meio filtrante.

As velocidades de lavagem dos FRDA necessitaram ser reduzidas devido à altura da saída de água de lavagem, de modo que em observações na prática, após várias experiências, foi limitado as velocidades de 0,55 m/min, 0,74 m/min e 0,85 m/min, para os FRDA 1, 2 e 3, respectivamente, com o objetivo de evitar a perda de material filtrante.

No entanto, as velocidades adotadas na prática encontram-se significativamente abaixo das velocidades mínimas de fluidificação necessárias para cada granulometria, sendo a velocidade de fluidificação (V_f) dos FRDA 1, 2 e 3 com leito duplo de areia e antracito, respectivamente, 0,76 m/min, 0,88 m/min e 1,39 m/min. As velocidades adotadas em campo foram 38%, 19% e 63% abaixo dos valores mínimos

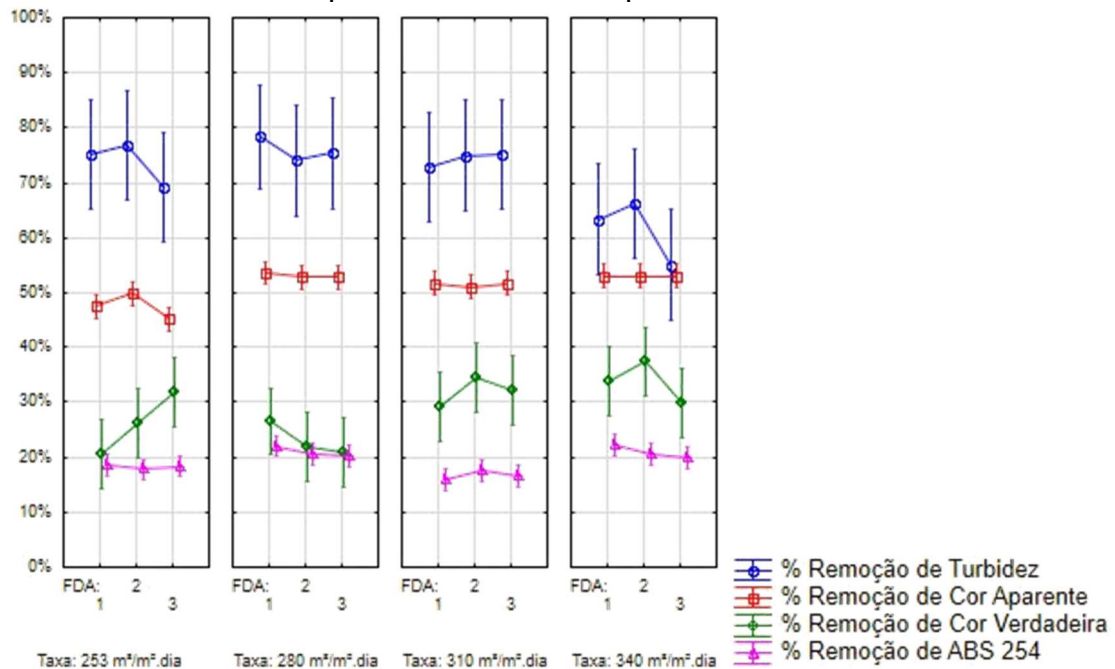
recomendados para os filtros 1, 2 e 3. Neste sentido, essa pesquisa sugere que a tubulação de saída de água de lavagem tenha a distância mínima de 50 cm entre o topo do meio filtrante, em substituição a atual distância de 30 cm.

A deficiência na lavagem pode no decorrer da carreira de filtração ser refletida na qualidade da água tratada, tendo em vista que quando os filtros não são lavados adequadamente, permanece aderida uma película de flocos ou impurezas nos grãos do material filtrante, aumentando a perda de carga e posteriormente formando fendas ou bolsas de lama comuns em ETA (Richter; Azevedo Netto; 2013). Desse modo, é imprescindível que para as pesquisas futuras seja realizado ajustes na IPDF, aumentando a altura entre o topo do meio filtrante e a saída de água de lavagem, permitindo que a lavagem ocorra com as velocidades mínimas calculadas.

Além disso, para ser possível na lavagem uma mistura parcial entre os maiores grãos de antracito e os menores de areia e garantir a expansão mínima dos maiores grãos de ambos os materiais, Richter (2009) recomenda que o D_{90} do antracito seja entre 3,0 e 3,5 vezes o D_{10} da areia, e que a V_f do antracito seja entre 1,1 e 1,2 a V_f areia. Para as granulometrias estudadas apenas o FRDA 1 atendeu as duas relações, sendo o D_{90} do antracito apenas 1,95 vezes o D_{10} da areia do FRDA 3 e a V_f da areia dos FRDA 2 e 3 maiores que a V_f do antracito.

Apesar das dificuldades na operação, todos os resultados médios remanescentes das variáveis estudadas atenderam aos padrões de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde, destacando-se nessa fase a equivalência estatística entre os resultados dos FRDA e as taxas de filtração avaliadas. Logo, visando menor custo na implantação em ETA de escala real, o FRDA 3 e a taxa de filtração de $340 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ podem ser consideradas as melhores alternativas para reprodução, sem comprometer a qualidade da água tratada. A Figura 30 apresenta um resumo dos resultados apresentados considerando os percentuais de remoção das variáveis turbidez, cor aparente, cor verdadeira e ABS ²⁵⁴.

Figura 30 – Percentual de remoção relacionando os FRDA e as taxas de filtração aplicadas em leito simples de areia



Fonte: Autoria própria (2019).

4.2.3 Avaliação da adsorção em carvão ativado granulado após filtração em leito duplo de areia e carvão antracito

Na segunda fase da pesquisa, após os FRDA com leito duplo de areia e antracito, a água filtrada foi reunida em tubulação e posteriormente distribuída entre os três FCAG. A Tabela 17 apresenta o resumo estatístico dos valores médios remanescentes das variáveis de controle estudadas após a adsorção em carvão ativado granular.

Ao analisar a Tabela 17, observa-se que quando adotada a adsorção após o leito duplo de areia e carvão antracito, ocorreram valores médios para turbidez acima do valor máximo permitido pela Portaria da Consolidação nº 5/2017, enquanto para a variável cor aparente, todos os resultados encontram-se dentro do recomendado (BRASIL, 2017). Nas Figuras 31 e 32, pode-se observar os valores médios remanescentes para turbidez e cor aparente, respectivamente, considerando as taxas de filtração analisadas na segunda fase da pesquisa. E as Figuras 33 e 34 apresentam os valores remanescentes de acordo com as granulometrias filtrantes estudada.

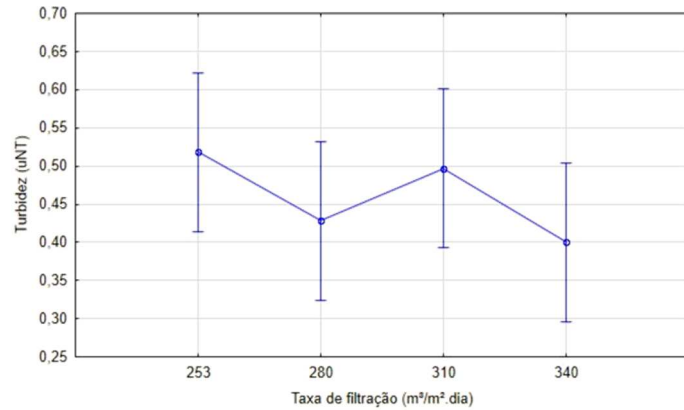
Tabela 17 – Resumo estatístico dos ensaios adotando leito duplo de areia e carvão antracito seguido de adsorção em carvão ativado granulado

TXT (m ³ /m ² .dia)	FRDA	MÉDIA/DP	T (°C)	pH	Turb (uNT)	CA (uH)	CV (uH)	ABS ₂₅₄ (cm ⁻¹)
253	1	MÉDIA	26	7,19	0,54	7	6	0,11
		DP	0,9	0,7	0,5	0,4	1,0	0,0
	2	MÉDIA	26	7,26	0,53	7	7	0,13
		DP	0,8	0,7	0,5	0,9	0,9	0,0
	3	MÉDIA	26	7,22	0,48	7	7	0,13
		DP	0,8	0,7	0,4	0,7	0,7	0,0
280	1	MÉDIA	25	8,09	0,36	7	8	0,09
		DP	0,5	0,3	0,3	0,8	1,1	0,0
	2	MÉDIA	25	8,21	0,38	8	9	0,11
		DP	0,5	0,3	0,3	1,1	1,2	0,0
	3	MÉDIA	24	8,18	0,55	8	8	0,13
		DP	5,8	0,3	0,3	0,9	1,2	0,0
310	1	MÉDIA	26	7,86	0,37	7	6	0,11
		DP	0,5	0,3	0,5	0,8	1,6	0,0
	2	MÉDIA	26	7,73	0,54	8	7	0,13
		DP	0,8	0,9	0,4	0,4	0,9	0,0
	3	MÉDIA	26	7,91	0,58	8	7	0,14
		DP	0,5	0,2	0,6	0,9	1,0	0,0
340	1	MÉDIA	26	7,96	0,39	7	7	0,11
		DP	0,5	0,2	0,2	0,7	1,2	0,0
	2	MÉDIA	26	7,98	0,43	8	8	0,14
		DP	0,5	0,2	0,2	0,5	0,7	0,0
	3	MÉDIA	26	7,96	0,39	9	8	0,14
		DP	0,6	0,2	0,1	0,5	0,7	0,0

Legenda: TXT = taxa de filtração; FRDA = filtro rápido descendente de areia; DP= desvio padrão; Temp.= temperatura; pH = potencial hidrogenionico; Turb. = turbidez; Cor A = cor aparente; Cor V= cor verdadeira; ABS₂₅₄ = absorbância UV 254 mm.

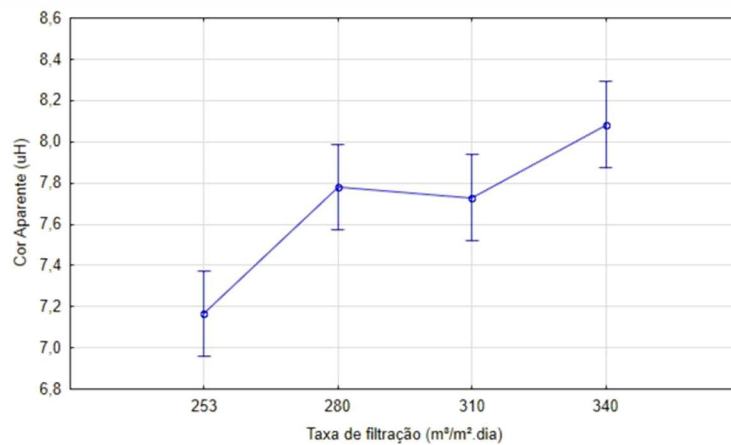
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 31 – Turbidez remanescente para cada taxa de filtração em leito duplo de areia e antracito seguido de adsorção em carvão ativado granulado



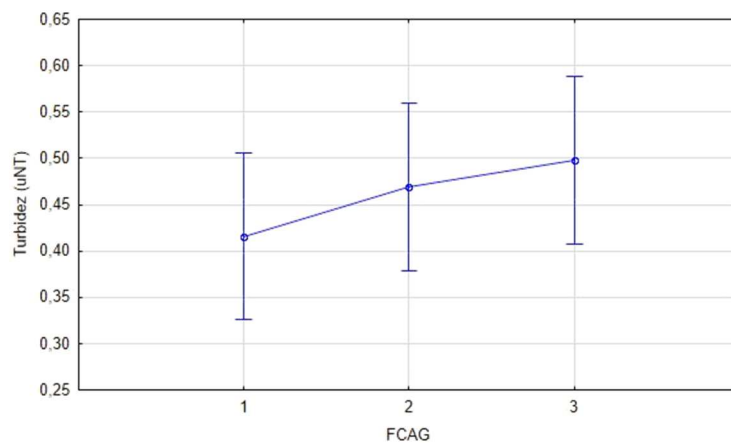
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 32 – Cor aparente remanescente para cada taxa de filtração em leito duplo de areia e antracito seguido de adsorção em carvão ativado granulado



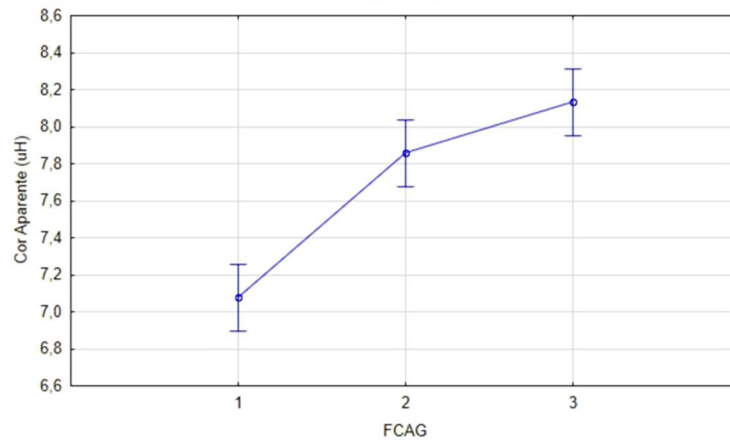
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 33 – Turbidez remanescente para cada FCAG após leito duplo de areia e antracito



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 34 – Cor aparente remanescente para cada FCAG após leito duplo de areia e antracito



Fonte: Autoria própria (2019).

Os resultados mostram que a taxa de $253 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ produziu turbidez média acima de $0,5 \text{ uNT}$, sendo a pior taxa de filtração para o meio filtrante. Enquanto as demais taxas de filtração apresentaram resultados médios igual ou abaixo de $0,5 \text{ uNT}$, sendo a taxa de $340 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ o melhor resultado para a variável.

Em contrapartida, para a cor aparente, quanto menor a taxa de filtração, ou a vazão de tratamento, melhores foram os resultados. Logo pode-se perceber a relação entre o tempo de contato da adsorção com a qualidade da água tratada para a variável cor. (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017) recomendam que o tempo de contato para a adsorção em carvão ativado granulado seja entre 5-60 minutos. Nesta pesquisa, o tempo de contato de planejamento foi de 3-4 minutos. Ainda assim, todas as taxas de filtração estudadas produziram resultados dentro do estabelecido pela Portaria da Consolidação N^o5/2017 para a variável cor aparente (Brasil, 2017).

Quando comparado o comportamento da turbidez e da cor aparente entre os FCAG, pode-se perceber que o FCAG 1 para ambas as situações obteve o melhor desempenho. No entanto devido a perda de carga da granulometria, foi necessário redistribuir a vazão de tratamento entre os FCAG de forma a evitar o constante transbordamento do FCAG 1. Para isso o FCAG 1 operou constantemente com cerca de 30% abaixo da vazão de planejamento, aumentando o tempo de contato da adsorção, enquanto os demais FCAG foram sobrecarregados, o que pode ter refletido nos resultados que apontaram o filtro como melhor desempenho.

Foi observado a operação na IPDF que durante a realização das coletas horárias em torneira instalada na saída dos FCAG, ocorreu frequentemente transpasse de

grãos de carvão ativado para os frascos de coleta, podendo ter ocasionado o aumento da turbidez, quando realizadas as análises das amostras.

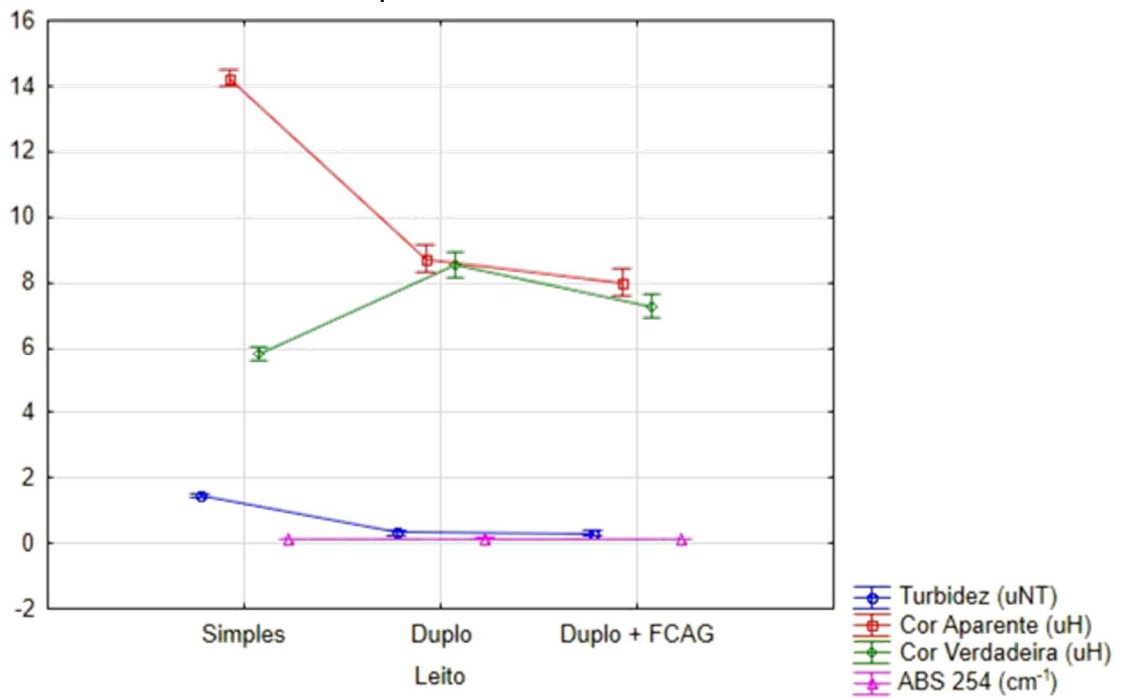
Uma dificuldade operacional foi a realização da lavagem dos FCAG. Logo no primeiro ensaio não foi possível adotar uma velocidade que expandisse o carvão, devido a ocorrência de grãos finos na superfície do material filtrante. Desse modo, optou-se por não realizar a lavagem dos FCAG antes da realização dos ensaios. Possivelmente o uso de CD elevados (FCAG 1: CD = 2,22; FCAG 2: CD = 2,17; FCAG 3: CD = 1,94) tenha desencadeado essa situação.

De modo geral, o uso da adsorção em carvão ativado granulado após a filtração em leito duplo de areia e antracito não proporcionou melhorias suficientes na qualidade da água tratada, para as variáveis estudadas nesta pesquisa, que justifiquem o seu uso. No qual, para a variável cor aparente diminuiu apenas cerca de 1uH para cada taxa de filtração ou FCAG analisado, enquanto para turbidez, por vezes chegou a apresentar valores acima do proporcionado quando utilizado apenas o leito duplo de areia e carvão antracito.

No entanto, estudos recentes indicaram que a água da Lagoa de Extremoz possui uma forte potencialidade para a formação de trihalometanos e conseqüentemente de outros subprodutos da desinfecção. Logo, é importante a realização de ensaios na IPDF que foquem no uso de carvão ativado como controle de formação dos subprodutos da oxidação e desinfecção (OLIVEIRA,2017).

A Figura 35 apresenta um resumo dos resultados obtidos com a pesquisa, onde é possível notar a significativa melhora na qualidade da água quando adotado o leito duplo de areia e antracito, em relação ao leito simples de areia; bem como a equivalência na qualidade entre o uso do leito duplo e o leito duplo seguido de carvão ativado granulado.

Figura 35 – Valores remanescentes de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e ABS_{254} para cada leito filtrante estudado



Fonte: Autoria própria (2019).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos na IPDF permitem as seguintes conclusões/recomendações:

- a) As condições de pré-oxidação e coagulação devem ser ajustadas, periodicamente, acompanhando as variações da qualidade da água, por meio de testes de jarros em bancada;
- b) A elevação da taxa de filtração até 340 m³/m².dia não influenciou significativamente o desempenho dos filtros para os leitos filtrantes e granulometrias estudados, sendo esta a taxa de filtração escolhida como melhor alternativa para ser adotada em escala real por representar menores custos de implantação das unidades;
- c) A escolha do tipo do meio filtrante (simples/duplo/duplo seguido de adsorção) demonstrou ser o condicionante de projeto de maior importância na eficiência do processo de filtração;
- d) Para a filtração em leito simples de areia, em todas as granulometrias e taxas de filtração avaliadas, a turbidez obtida esteve acima do estabelecido pela Portaria da Consolidação n° 5/2017 (BRASIL, 2017);
- e) Para o leito simples de areia, devido a eficiência estatisticamente equivalente e maior área da unidade filtrante, o FRDA 2 foi considerado como melhor alternativa, no entanto, para o leito duplo de areia e antracito o FRDA 3 pode ser utilizado sem comprometer a qualidade da água tratada;
- f) O uso do carvão antracito possibilitou maior carreira de filtração para o filtro de menor granulometria e melhor eficiência para remoção de cor aparente e turbidez, para o filtro de maior granulometria;
- g) Necessita-se realizar ensaios de 24h para avaliar a duração da carreira de filtração e a evolução das perdas de carga laminares das granulometrias estudadas;
- h) O uso do carvão ativado granulado não influenciou significativamente na qualidade da água tratada para as variáveis estudadas na pesquisa. No entanto, é importante a realização de ensaios na IPDF que foquem no uso da adsorção como controle de formação dos subprodutos da oxidação e desinfecção.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods**: for the examination of water and wastewater. 22.ed. Washington: American Public Health Association, 2012.

ARAÚJO, Y. M. **Perdas de carga em filtros rápidos de fluxo ascendente e descendente**. Trabalho de conclusão de graduação – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1992. 18 p.

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

_____. **Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde**. Portaria de consolidação nº 5/2017. Brasília: MS, 2017.

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

BRITO, T. M.; DUARTE, M. A. C.; ARAUJO, A. L. C. **Caracterização quali quantitativa dos resíduos gerados em ETA de filtração direta em escala real**. In: Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 14, 2018. Anais ABES 2018.

CARDADOR, M. J.; SALGUEIRO, J. F.; GALLEGO, M. Simultaneous quantification of trihalomethanes and haloacetic acids in cheese by on-line static headspace gas chromatography-mass spectrometry. **Jornal of Chromatography A**, v.1408, 2015.

CIRNE, J. R. R. **Influência da granulometria e taxas de filtração no tratamento de água utilizando dupla filtração**. 2014. Dissertação de mestrado (Programa de pós-graduação em engenharia sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

COCENZA, G. A. S. **Estudo comparativo entre a aplicação do carvão ativado pulverizado e a filtração em carvão ativado granular para uma estação de tratamento de água de 100 L/s**. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

DANTAS, A. B. *et al.* Influência da pré-oxidação com cloro e dióxido de cloro de água e na formação de subprodutos. **Revista DAE**, v. 178, 2014.

DANTAS, A. B. *et al.* Remoção de cor, de ferro e de manganês em água com matéria orgânica dissolvida por meio da pré-oxidação, coagulação, filtração e adsorção em carvão ativado granular **Revista DAE**, v. 076, 2014a.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. 1. ed. São Carlos: Ldibe, 2008. 1 v.

_____.; DANTAS, A. B.; VOLTAN, P. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LdiBe, 2011.

_____.; _____.; _____.; **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 3 ed. São Carlos: LdiBe, 2017.

DUARTE, G. M. C. **Simulação em instalação piloto da adequação de ETA convencional para dupla filtração**. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2018.

DUARTE, M. A. C. **Utilização dos índices do estado trófico (IET) e de qualidade da água (IQA) na caracterização limnológica e sanitária das lagoas de Bonfim, Extremoz e Jiqui - RN**. 1999. Dissertação de mestrado (Programa de pós-graduação em engenharia civil) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

_____. **Tratamento de água para consumo humano de reservatório eutrofizado através de pré e interoxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração**. 2011. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

ENGESOFT. **Quantificação da oferta hídrica da lagoa de Extremoz**. Volume 1. Natal, 2004.

FAGUNDES, A. P.; **Remoção de oocistos de *Cryptosporidium* por filtração direta – Influência de alguns aspectos operacionais**. Dissertação de mestrado (Departamento de Engenharia Civil e ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

FERNANDES, N. M. G. *et al.* Influência do pH de coagulação e da dose de sulfato de alumínio na remoção de oocistos de *Cryptosporidium* por filtração direta descendente. **Engenharia sanitária e ambiental**, Rio de Janeiro, v. 15, 2010.

FREITAS, D. G. **Efeitos da recirculação de água de lavagem de filtros em um sistema de filtração direta em escala de bancada**. 2017. Dissertação de mestrado (Programa de pós-graduação em engenharia sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

KAWAMURA, S. **Preliminary studies**. In: Integrated design and operation of water treatment facilities. 2. ed. USA: John Wiley and Sons, 2000.

LEGAY, C. *et al.* Estimation of chlorination by-products presence in drinking water in epidemiological studies on adverse reproductive outcomes: A review. **Science of the Total Environment**, v. 408,2010.

LIMA, G. M. **Desenvolvimento de correlação da formação de ácidos haloacéticos em água contendo substância húmica oxidada com cloro.** 2014. 109f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Tecnologia Ambiental) – Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto, 2014.

MONDARDO, R. I. **Influência da pré-oxidação na tratabilidade das águas via filtração direta descendente em manancial com elevadas concentrações de microalgas e cianobactérias.** 2004. Dissertação de mestrado (Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NG, M. C. **Produção de água em ETA com alteração da carreira de filtração.** 2017. Dissertação de mestrado (Programa de pós-graduação em engenharia sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

OLIVEIRA, R. R. **Estudo do potencial de formação de trihalometanos na água da lagoa de Extremoz-RN.** 2017. Dissertação de mestrado (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor e turbidez elevada.** 2001. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PENITSKY, D. J. *Coagulation 101.* Em: Proceedings, Technology Transfer Conference, Universidade de Calgary, Alberta, Canadá, 2003.

PEREIRA, M. G. **Qualidade das águas dos mananciais de superfície utilizados no abastecimento da cidade do Natal: aplicação do IQA nos pontos de captação.** 1993. Dissertação de mestrado (Programa de pós-graduação em engenharia química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1993.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

_____.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

RIO GRANDE DO NORTE. Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte. **Dados da água bruta da lagoa de Extremoz (2008 a 2012).** Natal, 2017.

_____.; Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte. **Sistemas operacionais de abastecimento de água.** Natal, 2018.

_____.; Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte. **CAERN suspende rodízio de abastecimento na zona Norte da capital:** Governo do Estado do Rio Grande do Norte. Disponível em: <<http://www.caern.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=153720&ACT=&PAGE=&PARM=&LBL=Materia>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

_____.; Empresa de pesquisa agropecuária do Rio Grande do Norte. **Dados meteorológicos.** Disponível em: <<http://www.emparn.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=12411&ACT=&PAGE=0&PARM=&LBL=Meteorologia>>. Acesso em: 03 jun. 2018a.

_____.; Secretaria do meio ambiente e dos recursos hídricos. **Situação volumétrica de reservatórios do Rio Grande do Norte:** Governo do Estado do Rio Grande do Norte. Disponível em: <<http://sistemas.searh.rn.gov.br/MonitoramentoVolumetrico/>>. Acesso em: 03 jun. 2018b.

_____.; Secretaria do meio ambiente e dos recursos hídricos. **Relatório de monitoramento da lagoa de Extremoz:** Governo do Estado do Rio Grande do Norte. Natal, 2018c.

SABOGAL PAZ, L. P. **Modelo conceitual de seleção de tecnologia de tratamento de água para abastecimento de comunidade de pequeno porte.** 2007. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SANTOS, E. P. C. C. *et al.* Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. **Engenharia sanitária e ambiental**, Rio de Janeiro, v. 12, 2007.

VOLTAN, P. E. N. **Remoção de cor, de ferro e de manganês em água com matéria orgânica dissolvida por meio da pré-oxidação, coagulação, filtração e adsorção em carvão ativado granular.** Tese de doutorado (Escola de Engenharia de São Carlos) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

ANEXO A – Comprovante de submissão do artigo na Revista Águas Subterrâneas



The screenshot displays the submission page for article #29206 on the ABAS website. The page features a blue header with the ABAS logo and the journal title 'REVISTA ÁGUAS SUBTERRÂNEAS'. A green navigation bar shows the path: 'Capa > Usuário > Autor > Submissões > #29206 > Resumo'. A left sidebar contains navigation links: 'CAPA', 'SOBRE', 'PÁGINA DO USUÁRIO', 'PESQUISA', 'ATUAL', 'ANTERIORES', 'RESUMOS DE TESES', 'TUTORIAIS EM VÍDEO', 'ABAS', and 'AJUDA DO SISTEMA'. The main content area is titled '#29206 Sinopse' and includes tabs for 'RESUMO', 'AVALIAÇÃO', and 'EDIÇÃO'. The 'Submissão' section lists the authors as Julyenne Kerolainy Leite Lima and Marco Antonio Calazans Duarte, with the title 'AVALIAÇÃO DA FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE MANANCIAL COM BAIXA TURBIDEZ E COR ELEVADA'. It also shows the document original name, submission date (27 de agosto de 2018), and the current status 'Aguardando designação'. The 'Situação' section provides a timeline of the submission process. On the right, there are sections for 'IDIOMA', 'PATROCINADORES', 'ANUNCIE NAS REVISTAS', and 'USUÁRIO'.

Capa > Usuário > Autor > Submissões > #29206 > Resumo

#29206 Sinopse

RESUMO AVALIAÇÃO EDIÇÃO

Submissão

Autores: Julyenne Kerolainy Leite Lima, Marco Antonio Calazans Duarte
 Título: AVALIAÇÃO DA FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE MANANCIAL COM BAIXA TURBIDEZ E COR ELEVADA
 Documento original: 29206-107841-1-SM.DOCX 27-08-2018
 Docs. sup.: [INCLUIR DOCUMENTO SUPLEMENTAR](#)
 Submetido por: sra Julyenne Kerolainy Leite Lima
 Data de submissão: 27 de agosto de 2018 - 08:56
 Seção: Artigos
 Editor: Nenhum(a) designado(a)

Situação

Situação: Aguardando designação
 Iniciado: 27-08-2018
 Última alteração: 27-08-2018

IDIOMA

PATROCINADORES

ANUNCIE NAS REVISTAS

SAIBA MAIS

USUÁRIO

Logado como: JulyenneLima
 Perfil