

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Pedro Bernardo Roecker

Título: Avaliação de diferentes combinações de camadas filtrantes em um filtro rápido descendente no tratamento de água (pré tratada por eletroflotação) contendo cianobactérias.

Florianópolis

2021

Pedro Bernardo Roecker

Título: Avaliação de diferentes combinações de camadas filtrantes em um filtro rápido descendente no tratamento de água (pré tratada por eletroflotação) contendo cianobactérias.

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.
Orientador: Eng. Tiago Burgardt, Me.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Roecker, Pedro Bernardo

Avaliação de diferentes combinações de camadas filtrantes em um filtro rápido descendente no tratamento de água (pré tratada por eletroflotação) contendo cianobactérias. / Pedro Bernardo Roecker ; orientador, Tiago Burgardt, 2021. 65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Cianobactérias. 3. Filtração rápida. 4. Múltiplas camadas. 5. Eletroflotação. I. Burgardt, Tiago. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Pedro Bernardo Roecker

Título: Avaliação de diferentes combinações de camadas filtrantes em um filtro rápido descendente no tratamento de água (pré tratada por eletroflotação) contendo cianobactérias.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Sanitarista e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 13 de maio de 2021.

Prof. Maria Elisa Magri, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Me. Tiago Burgardt
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Thyara Campos Martins Nonato
Avaliadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Fernando Hymnô de Souza
Avaliador

Escola de Engenharia de São Carlos / Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

A gratidão é uma palavra muito utilizada hoje em dia para tantas situações triviais, que muitas vezes sinto que seu significado vem perdendo o sentido. Mas em momentos tão difíceis como este de pandemia, devemos nos conectar e realmente ser gratos a tudo e todos que nos fortalecem e apoiam.

Primeiramente eu preciso agradecer a minha família, mãe, pai e meu irmão, por todo amor, apoio e estrutura que me proporcionaram durante todos os meus anos de vida. Além de todos os bons momentos que juntos passamos.

Aos professores da UFSC, por todos os conhecimentos e experiências passados. Em especial aos professores do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, que fazem com que este curso seja de excelência. Aos amigos e colegas feitos durante a graduação, que foram parceiros nesse trajeto.

A todo LAPOÁ, voluntários, bolsistas, mestrandos, doutorandos, pós-doutorandos e professores. Por todo o conhecimento, auxílio, trabalho, churrascos e momentos de descontração compartilhados durante os meus 4 anos de laboratório. Ao Tiago Burgardt pela orientação neste trabalho, e a banca avaliadora por se disponibilizar a ler, e auxiliar este trabalho a se tornar melhor.

E por fim, aos meus amigos de vida, do ensino fundamental, IFSC, casa dos girassóis, que tantos bons momentos compartilhamos juntos fazendo com que a jornada fosse mais leve e agradável.

RESUMO

As cianobactérias são organismos fotossintéticos, presentes em reservatórios naturais, que em algumas ocasiões podem tornar um manancial inapto para uso humano devido a capacidade de algumas espécies produzirem toxinas nocivas à saúde humana. Esses organismos vêm chamando a atenção devido ao aumento dos casos de florações de algas nocivas em corpos d'água, sendo assim um problema no abastecimento público em diferentes partes do mundo. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da filtração rápida descendente com a aplicação de três diferentes combinações de materiais filtrantes no tratamento de água com a presença de cianobactérias utilizando eletroflotação como pré tratamento. O estudo foi realizado em sistema piloto composto de eletroflotação seguida por filtração rápida descendente, utilizando combinações de areia, areia e antracito e areia, antracito e esferas de polietileno como material filtrante. O sistema foi alimentado com água bruta do manancial da Lagoa do Peri, e foram realizadas 6 carreiras filtração, duas para cada combinação, com duração de 6h nas quais foram monitorados os parâmetros: cor, turbidez, pH, condutividade, temperatura e contagem de cianobactérias. As combinações de materiais filtrantes não apresentaram remoções satisfatórias de cor e turbidez, apresentando remoções de 20%, 23% e 20% para cor, e 18%, 23% e 22% para turbidez, respectivamente. Quanto a remoção de cianobactérias a utilização de somente areia não apresentou bons resultados com somente 29% de remoção, enquanto a combinação de areia e antracito apresentou 52%, sendo o melhor resultado obtido entre as combinações. Assim a combinação de areia e antracito foi a que apresentou melhor resultado, com melhor remoção de cor aparente, turbidez e cianobactérias.

Palavras-chave: Cianobactérias. Filtração rápida. Múltiplas camadas. Eletroflotação.

ABSTRACT

Cyanobacteria are photosynthetic organisms, present in natural reservoirs, which can turn an source unsuitable for human use due to the ability of some species to produce toxins harmful to human health. These organisms have been drawing attention due to the increase in cases of harmful algal blooms in water bodies, thus being a problem in public supply in different parts of the world. This work aimed to evaluate the efficiency of rapid descending filtration with the application of three different solutions of filtering medias in the treatment of water with the presence of cyanobacteria using electroflotation as pre-treatment. The study was carried out in a pilot system composed of electroflotation followed by rapid descending filtration, using combinations of sand; sand and anthracite and sand, anthracite and polyethylene spheres, as filter material spheres as a filtering media. The system was fed with raw water from the Lagoa do Peri spring, and 6 tests were performed, two for each combination, lasting 6 hours each test, where the parameters were monitored: color, turbidity, pH, conductivity, temperature and cyanobacteria. Combinations of filtering medias do not provide satisfactory removal of color and turbidity, removal of 20%, 23% and 20% for color, and 18%, 23% and 22% for turbidity. As for the removal of cyanobacteria, the use of only sand does not show good results with only 29% removal, while the combination of sand and anthracite presented 52%, being the best result among the combinations. Thus, the combination of sand and anthracite was the one that presented the best result, with the best removal of apparent color, turbidity and cyanobacteria.

Keywords: Cyanobacteria. Rapid Filtration. Mixed media, Electroflotation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de etapas de realização do experimento.	21
Figura 2 – Localização da Lagoa do Peri.	22
Figura 3 - Sistema piloto.	23
Figura 4 - Reator eletroquímico.	24
Figura 5 - Configurações de meio filtrante.	25
Figura 6 - Coletas de amostra.	27
Figura 7 - Curva granulométrica areia.	30
Figura 8 - Curva granulométrica do antracito.	30
Figura 9 - Perda de carga x Velocidade de aproximação.	31
Figura 10 - Expansão x Velocidade de aproximação.	32
Figura 11 - CA e CV nas carreiras 1 e 2.	34
Figura 12 - Remoção de CA nas carreiras 1 e 2.	35
Figura 13 – Turbidez nas carreiras 1 e 2.	35
Figura 14 - Remoção de turbidez nas carreiras 1 e 2.	36
Figura 15 - Remoção de cianobactérias nas carreiras 1 e 2.	37
Figura 16 - Concentração de cianobactérias nas carreiras 1 e 2.	37
Figura 17 - pH durante as carreiras 1 e 2.	38
Figura 18 - Condutividade nas carreiras 1 e 2.	39
Figura 19 - Temperatura nas carreiras 1 e 2.	39
Figura 20 - CA e CV nas carreiras 3 e 4.	40
Figura 21 - Remoção de CA carreiras 3 e 4.	41
Figura 22 – Turbidez nas carreiras 3 e 4.	41
Figura 23 - Remoção de turbidez nas carreiras 3 e 4.	42
Figura 24 - Remoção de cianobactérias nas carreiras 3 e 4.	43
Figura 25 - Concentração de cianobactérias nas carreiras 3 e 4.	43
Figura 26 - pH nas carreiras 3 e 4.	44
Figura 27 - Condutividade nas carreiras 3 e 4.	45
Figura 28 - Temperatura nas carreiras 3 e 4.	45
Figura 29 - CA e CV nas carreiras 5 e 6.	46
Figura 30 - Remoção de CA e CV nas carreiras 5 e 6.	47
Figura 31 - Turbidez nas carreiras 5 e 6.	48
Figura 32 - Remoção de turbidez carreiras 5 e 6.	48

Figura 33 - Remoção de cianobactérias nas carreiras 5 e 6.....	49
Figura 34 - Concentração de cianobactérias nas carreiras 5 e 6.....	50
Figura 35 - pH carreiras nas 5 e 6.	50
Figura 36 - Condutividade nas carreias 5 e 6.	51
Figura 37 - Temperatura carreiras 5 e 6.	52
Figura 38 - Turbidez durante a retrolavagem.	52
Figura 39 - Cor aparente durante a retrolavagem.	53
Figura 40 - Remoção de cor aparente média.	54
Figura 41 - Remoção de turbidez média.	55
Figura 42 - Remoção média de cianobactérias.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos meios filtrantes.....	19
Tabela 2 - Parâmetros, métodos e equipamentos utilizados.....	28
Tabela 3 - Remoções médias das combinações de material filtrante.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.1.1	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	CIANOBACTÉRIAS	16
2.1.1	<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>	17
2.2	FILTRAÇÃO RÁPIDA	17
2.2.1	Material filtrante	18
2.2.2	Retrolavagem	19
2.3	PRÉ-TRATAMENTO	19
2.4	Eletroflotação.....	20
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	ÁGUA BRUTA	21
3.2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA PILOTO	22
3.2.1	Reator eletroquímico	23
3.2.2	Filtração rápida descendente.....	24
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FILTRANTE	25
3.3.1	Ensaio de granulometria	25
3.3.2	Ensaio de expansão.....	26
3.4	OPERAÇÃO DO SISTEMA PILOTO.....	26
3.4.1	Parâmetros de análise de qualidade de água	27
3.4.2	Retrolavagem	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FILTRANTE	29
4.1.1	Ensaio granulométrico	29
4.1.2	Ensaio de expansão.....	31

4.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MEIOS FILTRANTES	33
4.2.1	Areia.....	33
4.2.1.1	<i>Cor e turbidez.....</i>	33
4.2.1.2	<i>Cianobactérias.....</i>	36
4.2.1.3	<i>pH, condutividade e temperatura</i>	38
4.2.2	Areia e antracito	40
4.2.2.1	<i>Cor e turbidez.....</i>	40
4.2.2.2	<i>Cianobactérias.....</i>	42
4.2.2.3	<i>pH, condutividade e temperatura</i>	44
4.2.3	Areia, antracito e esferas de polietileno (EPS).....	46
4.2.3.1	<i>Cor e turbidez.....</i>	46
4.2.3.2	<i>Cianobactérias.....</i>	49
4.2.3.3	<i>pH, condutividade e temperatura</i>	50
4.3	RETROLAVAGEM	52
4.4	COMPARAÇÃO DAS COMBINAÇÕES DE MEIO FILTRANTE.....	53
5	CONCLUSÕES.....	56
6	RECOMENDAÇÕES.....	58
	REFERÊNCIAS.....	59
	APÊNDICE A – Resultados das análises das carreiras de filtração 1 e 2 (areia).....	63
	APÊNDICE B – Resultados das análises das carreiras de filtração 3 e 4 (areia + antracito).....	64
	APÊNDICE C – Resultados das análises das carreiras de filtração 5 e 6 (areia + antracito +esferas de polietileno).....	65

1 INTRODUÇÃO

A poluição de recursos hídricos é normalmente vinculada a causas antrópicas como: resíduos da agropecuária, efluentes industriais e domésticos, além destes também existem os contaminantes emergentes, como hormônios, fármacos, micro plásticos e nanopartículas (PESCARA, 2014). Em algumas situações a contaminação de mananciais pode se dar por causas naturais. Muitos fatores podem influenciar na qualidade da água, condições minerais, biológicas, meteorológicas e até topográficas. Por exemplo, a presença de algas, cianobactérias e biomassa de plantas pode inviabilizar a utilização de um determinado corpo hídrico para recreação ou abastecimento público, devido ao aumento de turbidez, produção de odor e toxinas (CODD, 2000).

Neste contexto, as cianobactérias são microrganismos fotossintéticos encontrados em lagos, lagoas, córregos e outras águas superficiais de forma natural. As atividades humanas (agropecuária, despejo de esgoto, escoamento de água de rodovias) causam um aumento da fertilidade (eutrofização) de corpos d'água, levando a uma proliferação excessiva de algas e cianobactérias (WHO, 2013). O frequente domínio de cianobactérias em águas eutrofizadas, é de grande preocupação do ponto de vista da qualidade de água devido a habilidade comum desses organismos de produzir toxinas (CODD, 2000; SARMA 2012).

As cianobactérias não são classificadas como organismos emergentes, mas mesmo assim continua ganhando a atenção da comunidade científica, devido ao aumento nas ocorrências de florações de cianobactérias nocivas, conhecidos como *blooms*. O termo floração de cianobactérias se refere ao aumento expressivo da concentração de cianobactérias produtoras de toxinas, tornando-se muitas vezes parcela dominante do fitoplâncton do corpo d'água, causando o comprometimento da qualidade da água (MEREL et al., 2013; MOLICA; AZEVEDO, 2009; NIAMIEN-EBROTTIE et al., 2015; SMITH; DANIELS, 2018).

A ocorrência de cianobactérias em mananciais de água doce já foi identificada em diferentes partes do planeta, podendo se destacar Austrália, África do Sul, Estados Unidos, França, Itália. Nova Zelândia, entre outros (HILBORN et al., 2014; NIAMIEN-EBROTTIE et al., 2015; SVRCEK; SMITH, 2004b; TUCCI et al., 2012).

A presença de cianobactérias já foi identificada em mananciais utilizados para abastecimento público, por pesquisadores de diferentes partes do Brasil. Podendo se destacar as regiões: Bahia, Mato Grosso do Sul, Pernambuco, Rio de Janeiro, Rio grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo, entre outros. (DAMAZIO; SILVA E SILVA, 2006; FRANCIELI et al.,

2012; JUNIOR, 2012; LEITE; BIAGIONI; SMITH, 2018; LÍLLIAN CANTO DE SÁ et al., 2010; RODRIGUES E LUNA, 2008).

A Lagoa do Peri, localizada em Florianópolis-SC, possui grande concentração natural de cianobactérias da espécie *Cylindropermopsis raciborskii*. A água do manancial é utilizada para abastecimento de parte sul e leste da ilha de Florianópolis, o tratamento da água era realizado através da filtração direta até o ano de 2020, e devido a alta concentração de cianobactérias eram observadas reduções nas carreiras de filtração (GARCIA, 2002).

A utilização somente da filtração direta não é o suficiente para a remoção de cianobactérias, apresentando resultados bastante variáveis de remoção para água com grandes concentrações de cianobactérias. Sendo necessário a utilização de pré-tratamentos, ou filtros mais sofisticados de múltiplas camadas (MOUCHET; BONNÉLYE, 1998). A implementação de tecnologias de flotação se apresenta como uma boa alternativa para a remoção de cianobactérias, devido à baixa densidade das células facilitando a sua flotação (TEIXEIRA, 2004).

Neste sentido, a eletroflotação é uma tecnologia de flotação, que consiste na formação de microbolhas de oxigênio e hidrogênio através da eletrólise da água, com um sistema de eletrodos, que carregam em fluxo ascendente as partículas presentes na água (CHEN, G., 2004). E esta tecnologia vem apresentado bons resultados em estudos realizados na Lagoa do Peri, para a remoção de cianobactérias (NONATO et al., 2019; NONATO et al., 2020; PALANI, 2019).

Assim, como a presença de cianobactérias produtoras de toxinas pode causar malefícios a saúde humana e animal, faz-se necessário o emprego de tratamentos que proporcionem a remoção do indivíduo ou da toxina por ele gerada. Então a eletroflotação combinada com a filtração em múltiplas camadas se apresenta como uma alternativa para o tratamento de água contendo cianobactérias.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência de um sistema piloto de filtração rápida descendente com a aplicação de três diferentes materiais filtrantes no tratamento de água com a presença de cianobactérias utilizando eletroflotação como pré tratamento.

1.1.1 Objetivos específicos

- Caracterizar os materiais filtrantes;
- Avaliar a eficiência das três diferentes combinações de meios filtrantes (areia; areia e antracito; areia, antracito e esferas de polietileno);
- Comparar e identificar a melhor combinação de meios filtrantes após a eletroflotação;
- Avaliar a eficiência do processo de retrolavagem adotado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CIANOBACTÉRIAS

As cianobactérias são microrganismo procariontes fotossintetizantes, que são comumente encontrados em ambientes marinhos e reservatórios de água doce (MOLICA; AZEVEDO, 2009). Elas são organismos que possuem tanto algumas características de alga quanto de bactérias. Se assemelham as algas quanto ao seu tamanho, produção de pigmentos azuis e verde e a capacidade de realizar fotossíntese (WHO, 2013). E por serem procariontes, elas se apresentam estruturalmente e bioquimicamente semelhantes às bactérias (LAPOLLI; CORAL; RECIO, 2011).

A maior parte das cianobactérias são autotróficas e aeróbicas, necessitando basicamente de água, dióxido de carbono substâncias inorgânicas e luz para o seu ciclo de vida, mesmo assim é conhecido que algumas espécies podem viver sem luz por longos períodos (CHRISTOFFERSEN; KAAS, 2000).

Esses organismos se encontram dispersos por toda a coluna de água, causando assim um aumento dos sólidos em suspensão e da turbidez da água (WHO, 2013). O crescimento massivo de cianobactérias em ambientes aquático, também gera odores e gosto desagradáveis na água, impossibilitando assim o seus uso recreativo ou para abastecimento (MOLICA; AZEVEDO, 2009).

Além das características desagradáveis, foram identificadas pelo menos 46 espécies de cianobactérias capazes de produzir toxinas danosas a vertebrados. Sendo as mais comuns de se encontrar em água doce são: *Microcystis spp.*, *Cylindrospermopsis raciborskii*, *Planktothrix (syn. Oscillatoria) rubescens*, *Synechococcus spp.*, *Planktothrix (syn. Oscillatoria) agardhii*, *Gloeotrichia spp.*, *Anabaena spp.*, *Lyngbya spp.*, *Aphanizomenon spp.*, *Nostoc spp.*, *some Oscillatoria spp.*, *Schizothrix spp.* e *Synechocystis spp* (CHRISTOFFERSEN; KAAS, 2000).

Com o aumento dos florescimentos de cianobactérias em reservatórios naturais e de abastecimento, elas se tornaram alvo de estudos para o tratamento de água com presença de cianobactérias (LAPOLLI; CORAL; RECIO, 2011). Assim muitas tecnologias vem sendo utilizadas para a remoção de cianobactérias, como pré e pós-oxidação com ozonização, adsorção em carvão ativado, entre outros (SENS et al, 2005; FALCONER et al., 1989).

Em relação aos tratamentos convencionais (como a filtração rápida e filtração lenta) apresentam eficiência na remoção de cianobactérias, mesmo em altas densidades de células. Mas em contrapartida resulta em uma colmatação mais rápida dos filtros (LAPOLLI; CORAL; RECIO, 2011), necessitando assim a utilização de um pré-tratamento para aumentar o tempo de carreira.

Neste contexto, a flotação por ar dissolvido (FAD), se apresenta como uma excelente alternativa, pesquisas realizadas por Oliveira (2005) e Coral (2009) indicam eficiências superiores a 90% na remoção de cianobactérias utilizando a FAD. Outros processos de flotação, como a eletroflotação, também apresentam elevadas remoções de cianobactérias. Sendo reportada eficiência de 83,42% na remoção de cianobactérias por Nonato et al. (2020).

2.1.1 *Cylindropermopsis raciborskii*

A *Cylindropermopsis raciborskii* é uma das espécies de cianobactérias produtoras de toxinas mais comumente encontradas em lagos e reservatórios, causando florescimentos de cianobactérias (PADISÁK, 1997). Elas apresentam um grande risco em reservatórios de água pois são capazes de produzir dois tipos de toxinas, as neurotoxinas e cilindropermopsina (WHO, 2013).

Essa espécie de alga pode ser encontrada em uma grande variedade de ambientes, sendo identificada inicialmente como uma espécie de regiões tropicais, hoje já é encontrada até me pequenos e rasos reservatórios no extremo norte da Europa (PADISÁK, 1997).

A água da Lagoa do Peri, no município de Florianópolis-SC, que é utilizada para abastecimento de água de uma parcela da população do município, na qual são apontadas é apontada grandes concentrações de cianobactérias, sendo predominante a *Cylindropermopsis raciborskii* (NONATO et al., 2020).

2.2 FILTRAÇÃO RÁPIDA

Filtração pode ser definida como qualquer processo para remoção de partículas sólidas e microrganismos de um meio aquoso que passa através de um meio poroso. A tecnologia de filtração mais utilizada no mundo é a filtração rápida. A filtração rápida tem como principais características a alta taxa de filtração operando entre 120 a 240 m³.m⁻².d⁻¹, e a filtração em profundidade ao longo de toda a camada filtrante (CRITTENDEN et al., 2012).

A filtração é o resultado da ação de três mecanismos diferentes: o transporte, aderência e o desprendimento. Os mecanismos de transporte são responsáveis por aproximarem as partículas suspensas da superfície das partículas do meio filtrante, que por sua vez podem ficar aderidas a estas partículas por meio das forças superficiais, resistindo as forças de cisalhamento causadas pelo fluxo no meio filtrante. Se as forças de cisalhamento superam as forças de adesão ocorre o desprendimento, carregando as partículas suspensas para camadas mais profundas do meio filtrante (DI BERNARDO, 2003).

A filtração em profundidade se dá com a colmatação sucessiva das camadas de material filtrante, assim as partículas são aderidas na camada até que o acúmulo de partículas faz com que as forças superficiais sejam menores que as forças de cisalhamento, fazendo com que as partículas em suspensão sejam carregadas para as próximas camadas (DI BERNARDO, 2003).

Assim, para garantir o desempenho da filtração o material filtrante utilizado deve possuir diâmetro de partículas uniforme para que a filtração em profundidade ocorra. Podendo-se utilizar combinações de materiais filtrantes, proporcionando uma estratificação do meio filtrante que maximize a filtração em profundidade.

2.2.1 Material filtrante

A escolha do material filtrante é um aspecto muito importante para uma boa eficiência do filtro rápido. A limpeza dos filtros geralmente é realizada com a passagem de um fluxo ascensional de água pelo meio filtrante, assim causando a estratificação do meio filtrante, fazendo com que as partículas mais finas e menos pesadas fiquem na parte superior do filtro e as maiores e mais pesadas na parte de baixo. A estratificação do meio faz com que as partículas em suspensão fiquem retidas nas camadas superiores do filtro, e fazendo com que não ocorra a filtração em profundidade, assim diminuindo a eficiência do filtro e diminuindo o tempo da carreira de filtração (CRITTENDEN et al., 2012).

Então os materiais filtrantes devem ser escolhidos para que eles possuam boa uniformidade e garantam um bom desempenho do filtro. Os materiais filtrantes mais utilizados são a areia, carvão antracito e granada. Eles podem ser utilizados sozinhos ou em combinações, a combinação de diferentes meios filtrantes apresenta a vantagem de diferentes densidades e tamanhos de partículas, assim é possível realizar uma estratificação onde as partículas maiores ficam na parte superior da camada filtrante e as mais finas nas camadas

inferiores, assim maximizando a filtração em profundidade e melhorando a eficiência da filtração (CRITTENDEN et al., 2012).

Assim diversas características do material filtrante afetam a eficiência da filtração, podendo se destacar o tamanho efetivo dos grãos, coeficiente de uniformidade, densidade, porosidade e dureza (CRITTENDEN et al., 2012). Os valores das principais características, relacionadas a alguns materiais utilizados na filtração estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos meios filtrantes.

Propriedade	Granada	Areia	Antracito
Tamanho Efetivo (D₁₀) (mm)	0,2 – 0,4	0,4 – 0,8	0,8 – 2,0
Coeficiente de uniformidade	1,3 – 1,7	1,3 – 1,7	1,3 – 1,7
Densidade (g/mL)	3,6 – 4,2	2,65	1,4 – 1,8
Porosidade (%)	45 - 58	40 – 43	47 - 52
Dureza (Moh)	6,5 – 7,5	7	2 – 3

Fonte: Adaptado de Crittenden et al. (2012).

2.2.2 Retrolavagem

Como a filtração se dá em profundidade com a colmatação das sucessivas camadas de meio filtrante, quando ocorre a filtração do filtro inteiro ou uma grande alteração na qualidade da água, deve-se realizar a limpeza do filtro. A limpeza dos filtros é geralmente realizada com a passagem de um fluxo de água em sentido ascensional (retrolavagem) para que ocorra uma fluidificação e, conseqüentemente, acarretar a expansão adequada do meio para desprendimento das impurezas retidas (DI BERNARDO, 2003).

No caso de filtro com múltiplas camadas, a retrolavagem deve garantir a fluidificação dos meios filtrantes sem que ocorra a mistura das diferentes camadas. Assim é importante a seleção correta dos materiais filtrantes para que ocorra uma boa separação durante a limpeza do filtro.

2.3 PRÉ-TRATAMENTO

A filtração rápida também é influenciada quanto ao tipo de pré-tratamento utilizado, sendo necessário para garantir um bom funcionamento do filtro. O pré-tratamento é determinado pela qualidade da água bruta utilizada (CRITTENDEN et al., 2012).

As configurações de filtração mais utilizadas são: filtração convencional, utilizando coagulação, floculação e um processo de separação como decantação ou flotação. Filtração direta com coagulação e floculação. E a filtração em linha utilizando somente coagulação como pré-tratamento (CRITTENDEN et al., 2012).

2.4 ELETROFLOTAÇÃO

A eletroflotação foi proposta pela primeira vez por Elmore em 1904. E consiste em um processo de formação de microbolhas de hidrogênio e oxigênio geradas pela eletrólise da água (CHEN, G., 2004), essas microbolhas aderam e carregam, em fluxo ascensional, partículas presentes no meio aquoso, fazendo assim a sua separação. A grande diferença da eletroflotação para a flotação por ar dissolvido, é o mecanismo de formação das bolhas. As microbolhas são formadas utilizando-se um sistema de eletrodos, sendo que o oxigênio é formado no ânodo e o hidrogênio no cátodo (CHEN, X.; CHEN; YUE, 2002), como mostrado nas equações a seguir.



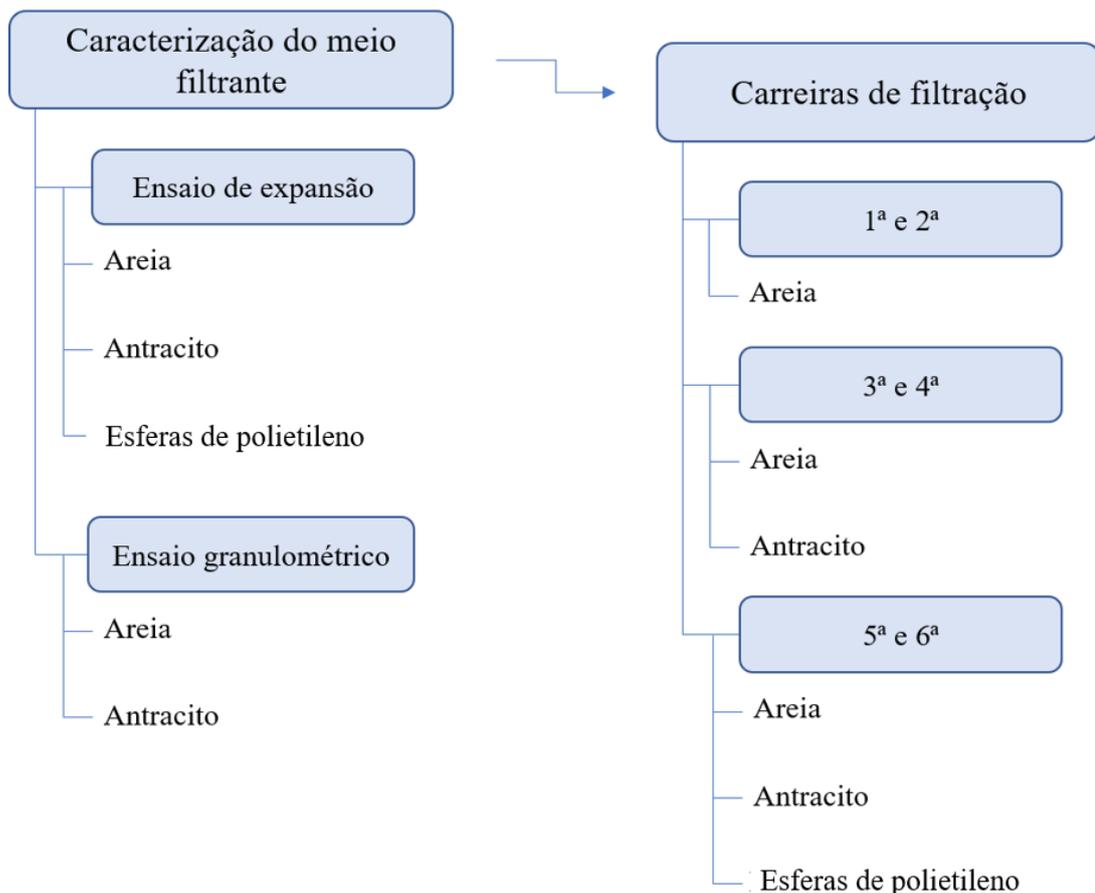
A eficiência do processo de eletroflotação, principalmente do tamanho das bolhas formadas, bolhas menores apresentam maior área superficial, possuindo assim mais área para aderir partículas. Diversos fatores afetam o tamanho da bolha formada na eletroflotação, sendo os principais pH, densidade de corrente e a superfície dos eletrodos (CHEN, G., 2004).

Quanto ao pH as bolhas de hidrogênio são menores em pH próximo ao neutro, enquanto as bolhas de oxigênio aumentam junto com o pH. O tamanho das bolhas tende a diminuir com o acréscimo da densidade de corrente, e materiais como aço inoxidável e eletrodos com ranhuras menores tendem a formar bolhas menores (HUIJUAN; XU; JIUHUI, 2010).

3 METODOLOGIA

O estudo foi realizado no Laboratório de Potabilização das Águas, no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) sendo dividido em duas etapas. Inicialmente foram feitas as análises de caracterização dos meios filtrantes e posteriormente foram realizadas seis carreiras de filtração com 3 combinações diferentes de meio filtrante. Um fluxograma com as etapas do estudo é mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma de etapas de realização do experimento.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

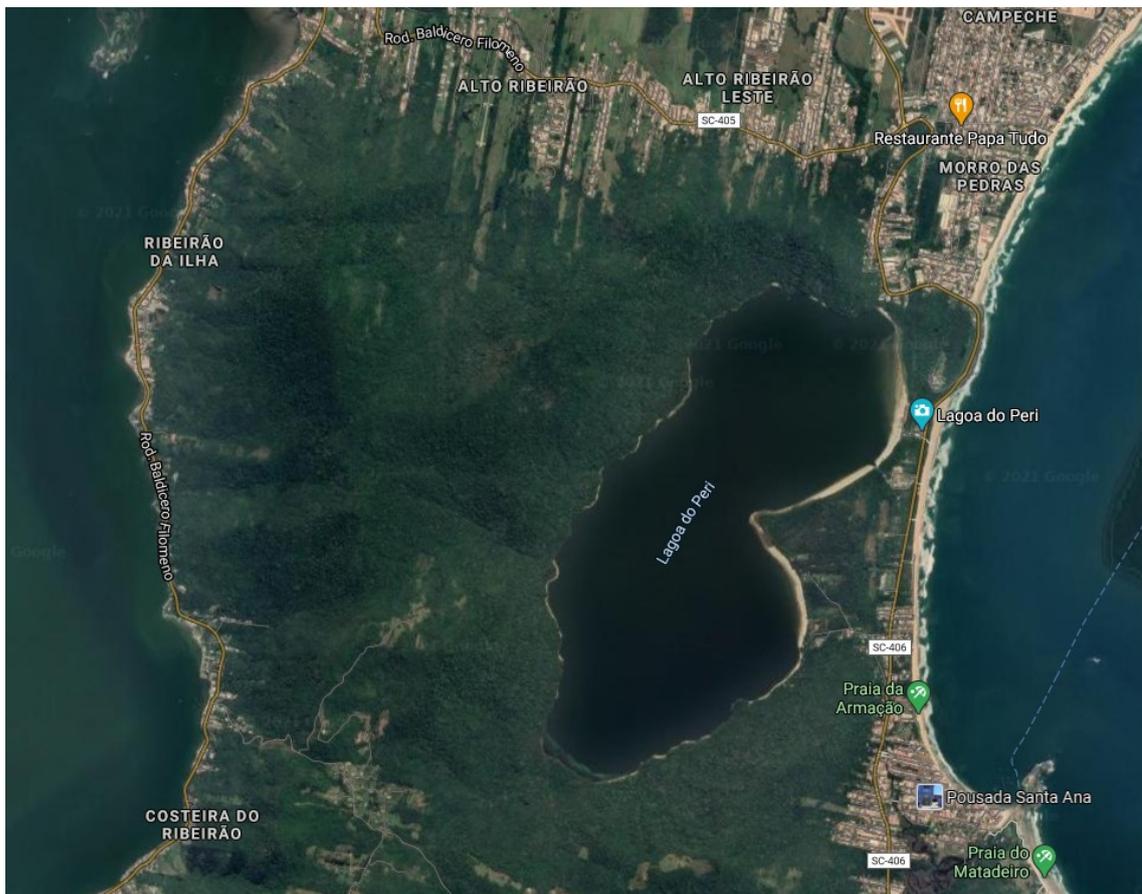
3.1 ÁGUA BRUTA

A água bruta utilizada foi do manancial da Lagoa do Peri, localizada dentro do Parque Municipal da Lagoa do Peri, no município de Florianópolis em Santa Catarina. O manancial é utilizado pela Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri para o

abastecimento das regiões Sul e Leste de Florianópolis. A água do manancial possui a presença de cianobactérias, sendo que a *Cylindrospermopsis raciborskii* é predominante.

A água foi coletada na entrada da ETA, devido a maior facilidade na sua coleta neste ponto, e transportada para a UFSC/LAPOÁ, onde foram realizados os experimentos. A localização da Lagoa do Peri está mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Localização da Lagoa do Peri.



Fonte: Google Maps (2021).

3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA PILOTO

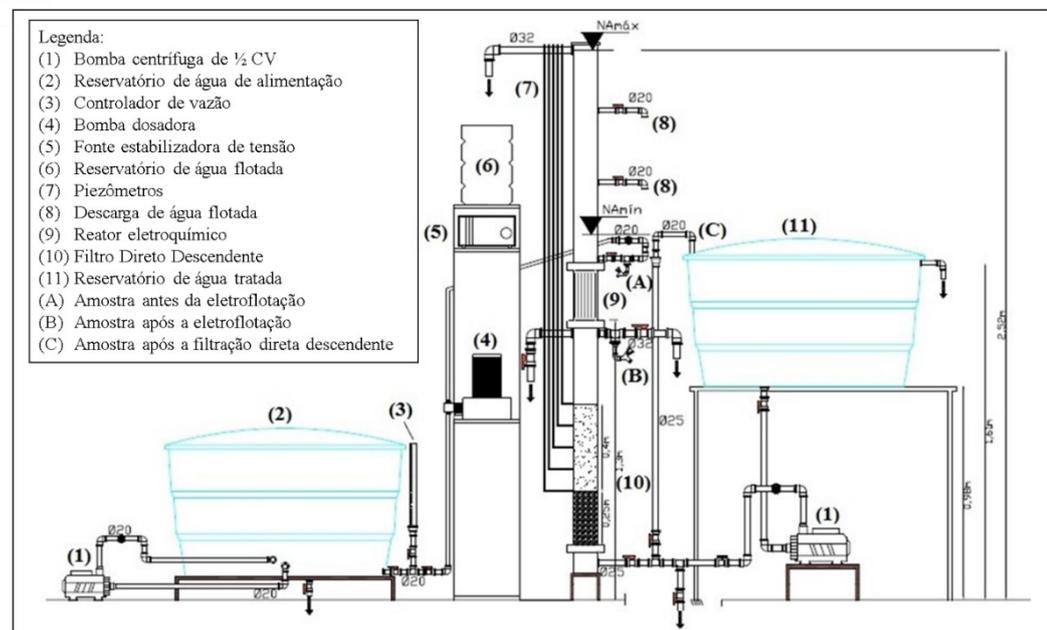
O sistema piloto (SP) está localizado no Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOÁ) na Universidade Federal de Santa Catarina. O sistema é constituído do reator eletroquímico com placas de titânio modelo DSA[®] seguido de filtração rápida descendente,

com diferentes combinações de camadas filtrantes. O reator eletroquímico é alimentado por uma fonte de tensão com corrente e tensão controladas, para a geração de microbolhas no reator eletroquímico. A alimentação do SP é feita por uma bomba dosadora, além da bomba dosadora, o sistema possui duas bombas centrífugas, uma utilizada para homogeneização da água no reservatório de entrada, e outra utilizada para o sistema de retrolavagem.

O armazenamento da água bruta é realizado em um reservatório de 500L na entrada do SP, e a água tratada segue para outro reservatório de 500L na saída.

Um esquema do SP é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Sistema piloto.



Fonte: Nonato et al. (2020).

3.2.1 Reator eletroquímico

O reator eletroquímico do SP é constituído de placas de titânio. As placas de titânio possuem a vantagem de possuírem uma vida útil maior, e um poder oxidativo mais elevado que eletrodos comuns.

O reator está localizado no meio da coluna do SP, entre a coluna superior e o filtro rápido descendente. Contando com 0,115 m de diâmetro e 0,2 m de altura o reator eletroquímico possui um volume de 2,08 L. As placas de titânio estão divididas entre 5 cátodos e 5 ânodos intercalados com 0,008 m de espaço entre eles, totalizando uma área efetiva de 0,0785 m².

Figura 4 - Reator eletroquímico.



Fonte: Burgardt (2019).

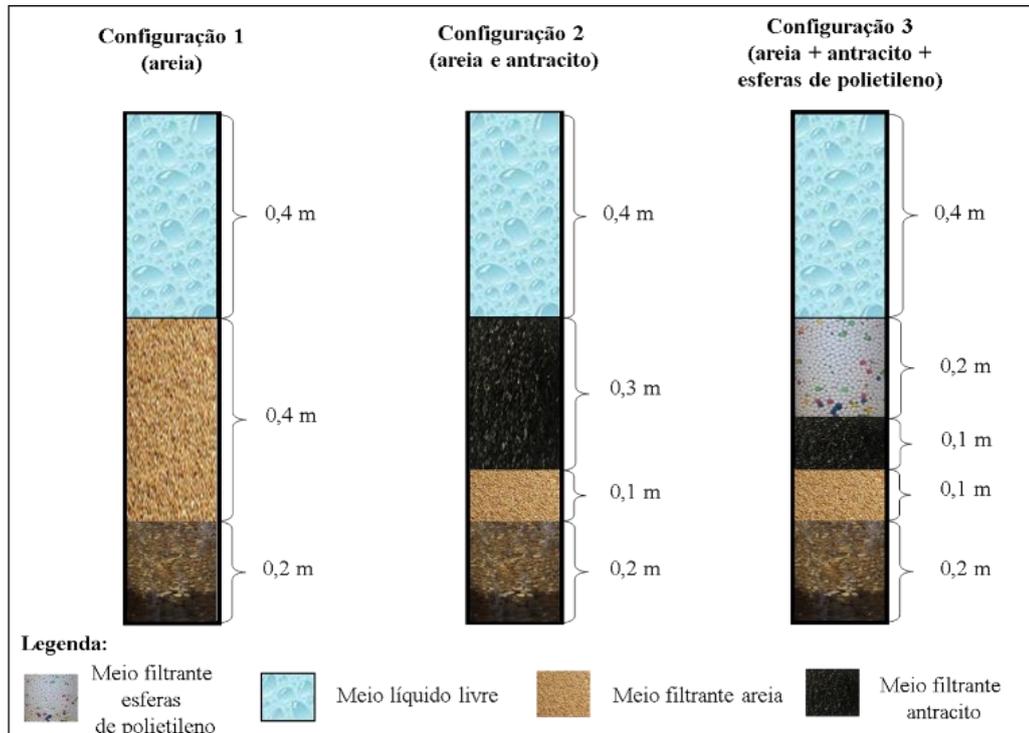
3.2.2 Filtração rápida descendente

O filtro rápido descendente foi construído utilizando três combinações diferentes de meio filtrante, com diferentes quantidades de areia, antracito e esferas de polietileno.

Sendo a primeira configuração com 40 cm de areia, a segunda com 10 cm de areia e 30 cm de antracito e a terceira com 10 cm de areia, 10 cm de antracito e 20 cm de esferas de polietileno, todas as configurações possuíam camada suporte de 20 cm de pedregulho. As camadas de material filtrante foram colocadas de forma que os materiais menos densos, e com maior expansão, ficassem na parte de cima para não haver mistura dos materiais filtrantes. As configurações utilizadas podem ser visualizadas na Figura 5.

A coluna de acrílico utilizada no filtro direto descendente possui 0,115 m de diâmetro e 1 m de altura.

Figura 5 - Configurações de meio filtrante.



Fonte: Burgardt (2019).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FILTRANTE

Foram realizados ensaios preliminares com o objetivo de se obter as características dos três meios filtrantes. Para isso foram realizados ensaios de expansão para os três meios filtrantes, e ensaio de granulometria para a areia e o carvão antracito, visto que as esferas de polietileno possuem características uniformes.

3.3.1 Ensaio de granulometria

A análise granulométrica foi executada conforme o método descrito na NBR – 7181/84. Após a realização do peneiramento determinou-se o D_{60} , diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade do meio filtrante. Sendo que o D_{60} é a abertura de peneira em que passa 60% do material, e o diâmetro efetivo o a abertura onde passa somente 10% da amostra, o coeficiente de uniformidade é uma relação entre o D_{60} e o diâmetro efetivo.

3.3.2 Ensaio de expansão

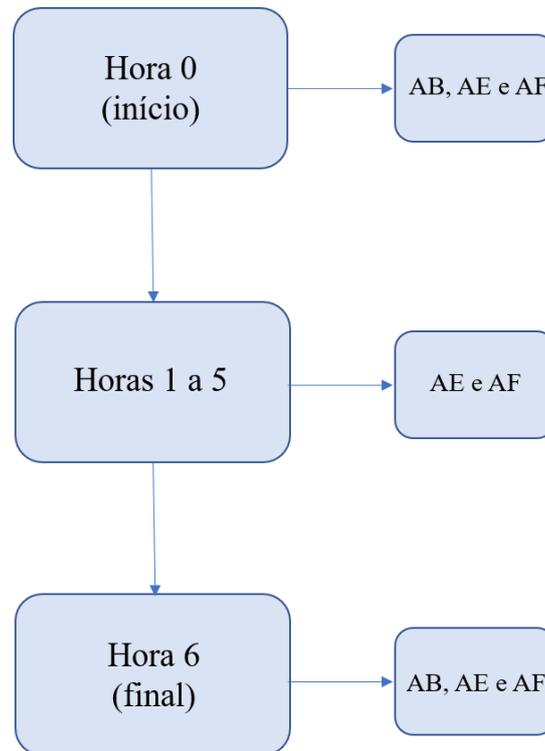
O ensaio de expansão foi realizado através um fluxo ascendente no meio filtrante, com a expansão do filtro controlada e aumentado gradativamente de 10 em 10%. Ao se passar o fluxo ascendente é aferida a vazão e a perda de carga no meio. Assim é construída a curva de expansão do meio filtrante, utilizada para determinação da velocidade de aproximação necessária para a retrolavagem.

3.4 OPERAÇÃO DO SISTEMA PILOTO

Foram realizadas 6 carreiras de filtração de 6 horas cada, a limitação do tempo de carreira se deu devido a quantidade de água bruta disponível de aproximadamente 400 L. O SP foi operado com as condições ideais descritas por Nonato et al. (2019), que a operação do mesmo sistema e água bruta deste estudo. Sendo a vazão de 33,3% da capacidade da bomba dosadora, o que equivale a uma vazão de 1,0 L/min e taxa de 100,84 m³.m⁻².d⁻¹, a densidade de corrente utilizada foi de 68,26 A.m⁻².

Durante a operação do filtro foram coletados três tipos de amostras de água sendo elas: água bruta (AB), água eletroflotada (AE) e água filtrada (AF). No início e final da operação eram coletadas amostras de AB, AE e AF. E em cada hora de operação eram coletadas amostras de AE e AF, para a avaliação da qualidade da água durante a carreira de filtração. Na Figura 6 está representado um esquema das coletas realizadas.

Figura 6 - Coletas de amostra.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Ao final de cada carreira de filtração foram realizadas retrolavagens para limpeza do material filtrante, conforme descrito no item 3.4.2.

3.4.1 Parâmetros de análise de qualidade de água

Para a análise e caracterização das amostras coletadas durante a operação do sistema piloto foram medidos os seguintes parâmetros: condutividade, contagem de cianobactérias, cor aparente, cor verdadeira, pH, temperatura. Os métodos e equipamentos utilizados para cada análise está mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros, métodos e equipamentos utilizados.

Parâmetro/unidade	Método analítico	Equipamento
Condutividade ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	2510 B (APHA, 2012)	Sonda Multiparâmetros HACH – HQ40D
Contagem de células (ind/mL)	10900 C (APHA, 2012)	Microscópio óptico e célula de sedwick rafter
Cor aparente (uH)	2120 C (APHA, 2012)	Espectrofotômetro DR 2800 HACH
Cor verdadeira (uH)	2120 C (APHA, 2012)	Espectrofotômetro DR 2800 HACH
pH	4500 H+ (APHA, 2012)	Sonda Multiparâmetros HACH – HQ40D
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	2550 B (APHA, 2012)	Sonda Multiparâmetros HACH – HQ40D
Turbidez (uT)	2130 B (APHA, 2012)	Turbidímetro Hach modelo 2100p

3.4.2 Retrolavagem

A retrolavagem foi realizada utilizando a água tratada, bombeada em fluxo ascendente no meio filtrante utilizando uma bomba centrífuga. A vazão de retrolavagem foi regulada para uma expansão total do meio filtrante de 50%. A expansão da retrolavagem foi determinada para garantir a expansão de todas as diferentes combinações de material filtrante. O sistema piloto é retrolavado por 10 minutos, sendo coletadas amostras da água de retrolavagem de 1 em 1 minuto, e são analisadas cor aparente e turbidez das amostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos durante a realização das carreiras de filtração e da caracterização do meio filtrante estão apresentados em quatro tópicos. Inicialmente sendo discutida a caracterização dos meios filtrantes, então a avaliação dos meios filtrantes, a retrolavagem e, por fim, a eficiência das combinações de materiais filtrantes.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FILTRANTE

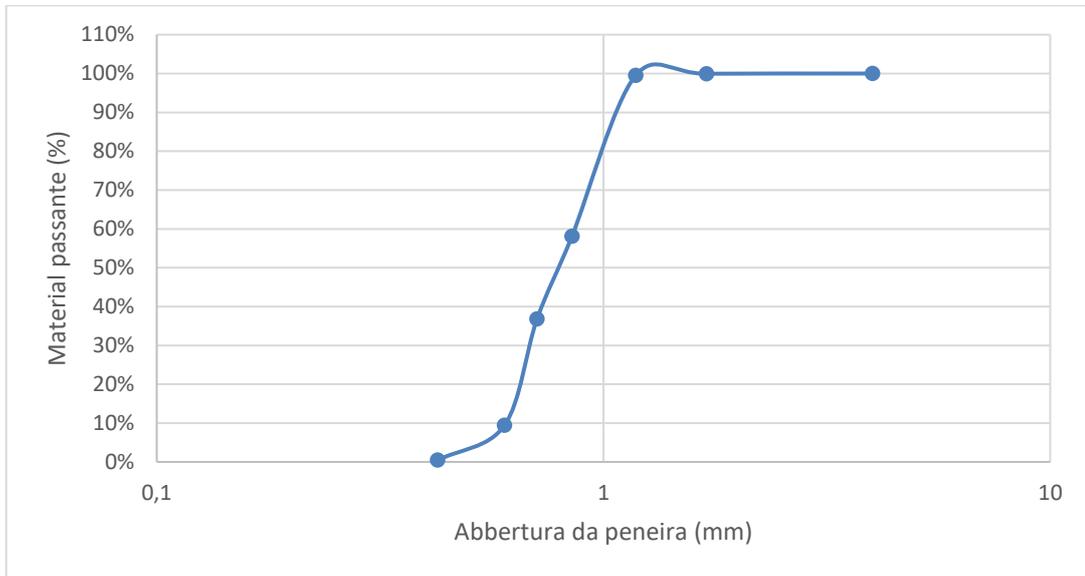
Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos durante os ensaios de caracterização dos meios filtrantes. Inicialmente apresentando-se os ensaios de granulometria da areia e antracito, e então os resultados dos ensaios de expansão para a areia, antracito e esferas de polietileno (EPS).

4.1.1 Ensaio granulométrico

Através dos ensaios de granulometria se construíram as curvas granulométricas para a areia e para o carvão antracito. E através das curvas determinou-se o D_{60} , diâmetro efetivo (D_{10}) e o coeficiente de uniformidade das amostras. Como as esferas de polietileno possuem tamanho padrão de 6 mm, não foi necessária a realização do ensaio de granulometria.

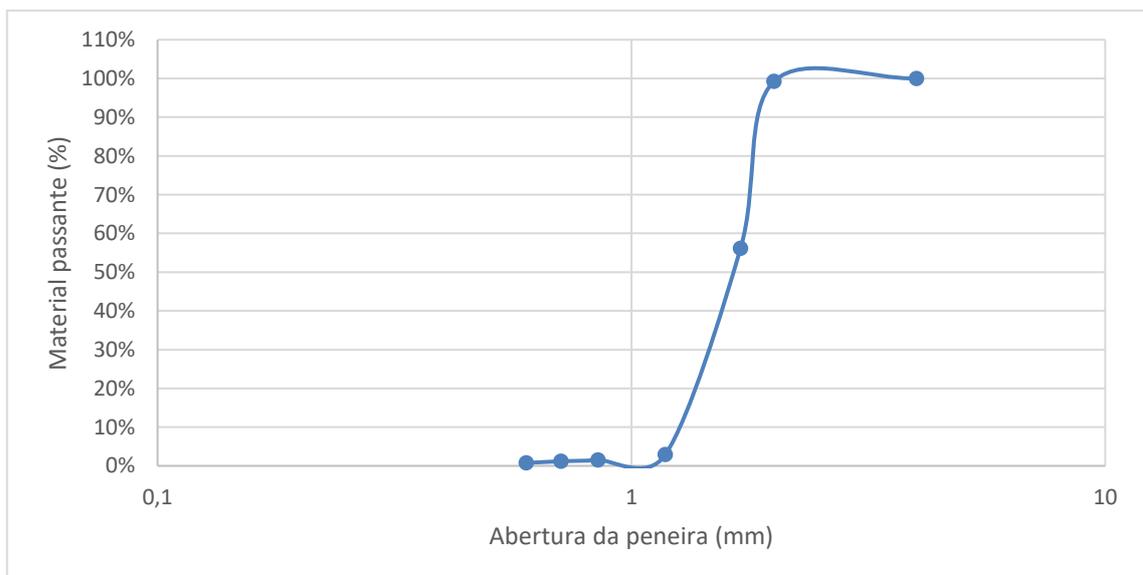
A curva granulométrica da areia pode ser observada na Figura 7. Na qual se determinou o D_{60} de 0,85 mm e diâmetro efetivo de 0,60 mm, de acordo com Crittenden et al. (2012) os valores de diâmetro efetivo para areia utilizada em filtração rápida devem estar entre 0,4 a 0,8 mm. O coeficiente de uniformidade calculado foi de 1,4. Segundo Crittenden et al. (2012), o coeficiente de uniformidade esperado para areias utilizadas na filtração é de 1 a 1,7, sendo assim a areia está dentro dos parâmetros indicados.

Figura 7 - Curva granulométrica areia.



Na Figura 8 está apresentada a curva granulométrica do antracito. Por meio da curva granulométrica obteve-se um D_{60} de 1,73 mm e diâmetro efetivo de 1,27 mm, o diâmetro efetivo está dentro da faixa de 0,8 a 2,0 mm indicado por Crittenden et al. (2012). O coeficiente de uniformidade de 1,4, também se enquadra na faixa indicada de 1 a 1,7.

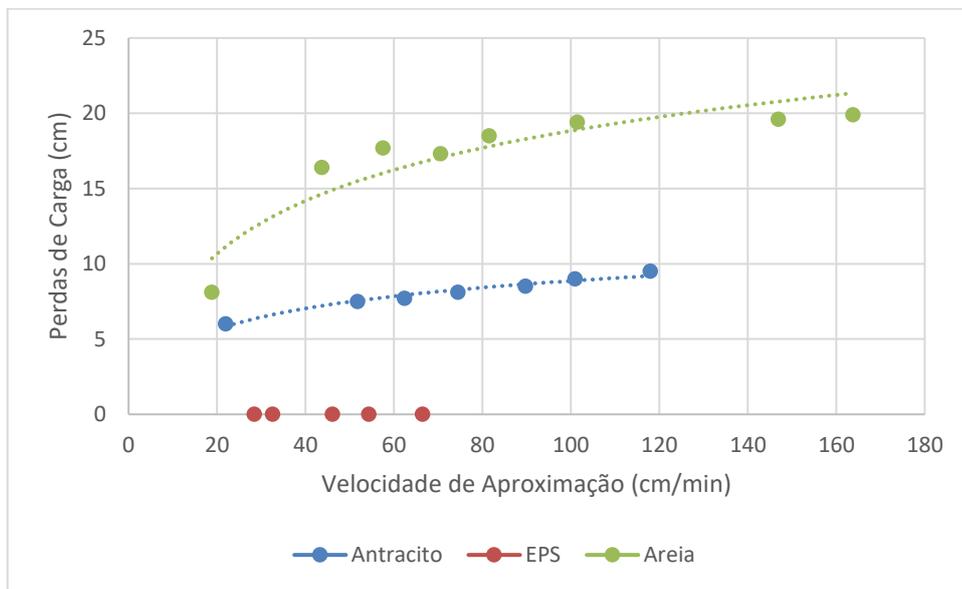
Figura 8 - Curva granulométrica do antracito.



4.1.2 Ensaio de expansão

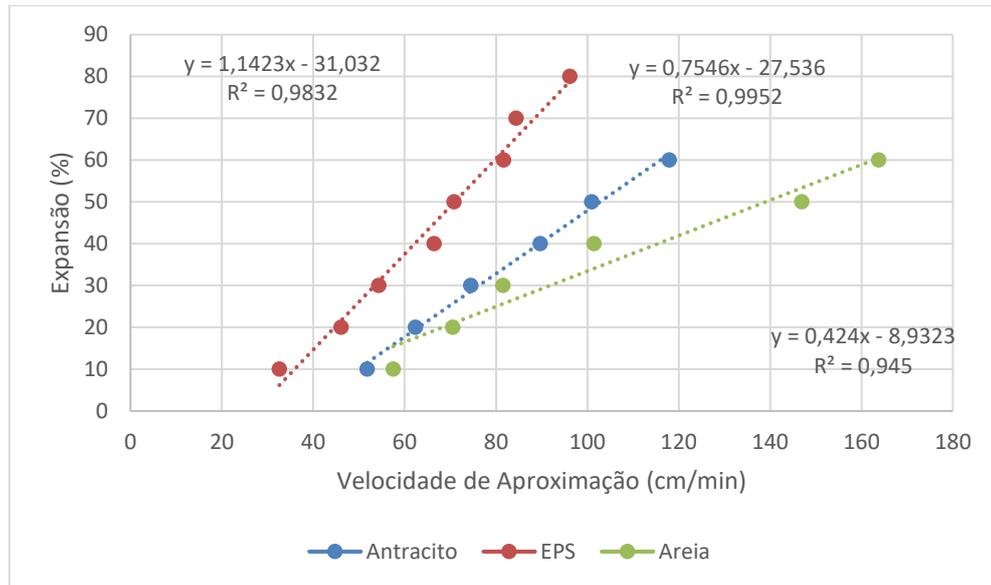
Os ensaios de expansão foram realizados com aumento gradativo da expansão de 10% em 10%, e através dos ensaios foram construídas duas curvas, uma de Perda de carga x Velocidade de aproximação (Figura 9) e outra de Expansão x Velocidade de aproximação (Figura 10). E através das curvas obteve-se a velocidade de aproximação necessária para a expansão dos meios filtrantes.

Figura 9 - Perda de carga x Velocidade de aproximação.



As esferas de polietileno não apresentaram perda de carga para expansão de até 80%. Esse fato se deve a baixa densidade, que diminui a perda de carga. Quanto a areia e antracito, a areia apresentou a maior perda de carga, mesmo possuindo grãos com diâmetros menores. Como reportado por Brick (2009), esse comportamento se dá devido a maior massa específica da areia, fazendo com que apresente maior perda de carga.

Figura 10 - Expansão x Velocidade de aproximação.



Com o gráfico de Expansão x Velocidade de aproximação, por meio da regressão linear obtém-se a equação para cálculo da velocidade de aproximação a partir da expansão desejada. Assim, estão apresentadas as equações para areia (3), antracito (4) e EPS (5), com coeficientes de correlação linear de 0,95, 0,99 e 0,98, respectivamente.

$$E\% = 0,42va - 8,93 \quad (3)$$

$$E\% = 0,75va - 27,54 \quad (4)$$

$$E\% = 1,14va - 31,03 \quad (5)$$

Como se deseja uma expansão de 50% do meio filtrante, calculou-se a velocidade de aproximação necessária para a expansão de 50% de cada um dos materiais, sendo esses valores de 140,3 cm/min para areia, 103,4 cm/min para o antracito e 71,1 cm/min para as esferas de polietileno.

Assim fica evidente que em uma combinação dos três meios filtrantes, a expansão durante a retrolavagem seria limitada pelas esferas de polietileno por apresentarem uma velocidade de aproximação muito menor que os outros meios filtrantes, se expandido muito mais facilmente.

4.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MEIOS FILTRANTES

A avaliação do desempenho dos meios filtrantes foi realizada em três grandes grupos referentes a cada combinação, sendo que em cada tópico será discutido os parâmetros analisados referentes a cada uma das carreiras. Os resultados apresentados nos gráficos são referentes aos valores medidos para a água filtrada (AF). As comparações de remoção foram realizadas em relação a água eletroflotada (AE), para assim se medir o valor removido somente no material filtrante.

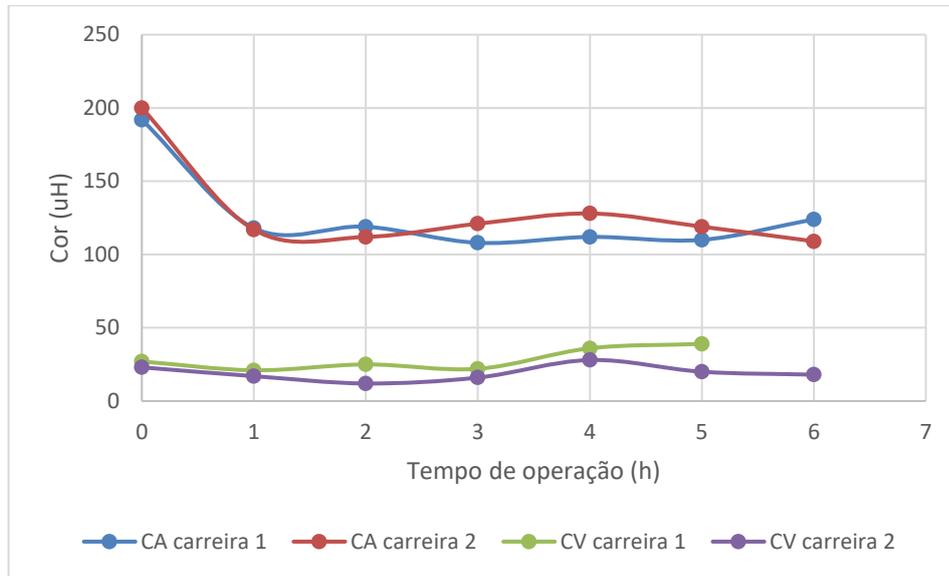
4.2.1 Areia

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas carreiras 1 e 2, referentes a utilização de areia como material filtrante. O valor da hora 1 de cada carreira é equivalente ao valor da AB. No Apêndice A estão apresentados os resultados obtidos durante as 6 horas de carreira, e eles serão discutidos em três seções: cor e turbidez, cianobactérias, pH, condutividade e temperatura.

4.2.1.1 *Cor e turbidez*

Os níveis de cor aparente (CA) se mantiveram estáveis a partir da hora 1 nas carreiras 1 e 2, variando de valores entre 108 uH e 124 uH. Enquanto na carreira 2 os valores de CA variaram entre 109 uH e 128 uH. Para CV, a carreira 1 apresentou um aumento nas horas 4 e 5, com valores de 36 e 39 uH, e permanecendo estável, em torno 25 uH, nas outras horas. Durante a carreira 2, a cor verdadeira se manteve estável apresentando somente um pico de 28 uH na hora 4. Os níveis de CA e CV durante a operação das duas carreiras está apresentado na Figura 11.

Figura 11 - CA e CV nas carreiras 1 e 2.

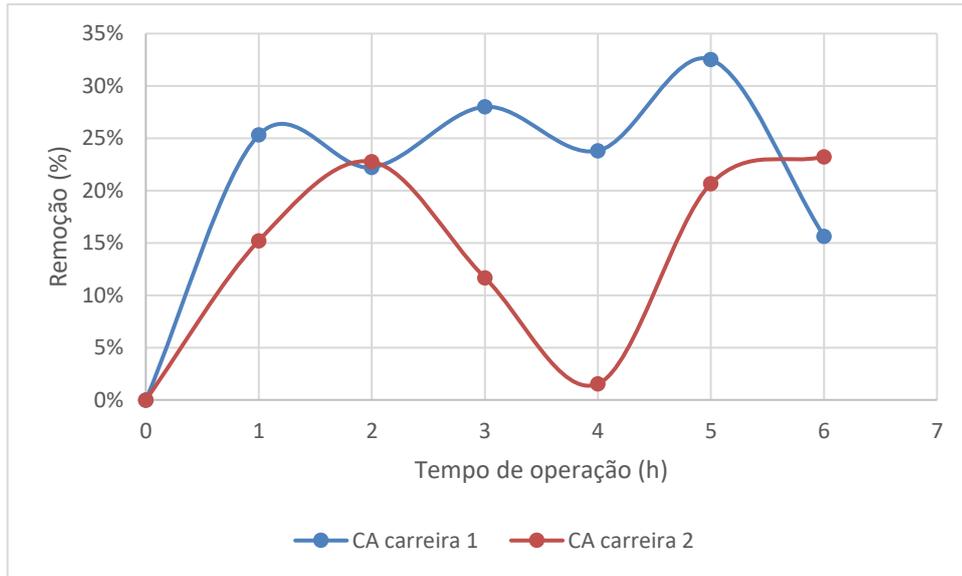


Segundo os padrões de potabilidade da Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde, os valores de cor aparente na água não podem ser superiores a 15 uH. Então os valores encontrados durante ambas as carreiras de filtração estão muito acima do permitido, assim não se enquadrando nos padrões de potabilidade.

Quanto para a CV, a carreira 1 apresentou uma tendência de aumento, apresentando valores superiores a AB após a hora 3. Esse aumento pode ser relacionado ao desprendimento de flocos formados durante a eletroflotação que vencem o fluxo ascensional de bolhas e caem para o sistema de filtração, visto que os valores de CV são inferiores apresentados após a eletroflotação. Esse comportamento de aumento na cor após a eletroflotação foi observado também por Palani (2019), em pesquisa realizada no mesmo sistema piloto.

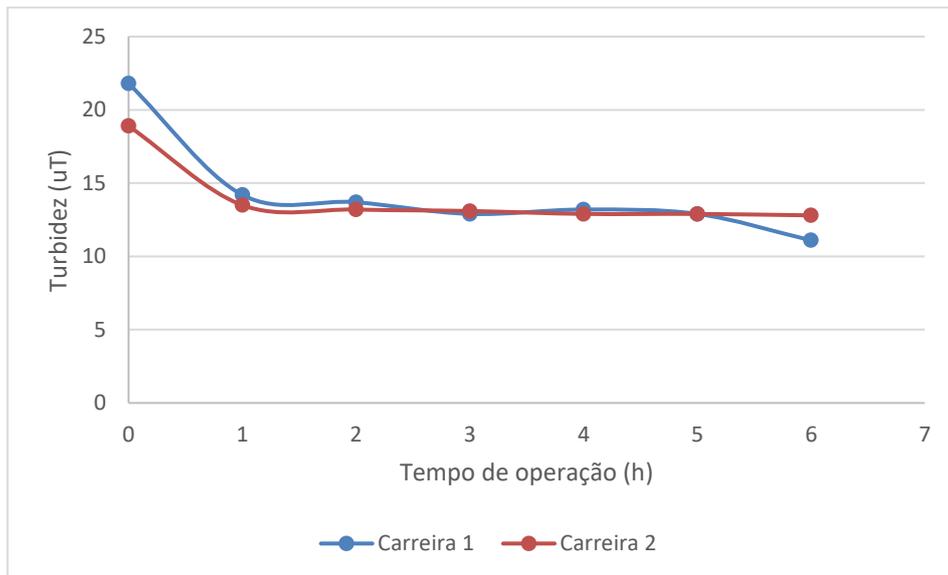
A remoção de CA, em relação a eletroflotação, para as carreiras 1 e 2 está apresentada na Figura 12. Onde a remoção de CA variou entre 33% e 16% na carreira 1 e 23% e 2% na carreira 2.

Figura 12 - Remoção de CA nas carreiras 1 e 2.



Quanto a turbidez, ambas as carreiras apresentaram comportamento similar. A carreira 1 apresentou variação de 14,2 uT a 11,1 uT durante a operação, descontando-se a hora zero onde o valor é equivalente a água bruta. E a carreira 2 iniciou com valor de 13,5 uT na hora 1, e então decrescendo para 12,8 uT no final da operação.

Figura 13 – Turbidez nas carreiras 1 e 2.

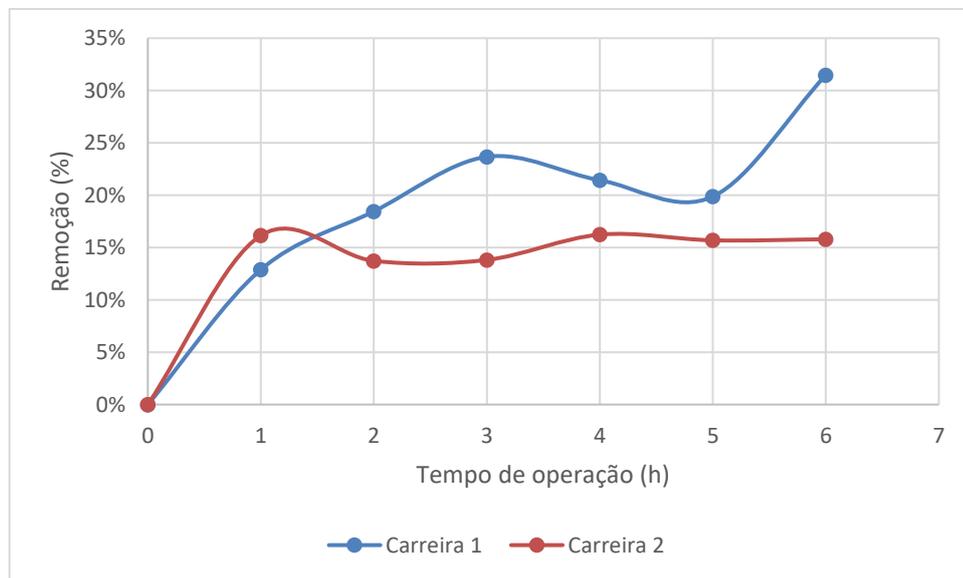


Ao se comparar os valores obtidos em ambas as carreiras, com os padrões de turbidez após a filtração rápida definidas pela Portaria n° 888/2021 do Ministério da Saúde. Os valores obtidos estão de 20 vezes acima dos 0,5 uT permitidos pela portaria, assim as

configurações utilizadas não se enquadram nos padrões estabelecidos pelo Ministério da Saúde, mês ao se comparar os padrões de potabilidade que é de 5 uT.

A remoção de turbidez em relação a eletroflotação, variou durante a carreira 1 com variação 13% na hora 1 e 31% na hora 6. Enquanto na carreira 2 a remoção de turbidez apresentou um comportamento bem estável, variando entre 14% e 16% após a hora 1. E o comportamento da remoção de turbidez ao longo da operação do piloto, para as carreiras 1 e 2, pode ser observado na Figura 14.

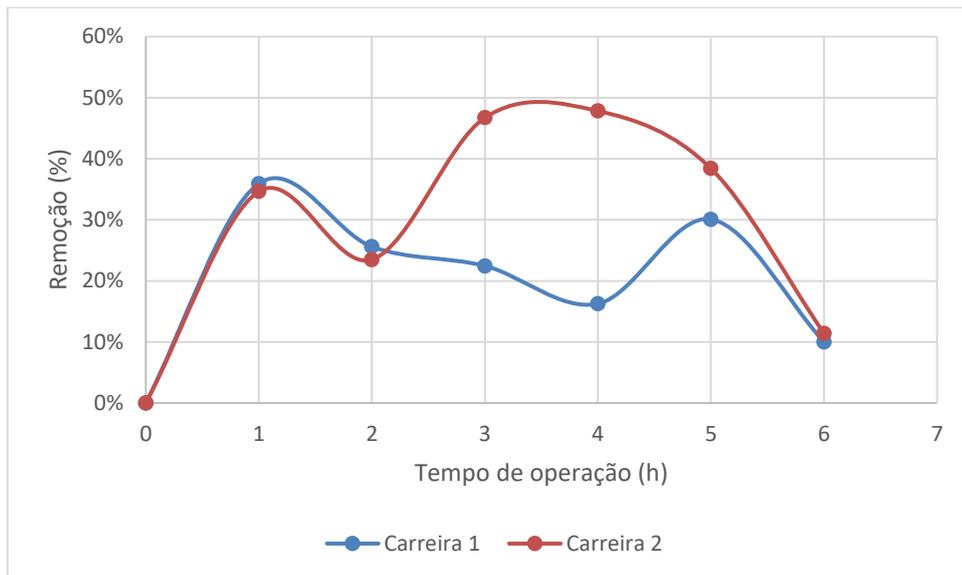
Figura 14 - Remoção de turbidez nas carreiras 1 e 2.



4.2.1.2 Cianobactérias

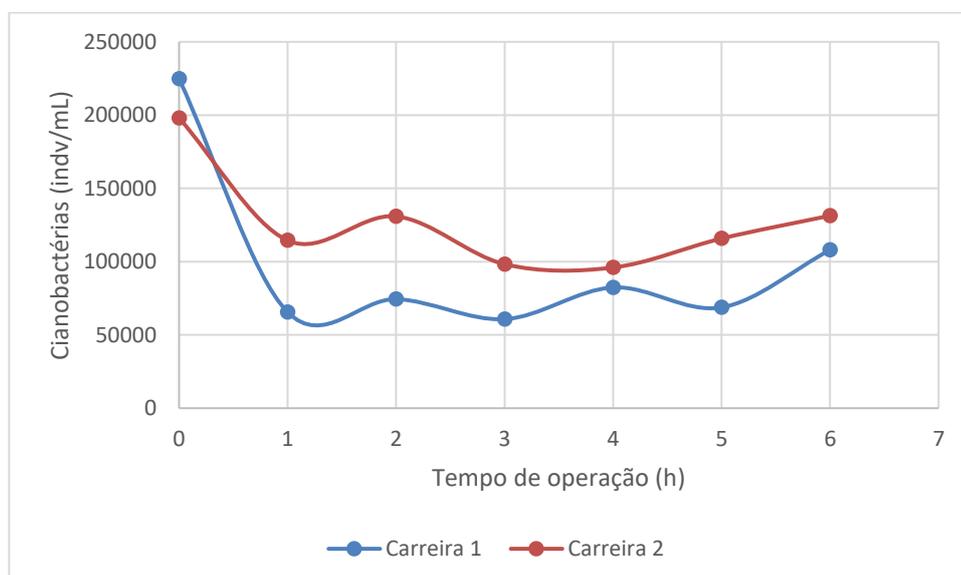
Quanto as cianobactérias, a carreira 1 apresentou variação nos valores de remoção durante a carreira, apresentando o seu pico de remoção de 36% na hora 1 e caindo para 10% ao final da hora 6. Para a carreira 2 os picos de remoção foram durante as horas 3 e 4 com remoções de 47 e 48%, respectivamente, conforme pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 - Remoção de cianobactérias nas carreiras 1 e 2.



Apesar da remoção observada, a concentração de cianobactérias na água filtrada apresentou picos de 131400 ind/mL para a carreira 2 e 108000 ind/mL para a carreira 1, sendo concentrações expressivas de cianobactérias no meio aquático. Segundo a Portaria nº 888/2021 do MS, mananciais com concentração de cianobactérias superiores a 20000 ind/mL, devem realizar a análise de cianotoxinas semanalmente. As concentrações de cianobactérias durante a operação das carreiras estão mostradas na Figura 16.

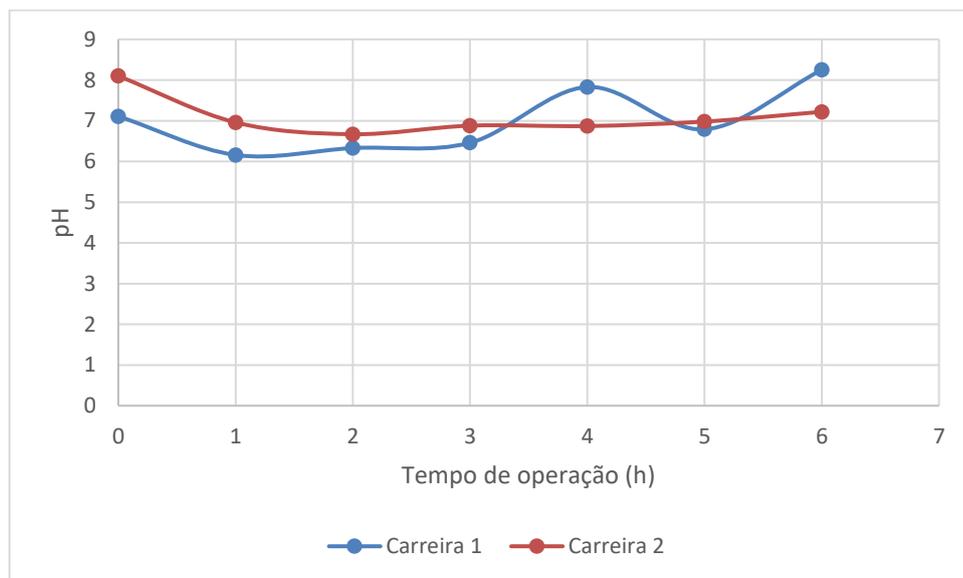
Figura 16 - Concentração de cianobactérias nas carreiras 1 e 2.



4.2.1.3 pH, condutividade e temperatura

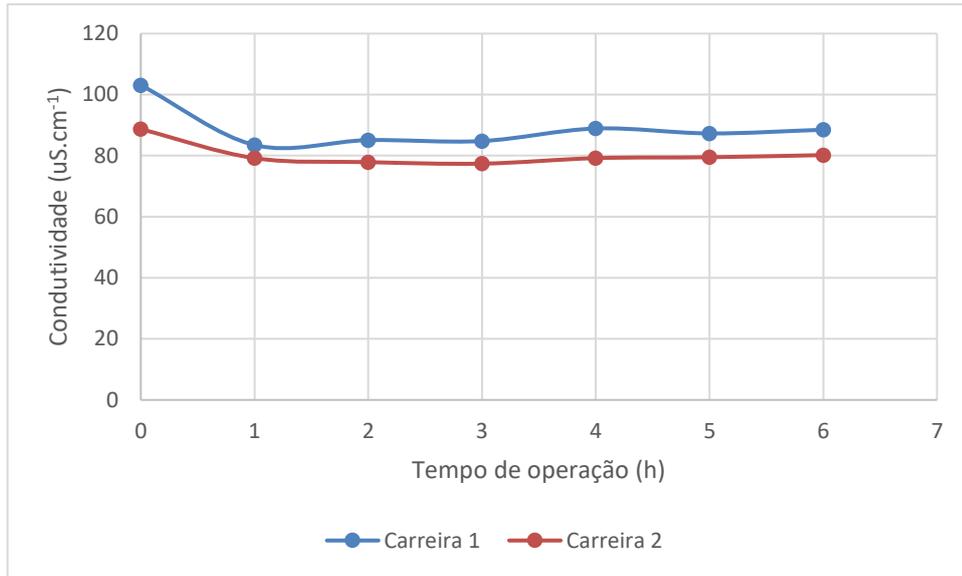
Quanto ao pH, a carreira 2 apresentou estabilidade durante toda a carreira, tendo o seu pH sempre próximo a neutralidade, com valores entre 6,67 e 7,22 após a hora 1. E a carreira 1 apresentou 2 picos nas horas 4 e 6, chegando a valores perto de 8, como mostrado na Figura 17. Existem duas hipóteses para este comportamento, as reações de eletrólise que ocorrem no ânodo produzindo íons OH^- (CHEN, X.; CHEN; YUE, 2002). Ou alguma alteração durante as leituras visto que o pico na hora 6 pode se observar que os valores para a AB e AE, vide Apêndice A, também estão próximos a 8, sendo que a AB somente fica submetida a recirculação dentro do reservatório, não tendo assim motivos para aumento no seu pH.

Figura 17 - pH durante as carreiras 1 e 2.



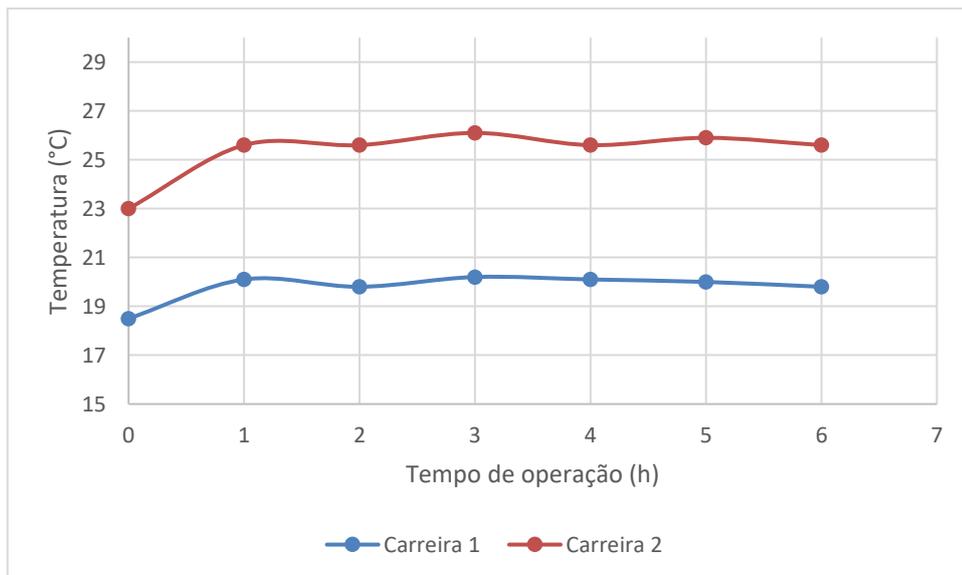
Os picos iniciais de $103,1 \text{ uS.cm}^{-1}$ para a carreira 1 e $88,7 \text{ uS.cm}^{-1}$ na carreira 2 é devido a adição de NaCl para se iniciar a operação da fonte de tensão, assim aumentando a condutividade do meio aquoso. Após o pico inicial a condutividade se manteve estável para ambas as carreiras, com valores entre $88,9$ e $83,5 \text{ uS.cm}^{-1}$ na carreira 1, e entre $77,4$ e $80,2 \text{ uS.cm}^{-1}$ na carreira 2, como mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Condutividade nas carreiras 1 e 2.



A temperatura se manteve estável durante toda a operação para ambas as carreiras, apresentando um pequeno aumento de 1,5 °C em relação a AB, como pode ser observado na Figura 19. Esse aumento se dá devido as resistências elétricas entre cátodos e ânodos dissipando energia em forma de calor e elevando a temperatura do meio, conhecido como efeito Joule.

Figura 19 - Temperatura nas carreiras 1 e 2.



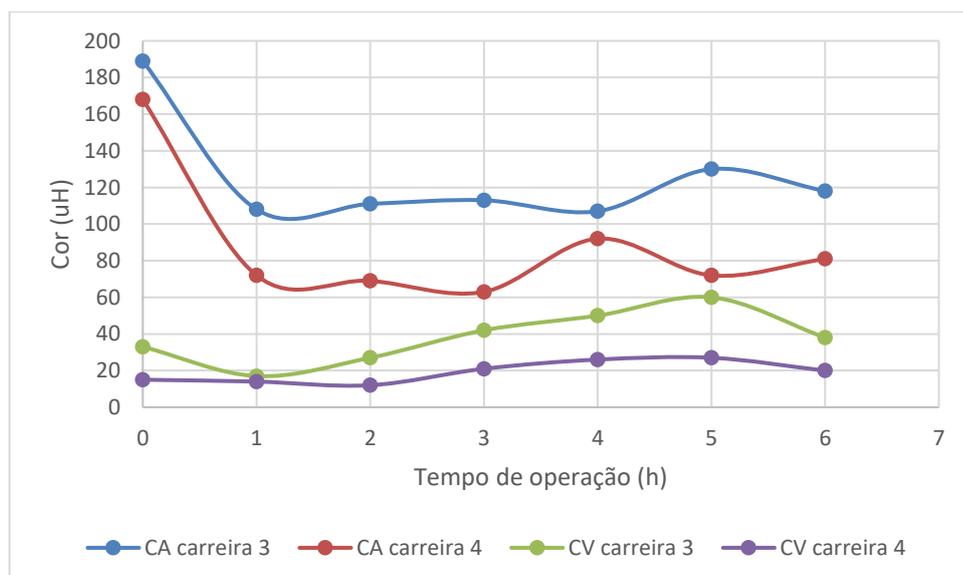
4.2.2 Areia e antracito

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas carreiras 3 e 4, referentes as duas carreiras realizadas utilizando a combinação de areia e antracito como material filtrante. Os resultados das análises realizadas estão apresentados no Apêndice B. Os tópicos discutidos serão organizados igualmente a seção anterior.

4.2.2.1 Cor e turbidez

Os valores de CA para as carreiras 3 e 4 estão mostrados na Figura 20. A carreira 3 não apresentou grande variação quanto aos valores de CA após a hora inicial, apresentando valores entre 107 uH e 130 uH. Enquanto a carreira 4 apresentou valores entre 63 uH e 92 uH, após a hora inicial. Quanto a CV, foi observada uma tendência de aumento nas carreiras 3 e 4, como mostrado na Figura 20. Sendo que a carreira 3 teve um aumento de 352%, iniciando em 17 uH e tendo o pico em 60 uH. E a carreira 4 apresentou um aumento de 337,5% iniciando em 8 uH e o seu pico em 27 uH. O aumento da CV já foi observado em outros estudos utilizando eletroflotação, segundo Leme (2020) o aumento da CV pode estar realizado com a produção de íons durante a eletroflotação, além da utilização de NaCl.

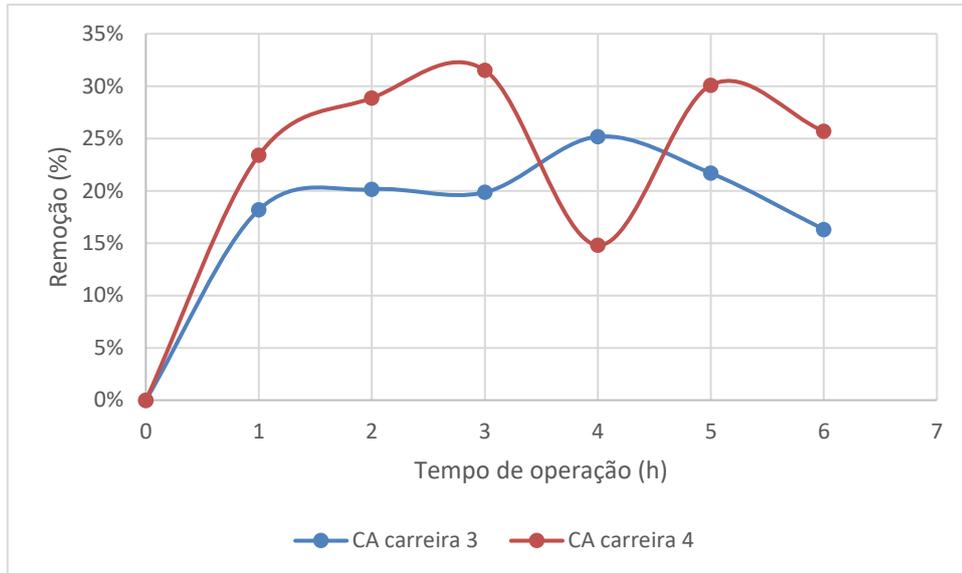
Figura 20 - CA e CV nas carreiras 3 e 4.



Novamente os valores de CA são bem superiores aos 15 uT do padrão de potabilidade indicados pela Portaria nº 888/2021 do MS.

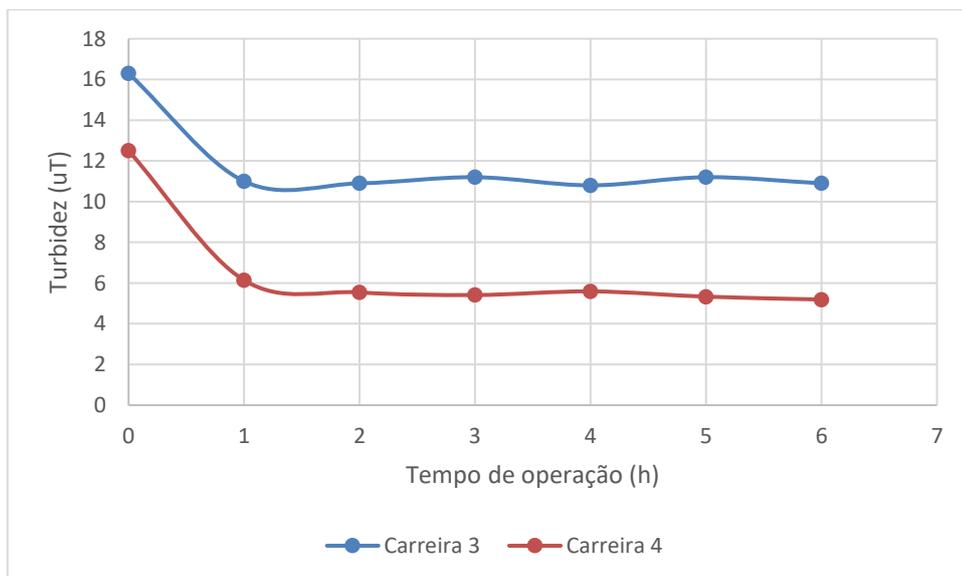
Quanto a remoção de cor aparente, a carreira 3 apresentou um pico de 25% na hora 4 e a carreira 4 apresentou seu pico de 32% na hora 3, em seguida apresentando sua menor remoção de 15% na hora 4. Os valores de remoção de CA estão mostrados na Figura 21.

Figura 21 - Remoção de CA carreiras 3 e 4.



A turbidez permaneceu bastante estável após a primeira hora nas carreiras 3 e 4, apresentando valores entre 10,8 uT e 11,2 uT para a carreira 3. E valores entre 5,19 uT e 6,14 uT para a carreira 4, como mostrado na Figura 22.

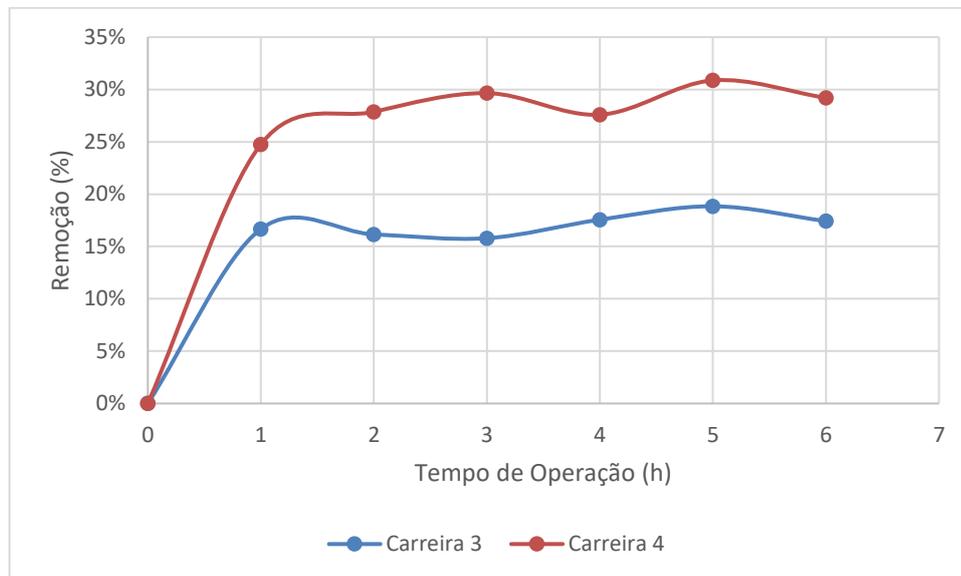
Figura 22 – Turbidez nas carreiras 3 e 4.



Os valores de turbidez ficaram acima do padrão de potabilidade de 5 uT, conforme indicado pela Portaria n° 888/2021 do MS.

Quanto a remoção de turbidez, em relação a eletroflotação, a carreira 3 apresentou bastante constância com a maior remoção de 19% na hora 5. A carreira 4 apresentou comportamento bem estável quanto a remoção de turbidez, com valor mínimo de 25% e máximo de 31%. Os valores de remoção de turbidez estão mostrados na figura 23.

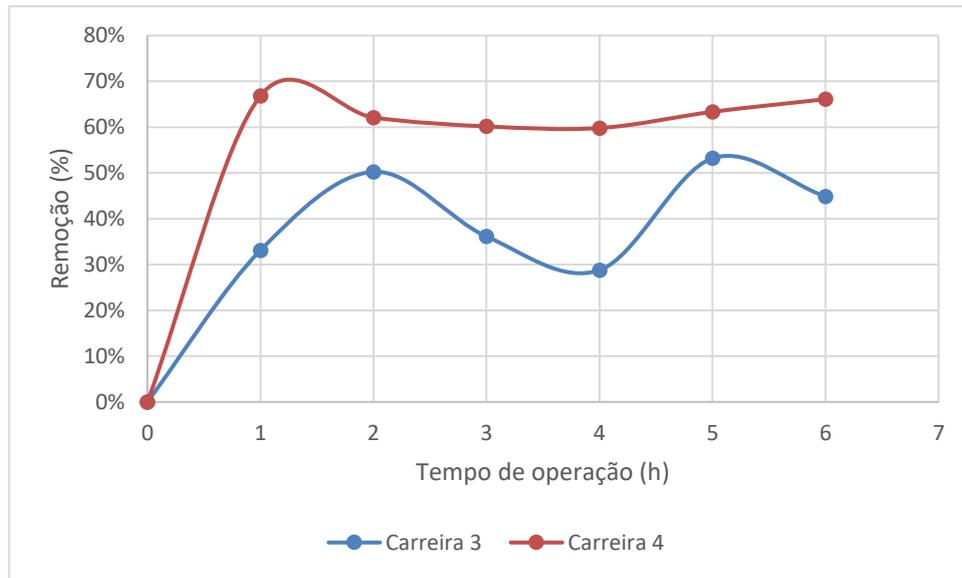
Figura 23 - Remoção de turbidez nas carreiras 3 e 4.



4.2.2.2 *Cianobactérias*

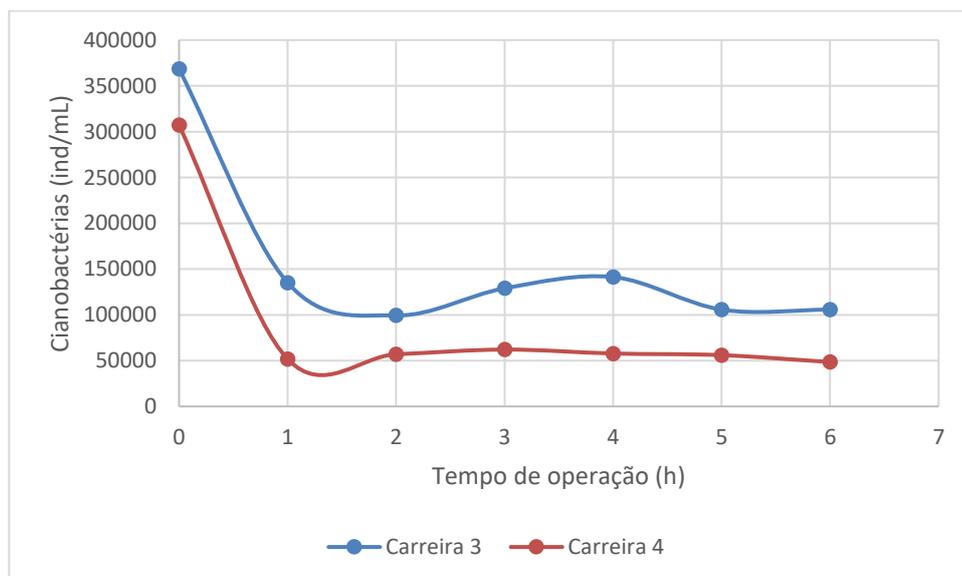
Em relação as cianobactérias, a carreira 3 apresentou variação de remoção, em relação a eletroflotação, entre 29% e 53% durante a carreira, enquanto a carreira 4 apresentou valores iguais ou superiores a 60% durante todo o período de operação, apresentando o melhor resultado entre todas as carreiras, como pode ser observado na figura 24.

Figura 24 - Remoção de cianobactérias nas carreiras 3 e 4.



A concentração de cianobactérias durante a carreira 3 apresentou uma variação durante as horas 3 e 4, com um pico de concentração de 141300 ind/mL. Enquanto na carreira 4 as concentrações de cianobactérias se mantiveram próximo a 60000 ind/mL após a hora inicial de operação, como mostrado na Figura 25. Os valores de concentração de cianobactérias novamente foram superiores a 20000 ind/mL, indicando a necessidade de controle de cianotoxinas devido a alta concentração de células.

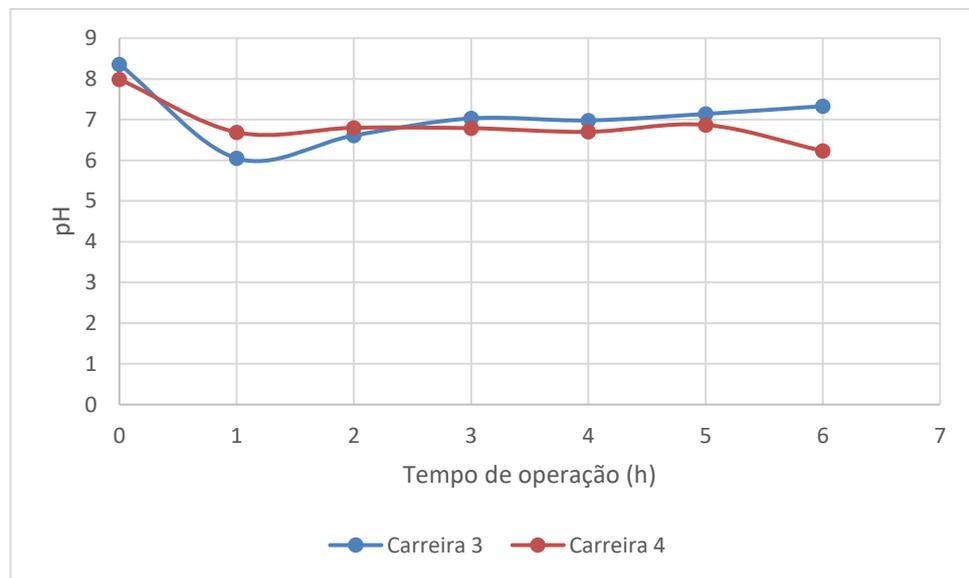
Figura 25 - Concentração de cianobactérias nas carreiras 3 e 4.



4.2.2.3 pH, condutividade e temperatura

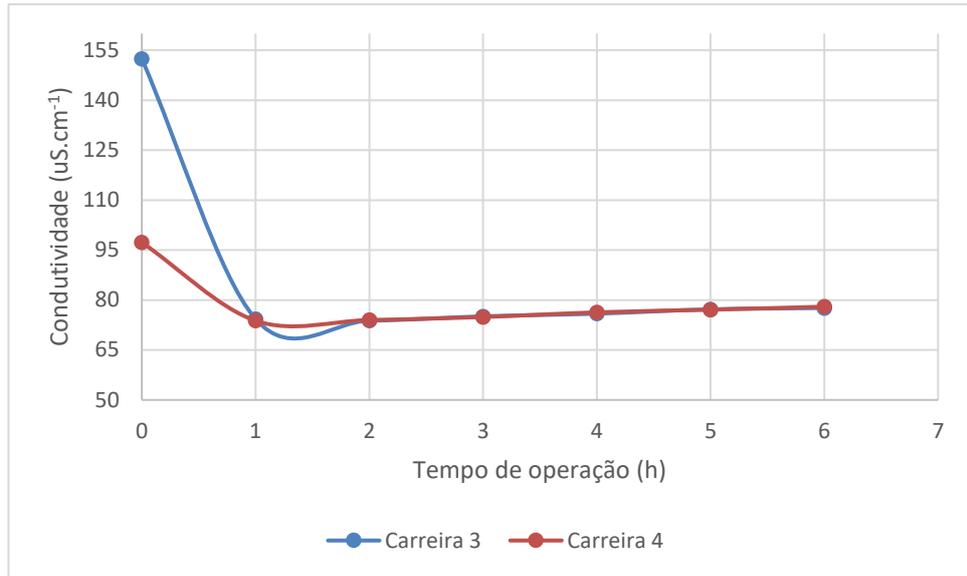
O pH da carreira 3 iniciou com o valor de 6,05 na hora 1, aumentando durante a hora 2 e estabilizando em valores próximos ao neutro (7,03 – 7,33) durante o restante do tempo de operação. Enquanto para a carreira 4 o pH se manteve próximo a neutralidade durante as horas 1 a 5 (6,69 – 6,87), diminuindo para 6,23 na última hora de operação, como mostrado na Figura 26.

Figura 26 - pH nas carreiras 3 e 4.



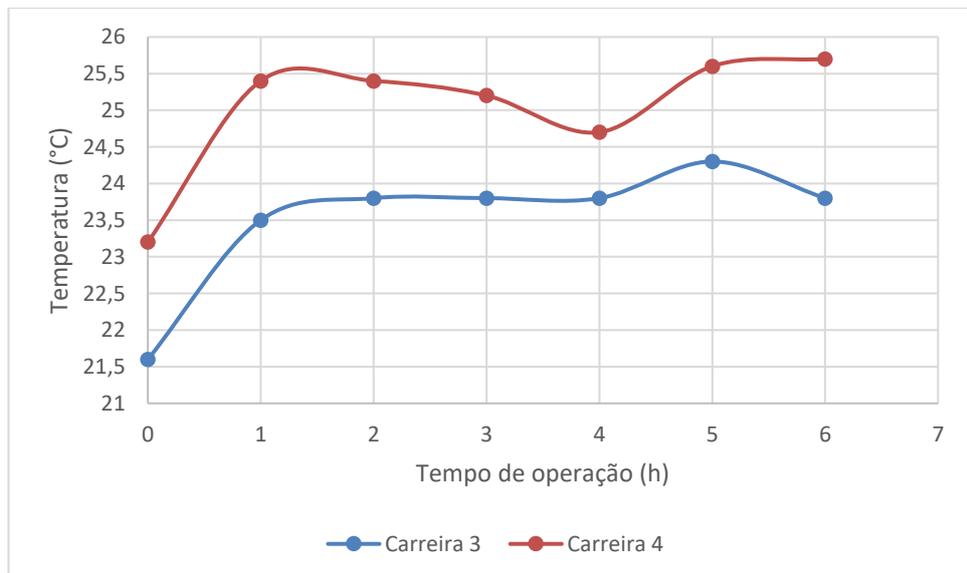
Na Figura 27 é possível ver os valores de condutividade durante a operação das carreiras, ambas apresentando um pico inicial devido a adição de NaCl para iniciar a fonte de tensão. E então estabilizando em valores próximos a 75 uS.cm^{-1} em ambas as carreiras.

Figura 27 - Condutividade nas carreiras 3 e 4.



A temperatura apresentou um aumento de aproximadamente 2 °C durante as carreiras 3 e 4. Possivelmente devido ao efeito da resistência elétrica como mencionado na seção 4.2.1.3, e também possivelmente devido a utilização de uma bomba centrífuga para recirculação da água bruta, que causa também um aquecimento na água do reservatório de armazenamento. Os valores de temperatura estão mostrados na Figura 28.

Figura 28 - Temperatura nas carreiras 3 e 4.



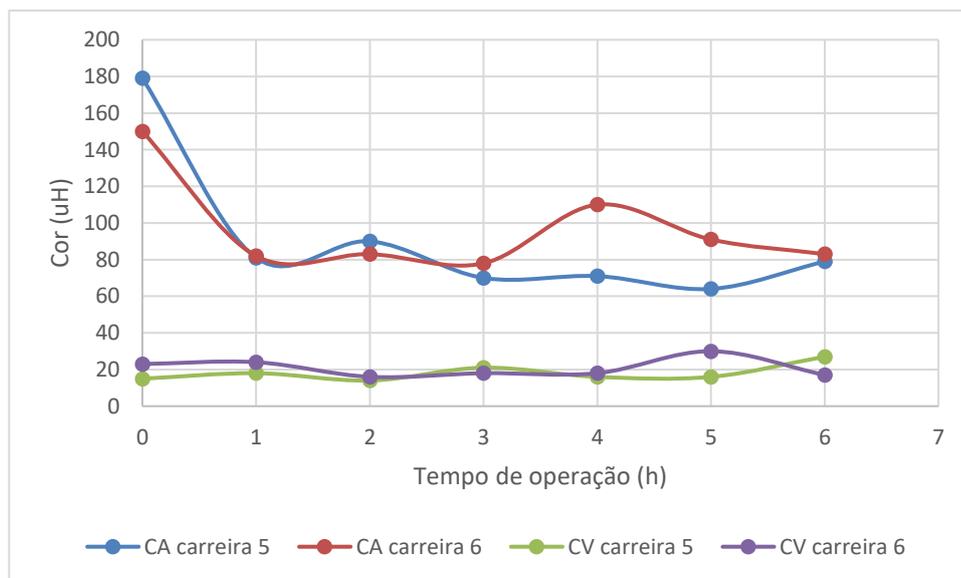
4.2.3 Areia, antracito e esferas de polietileno (EPS)

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos para a última combinação de meio filtrante areia, antracito e EPS, sendo referentes as carreiras 5 e 6. Os resultados serão apresentados novamente em 3 tópicos como nas seções anteriores, e o resumo dos resultados obtidos durante a operação da carreira estão apresentados no Apêndice C.

4.2.3.1 Cor e turbidez

Os valores de CA e CV obtidos durante a operação das carreiras 5 e 6 estão mostrados na Figura 29. Com relação a cor aparente, a carreira 5 apresentou um pico de 90 uH na hora 2, e então apresentando diminuição nas horas seguintes até o valor de 64 uH. Já a carreira 6 apresentou comportamento estável até a hora 3 e um pico de 110 uH na hora 4, voltando então a diminuir nas horas posteriores. Quanto a cor verdadeira a carreira 5 teve um comportamento estável durante a operação apresentando valores entre 14 e 21 uH, e na hora 6 um grande aumento para 27 uH. A carreira 6 apresentou estabilidade quanto a cor verdadeira durante a operação, com somente um pico de 30 uH na hora 5.

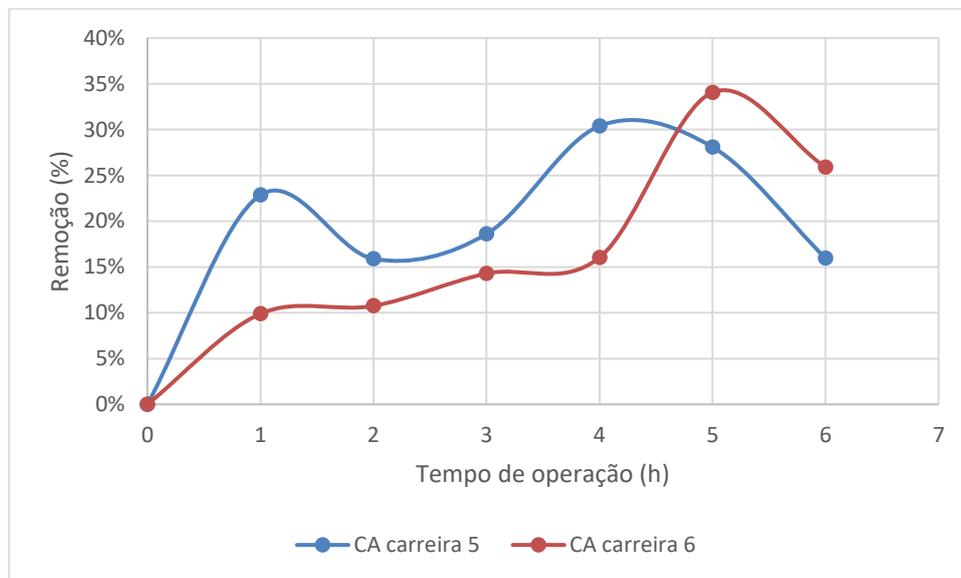
Figura 29 - CA e CV nas carreiras 5 e 6.



Novamente os valores de CA ficaram muito acima do padrão de potabilidade da Portaria n° 888/2021 do MS, de 15 uT e o menor valor obtido entre as carreiras foi de 60 uT. Assim não se enquadrando nos padrões definidos para tratamento de água.

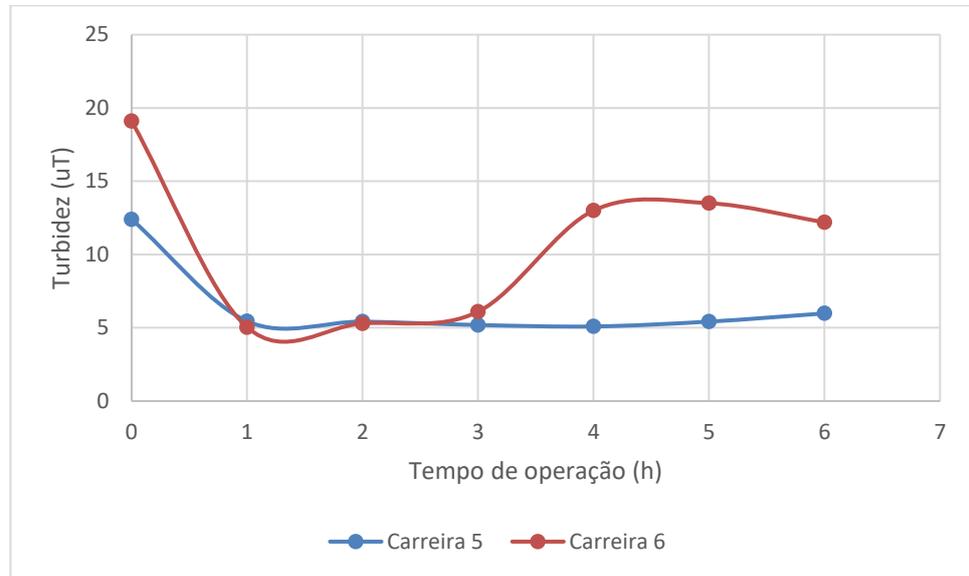
Ao se observar a remoção de cor aparente em relação a eletroflotação, as carreiras apresentaram comportamento estável durante a operação sendo que a carreira 5 apresentou um pico de 30% na hora 4 e a carreira 6 apresentou um pico de 34% na hora 5, como mostrado na figura 30.

Figura 30 - Remoção de CA e CV nas carreiras 5 e 6.



A turbidez se manteve estável durante a carreira 5, com valores entre 5,45 na hora 1, e 5,09 na hora 4. A carreira 6, se mostrou estável quanto a turbidez entre as horas 1 e 3. Então apresentando um aumento após a hora 3, passando de 6,1 uT para 13,0 uT. Esse aumento também foi observado na água eletroflotada, indicando a possibilidade do desprendimento de flocos formados na eletroflotação, diminuindo assim a sua eficiência e aumentando o valor da turbidez na água. Os valores de turbidez podem ser observados na Figura 31.

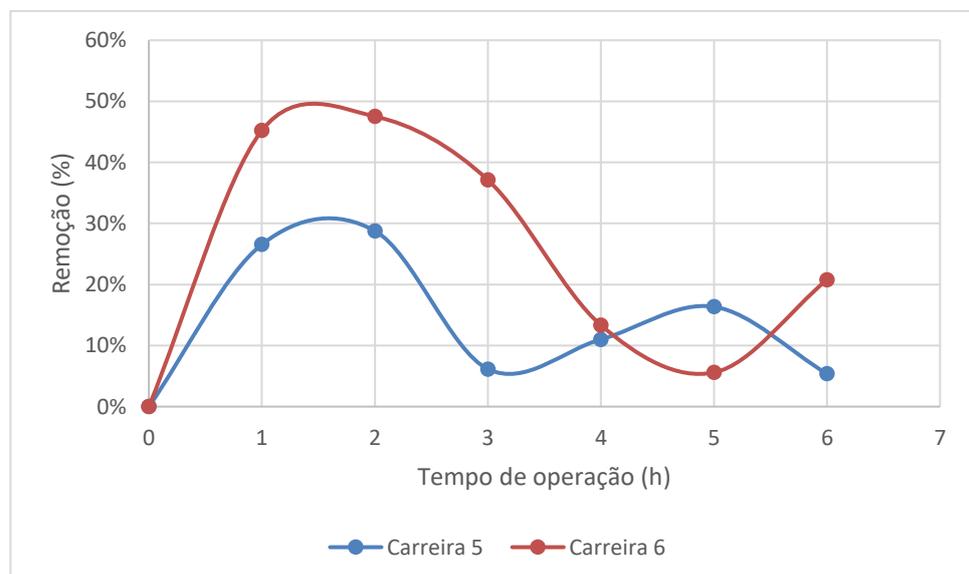
Figura 31 - Turbidez nas carreiras 5 e 6.



Os valores de turbidez ficaram acima do permitido pela Portaria n° 888/2021 do MS, durante a operação das duas carreiras. O valor indicado para a saída de filtração rápida é 0,5 uT, enquanto o menor valor obtido entre as carreiras foi de 5,04 uT estão 10 vezes acima do permitido.

A diminuição da eficiência fica evidente ao se analisar a remoção em relação a eletroflotação, onde na carreira 6 ela cai de 37% na hora 3 para 13% na hora 4. Enquanto na carreira 6 a remoção apresentou um comportamento bem variável variando entre 29% na hora 2 e 6% na hora 3, este comportamento pode ser observado na Figura 32.

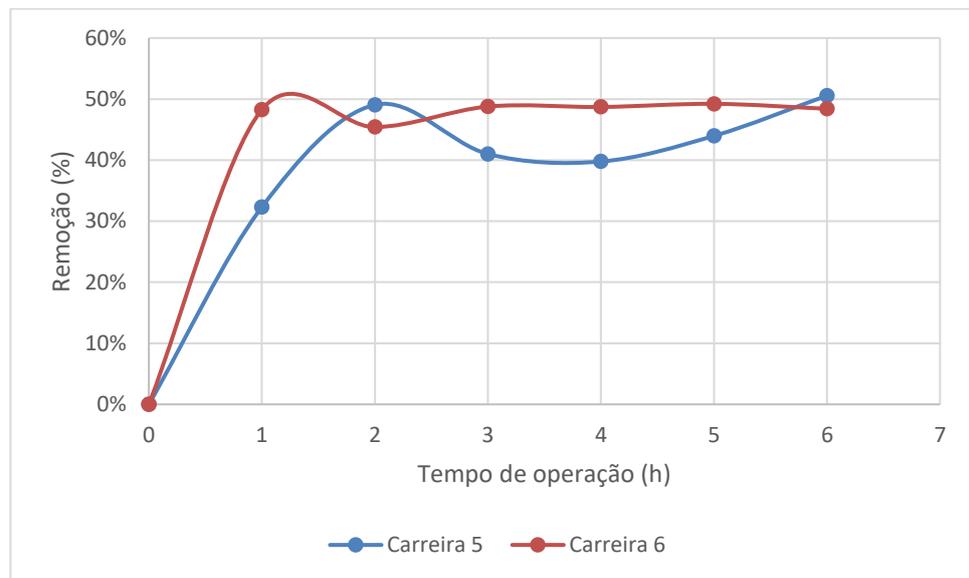
Figura 32 - Remoção de turbidez carreiras 5 e 6.



4.2.3.2 Cianobactérias

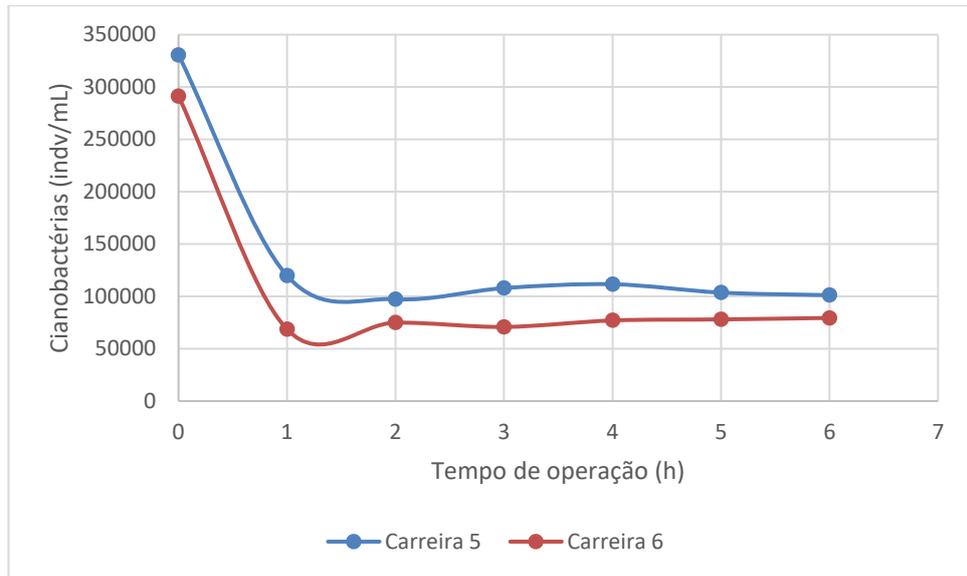
As carreiras 5 e 6 apresentaram comportamento semelhante quanto a remoção de cianobactérias, em relação a eletroflotação, após a primeira hora a carreira 5 apresentou remoção máxima de 51% e a carreira 6 apresentou remoção máxima de 49%, com ambas variando os valores entre 40 e 50% após a hora 1, como mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Remoção de cianobactérias nas carreiras 5 e 6.



As concentrações de cianobactérias variaram entre 32800 ind/mL e 119800 ind/mL para a carreira 5, e valores entre 46200 ind/mL e 79400 ind/mL para a carreira 6, como pode ser observado na Figura 34. O motivo da concentração continuar alta após a filtração pode ser relacionada com a quebra de células no processo de eletroflotação, dificultando a remoção nos filtros como já reportado por Nonato et al. (2020).

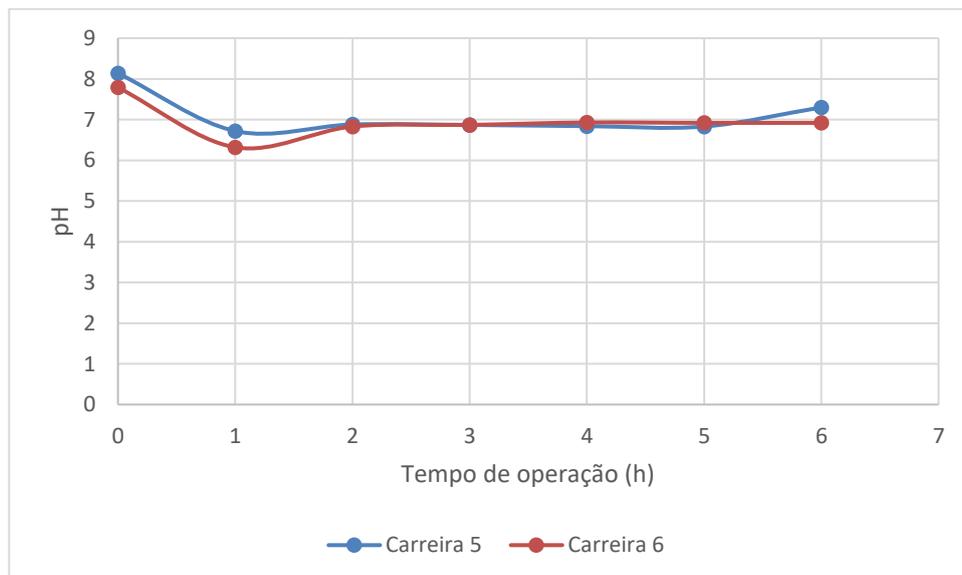
Figura 34 - Concentração de cianobactérias nas carreiras 5 e 6.



4.2.3.3 pH, condutividade e temperatura

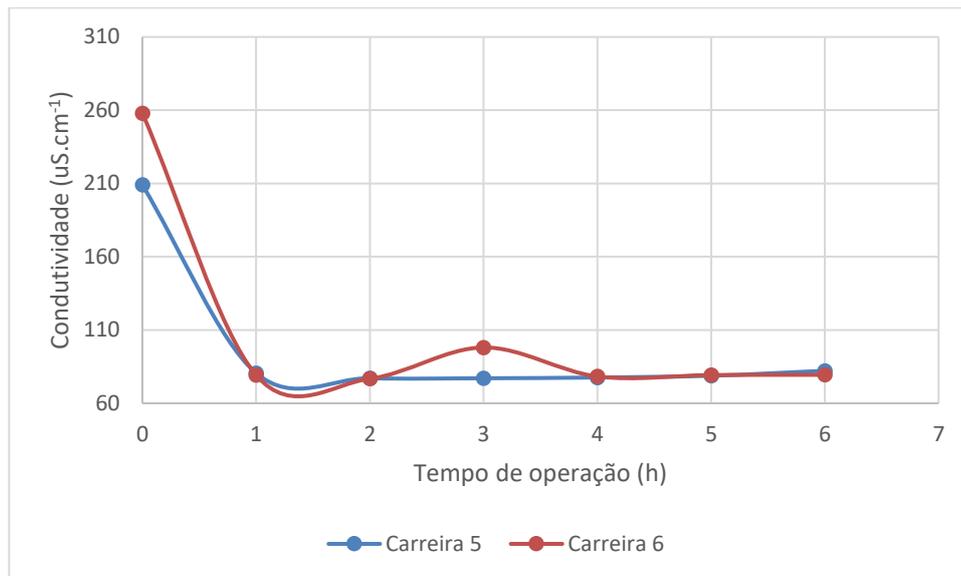
Durante as carreiras 5 e 6 o pH da água se manteve próximo a neutralidade, com valores entre 6,72 e 7,35 para a carreira 5 e 6,32 e 6,93 para a carreira 6. Não apresentando grandes alterações durante o tempo de operação, como pode ser constatado pela Figura 35.

Figura 35 - pH carreiras nas 5 e 6.



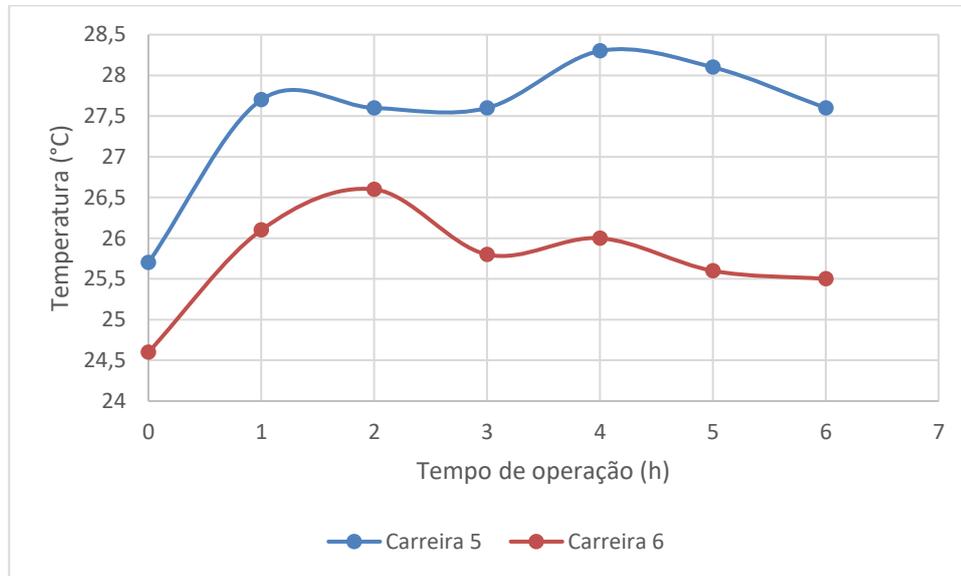
A condutividade se manteve entre $77,1 \text{ uS.cm}^{-1}$ e $88,2 \text{ uS.cm}^{-1}$ durante a carreira 5, não apresentando variações durante a operação. Já para carreira 6 os valores se mantiveram próximos de 80 uS.cm^{-1} , apresentando um pico na hora 3 devido a adição de NaCl para correção de voltagem da fonte de tensão. Os valores de condutividade estão dispostos na Figura 36.

Figura 36 - Condutividade nas carreias 5 e 6.



Quanto a temperatura as carreias 5 e 6 apresentaram uma pequena variação chegando a apresentar acréscimos de até $2,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para a carreira 5 e $1,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para a carreira 6, este comportamento pode ser observado na Figura 37. Essa oscilação novamente pode estar relacionada ao efeito de dissipação de energia elétrica nos eletrodos e a recirculação de água no reservatório de água bruta.

Figura 37 - Temperatura carreiras 5 e 6.



4.3 RETROLAVAGEM

Para a avaliação da retrolavagem foram realizadas análises de cor aparente e turbidez durante os 10 minutos do processo. Os níveis de cor aparente e turbidez média entre as duas carreiras de cada uma das 3 diferentes combinações de meio filtrante durante o processo de retrolavagem, estão apresentados nas Figuras 38 e 39.

Figura 38 - Turbidez durante a retrolavagem.

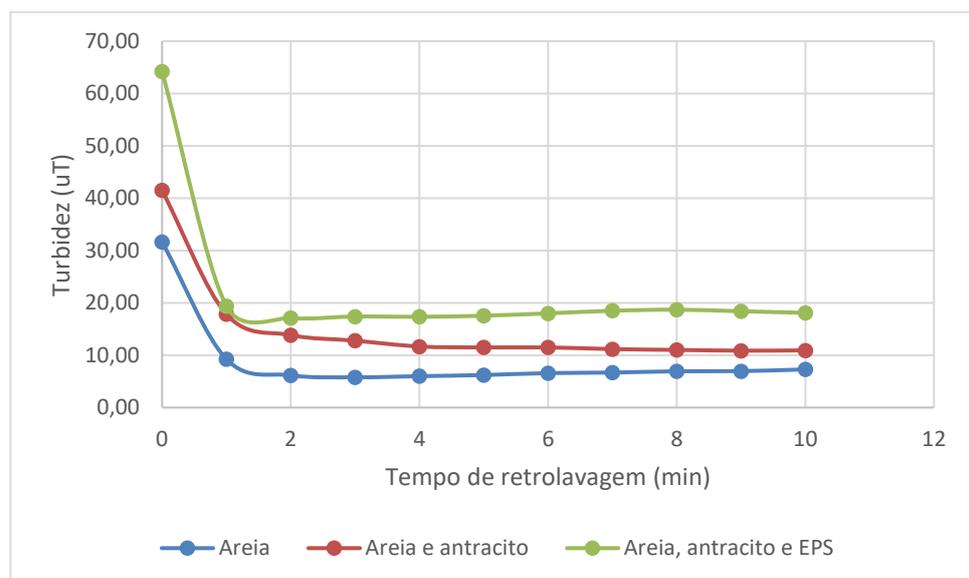
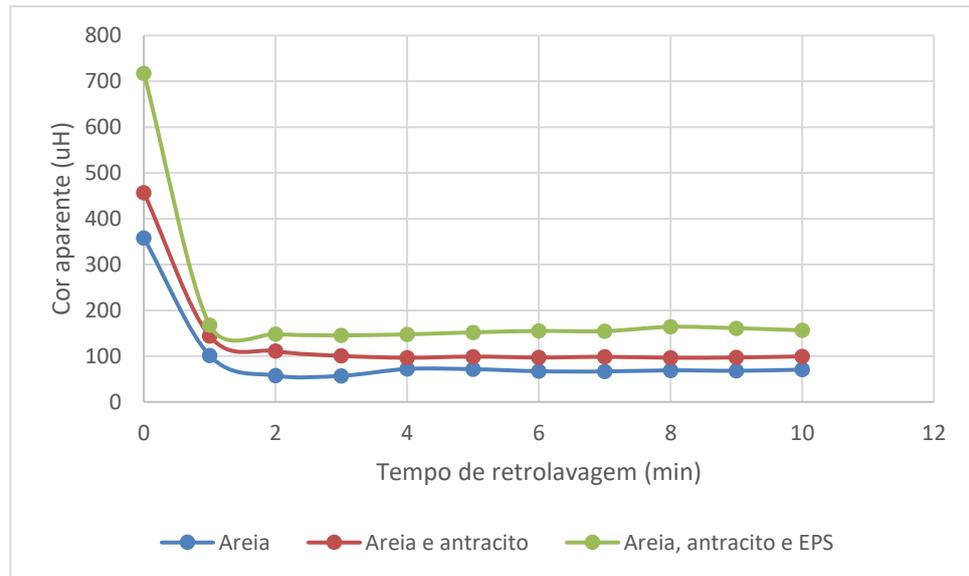


Figura 39 - Cor aparente durante a retrolavagem.



Ao se analisar as curvas fica evidente que a remoção da sujeira do material filtrante ocorre em grande parte no primeiro minuto de retrolavagem. Onde as combinações apresentaram remoção de turbidez 71%, 57% e 78% após o primeiro minuto e remoção de cor aparente de 72%, 68% e 84% após o primeiro minuto, para as combinações 1, 2 e 3 respectivamente. E então mantiveram os valores de cor aparente e turbidez estáveis durante o restante do processo de retrolavagem. Assim ficando evidente que 3 minutos de retrolavagem já seriam suficientes para a limpeza do filtro.

4.4 COMPARAÇÃO DAS COMBINAÇÕES DE MEIO FILTRANTE

Para a comparação dos materiais filtrantes serão utilizados os parâmetros cor aparente, turbidez e cianobactérias. A análise será realizada quanto a remoção percentual em relação a eletroflotação.

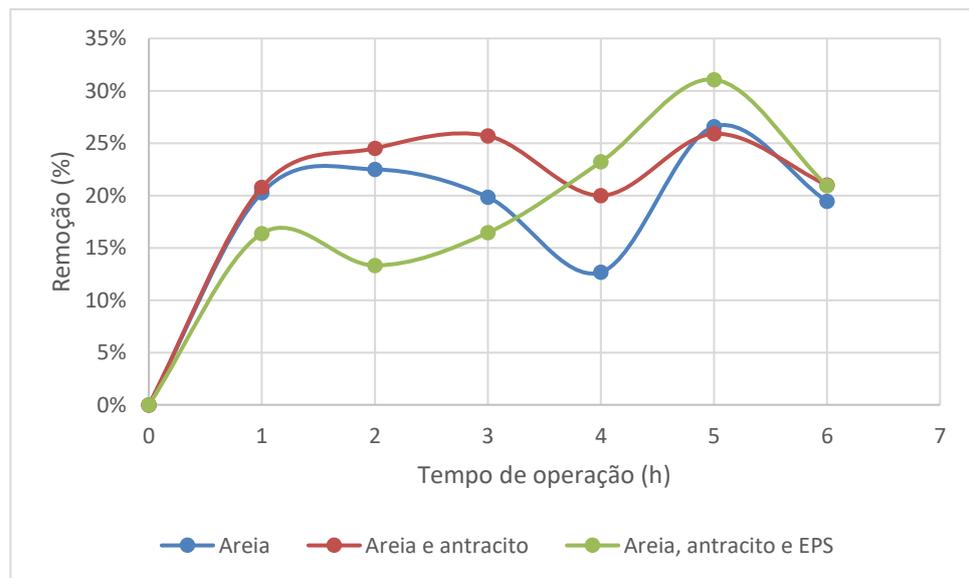
Na Tabela 3, estão apresentados os valores de remoção médio para cada combinação de meio filtrante por hora de operação, e média geral desconsiderando a hora 0, onde a água inicial é equivalente a água bruta no sistema. Sendo a combinação 1 areia, 2 areia e antracito, 3 areia, antracito e EPS.

Tabela 3 - Remoções médias das combinações de material filtrante.

Hora	Cor aparente			Turbidez			Cianobactérias		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	20%	21%	16%	15%	21%	36%	36%	50%	40%
2	22%	25%	13%	16%	22%	38%	25%	56%	47%
3	20%	26%	16%	19%	23%	22%	35%	48%	45%
4	13%	20%	23%	19%	23%	12%	32%	44%	44%
5	27%	26%	31%	18%	25%	11%	34%	58%	47%
6	19%	21%	21%	24%	23%	13%	11%	55%	49%
Média	20%	23%	20%	18%	23%	22%	29%	52%	45%

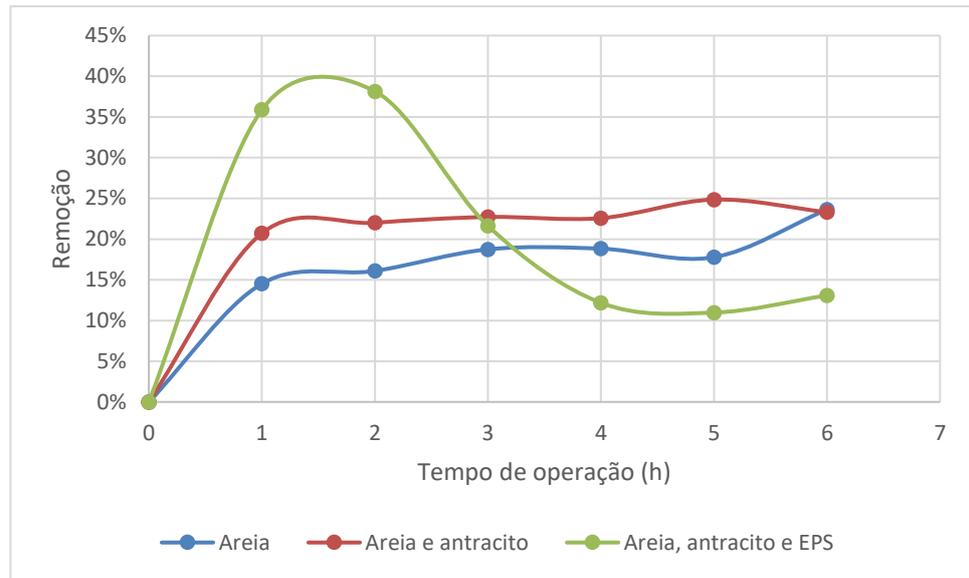
Com relação a cor aparente, as combinações apresentaram eficiências bem próximas com destaque para combinação 2 com média de 23%. Mas a maior remoção percentual ocorrendo na combinação 3 com valor de 31%, como pode ser observado na Figura 40.

Figura 40 - Remoção de cor aparente média.



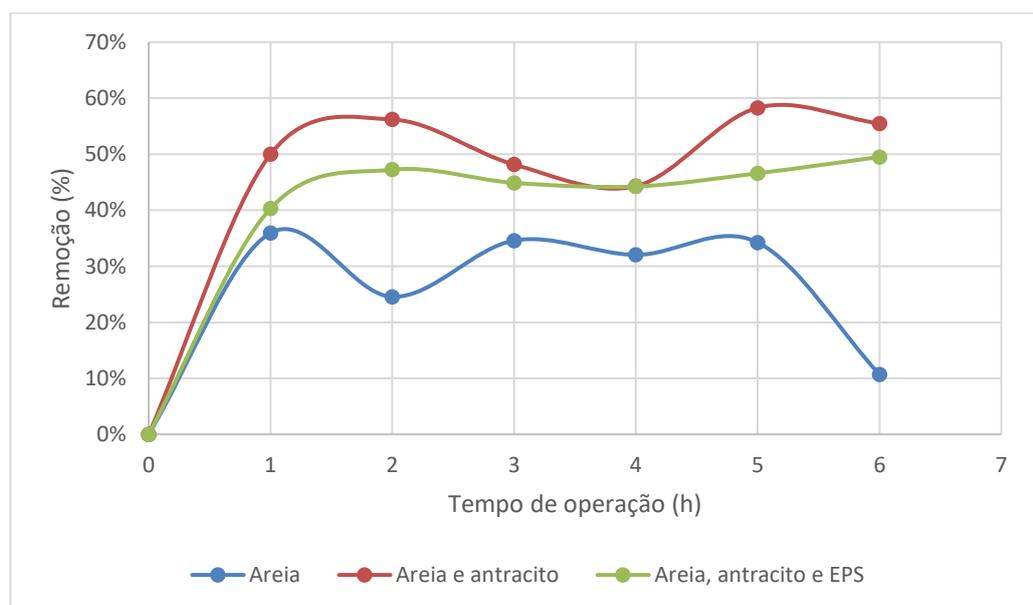
Quanto a turbidez as 3 configurações também apresentaram resultados próximos, podendo se destacar a combinação 2 que apresentou valores mais constantes próximos a 20%, enquanto a combinação 3 apresentou o maior pico de remoção de 38%. Com ambas as combinações apresentando remoção média bem próximas, de 23% pra combinação 2 e 22% para a combinação 3.

Figura 41 - Remoção de turbidez média.



Ao se analisar a remoção de cianobactérias, fica evidente uma grande diferença de eficiência quanto as configurações de meio filtrante. A combinação 1 apresentou remoção média de 29%, com pico de remoção de 36%, enquanto a combinação 2 atingiu um pico de 58% e remoção média de 52% e a configuração 3 apresentou remoção média de 45% e pico de 49%. Ficando evidente uma diferença de desempenho da combinação 2 em relação as outras.

Figura 42 - Remoção média de cianobactérias.



Apesar da remoção de 52% de cianobactérias da combinação 2, as concentrações de cianobactérias se mantiveram bastante elevadas sempre superiores a 51800 ind/mL. Segundo

a Portaria nº 888/2021 do MS para mananciais com concentração de cianobactérias superior a 20000 ind/mL se deve acompanhar a concentração de cianotoxinas semanalmente. O valor obtido é duas vezes superior na água filtrada, mostrando assim a elevada concentração de cianobactérias.

Assim ao se analisar os 3 parâmetros, a melhor configuração quanto a remoção de cor aparente, turbidez e concentração de cianobactérias, foi a configuração 2 com areia e antracito, apresentando a maior remoção média para todos os 3 parâmetros analisados. Podendo se destacar a remoção de cianobactérias de 52%, sendo um valor semelhante ao reportado por Nonato et al. (2020) de 57% em estudo realizado no mesmo sistema piloto e mesma água bruta. As remoções de cor aparente e turbidez foram menos expressivas sendo de 23% para ambas, enquanto os valores reportados por Nonato et al. (2020) foram de 50% para cor aparente e 61% para turbidez.

5 CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos e nos resultados obtidos por esse trabalho, é possível concluir que:

Quanto a granulometria, os materiais filtrantes apresentaram valores dentro do recomendado pela literatura, sendo o diâmetro efetivo de 0,60 mm para a areia e 1,27 mm para o carvão antracito. E coeficiente de uniformidade de 1,4 para ambos os materiais.

Em relação as diferentes combinações de meios filtrantes, ficou evidente que todas as combinações apresentaram baixa remoção de cor aparente (20% para combinação 1, 23% para a 2 e 20% para a 3). E também apresentaram baixa eficiência quanto a remoção de turbidez sendo 18% de remoção para a combinação 1, 23% para a combinação 2 e 22% para a combinação 3.

Já em relação as cianobactérias, as 3 combinações apresentaram resultados bastante variados sendo que a combinação 1, somente com areia, apresentou o pior resultado com remoção de 29%. E as combinações 2 e 3 apresentaram remoções mais significativas de cianobactérias, sendo de 52% para a combinação 2 e de 45% para a combinação 3.

Quanto a turbidez, o tempo de retrolavagem utilizado poderia ser reduzido para 3 minutos, visto que a remoção de sujeiras do material filtrante ocorreu majoritariamente nos 2 primeiros minutos para todas as combinações.

Então, com base nas análises realizadas, sob as condições realizadas, a combinação de materiais filtrantes que apresentou melhores resultados foi a combinação 2, de areia e antracito, apresentando os melhores resultados de remoção para os 3 parâmetros analisados.

6 RECOMENDAÇÕES

Este trabalho pode ser considerado uma avaliação inicial da eficiência destes 3 materiais filtrantes e suas configurações, necessitando a avaliação de diferentes configurações e condições de filtração. Assim, para trabalhos futuros se recomenda:

Avaliar um maior número de carreiras com cada configuração, com o objetivo de se avaliar com mais clareza o comportamento de cada meio filtrante utilizado.

Avaliar diferentes configurações de material filtrante, objetivando encontrar outras combinações que possam apresentar melhores resultados para o tratamento de águas contendo cianobactérias.

Realizar o experimento por um período maior de tempo, assim podendo observar e avaliar o comportamento dos materiais filtrantes quanto a sazonalidade do manancial utilizado no estudo.

E por fim utilização da mesma água bruta para carreiras de filtração similares, assim minimizando os efeitos das concentrações iniciais de cianobactérias na água bruta.

REFERÊNCIAS

APHA. Standard Methods for the examination of Water and Wastewater – SMEWW. American Public Health Association – APHA, 22th ed., Washington – USA, 2012.

BERNARDO, L. DI. **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta**. Rio de Janeiro: PROSAB, 2003.

BRINCK, Nádia Cristina Pires. Avaliação do Tipo de Material Filtrante no Comportamento Hidráulico de Filtros Rápidos de Camada Profunda no Tratamento de Águas de Abastecimento. [s. l.], p. 1–393, 2009.

BURGARDT, Tiago. **Eficiência do eletroflota-filtro com eletrodos de titânio DSA® e múltiplas camadas filtrantes na remoção de cianobactérias**. 2019. 104 f. Qualificação (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 11–41, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>

CHEN, Xueming; CHEN, Guohua; YUE, Po Lock. Novel electrode system for electroflotation of wastewater. **Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 778–783, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es011003u>

CHRISTOFFERSEN, Kirsten; KAAS, Hanne. **Toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring, and management**. [S. l.: s. n.], 2000. ISSN 1939-5590.v. 45 Disponível em: <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.5.1212>

CODD, Geoffrey A. Cyanobacterial toxins, the perception of water quality, and the prioritisation of eutrophication control. **Ecological Engineering**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 51–60, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00089-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00089-6)

CRITTENDEN, John C. *et al.* **MWH's Water Treatment**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. v. 4 Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118131473>

DAMAZIO, C. M.; SILVA E SILVA, L. H. CIANOBACTÉRIAS EM ESTEIRAS MICROBIANAS COLOFORMES DA LAGOA PITANGUINHA, RIO DE JANEIRO, BRASIL. **Revista Brasileira de Paleontologia** , v. 9, n. 1, p. 165–170, 2006.

FALCONER, I. R. *et al.* Using activated carbon to remove toxicity from drinking water containing cyanobacterial blooms. **Journal of the American Water Works Association**, [s. l.], v. 81, n. 2, p. 102–106, 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1989.tb03170.x>

FRANCIELI, C. *et al.* ALGAS E CIANOBACTÉRIAS DE AMBIENTES

EXTREMOS DO PANTANAL BRASILEIRO. **Oecologia Australis**, v. 16, n. 4, p. 745–755, 2012.

GARCIA, Telmo Vieira. **Remoção de algas através da eletroflotação: tratamento eletrolítico seguido de filtração direta no tratamento de água de abastecimento**. 2002. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/83184>.

HILBORN, E. D. et al. Algal Bloom – Associated Disease Outbreaks Among Users of Freshwater Lakes — United States , 2009 – 2010. **Morbidity and Mortality Weekly Report**, v. 63, n. 1, p. 11–14, 2014.

HUIJUAN, Liu; XU, Zhao; JIUHUI, Qu. **Electrochemistry for the Environment**. New York, NY: Springer New York, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68318-8>

LAPOLLI, Flávio Rubens; CORAL, Lucila Adriani; RECIO, María Ángeles Lobo. Cianobactérias em Mananciais de Abastecimento Problemática e Métodos de Remoção. **Revista DAE**, [s. l.], v. 59, n. 185, p. 10–17, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/dae.2014.066>

LEME, Julia de Azevedo Silva. **Avaliação da toxicidade de água submetida ao processo de eletroflotação com eletrodos de titânio DSA®**. 2020. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

JUNIOR, W. A. G. **Cianobactérias unicelulares e coloniais de ambientes terrestres de áreas da Mata Atlântica no Estado de São Paulo, Brasil**. [s.l.] Instituto de Botânica da Secretaria do Meio Ambiente, 2012.

LEITE, A. R. DE C.; BIAGIONI, R. C.; SMITH, W. S. Diversidade de cianobactérias em mananciais da bacia do rio Sorocaba, com ênfase nas represas de Itupararanga e Ipaneminha, SP, Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 16, n. 1, p. 11–20, 2018.

LÍLLIAN CANTO DE SÁ, L. et al. Ocorrência de uma floração de cianobactérias tóxicas na margem direita do rio Tapajós, no Município de Santarém (Pará, Brasil). **Rev Pan-Amaz Saude**, v. 1, n. 1, p. 159–166, 2010.

MOLICA, Renato; AZEVEDO, Sandra. Ecophysiology of toxin-producing cyanobacteria. **Oecologia Brasiliensis**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 229–246, 2009. Disponível em:

<https://doi.org/10.4257/oeco.2009.1302.02>

MOUCHET, P.; BONNÉLYE, V. Solving algae problems: French expertise and world-wide applications. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, [s. l.], v. 47, n. 3, p. 125–141, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/aqua.1998.19>

NIAMIEN-EBROTTIE, Julie Estelle *et al.* Cyanobacteria and cyanotoxins in the World : Review. **International Journal of Applied Research**, [s. l.], v. 1, n. 8, p. 563–569, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature25989>

NONATO, Thyara Campos Martins *et al.* Removal of cyanobacteria from supply waters by electroflotation using DSA® electrodes. **DESALINATION AND WATER TREATMENT**, [s. l.], v. 53, n. 9, p. 134–140, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23285>

NONATO, Thyara Campos Martins *et al.* Electroflotation treatment system with down-flow granular filtration (Electroflot-filter) for cyanobacteria removal in drinking water. **Desalination and Water Treatment**, [s. l.], v. 196, p. 76–83, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26048>

OLIVEIRA, J. M. B. Remoção de *Cylindrospermopsis raciborskii* por meio de sedimentação e flotação: avaliação em escala de bancada. Brasília: UNB. Dissertação Mestrado, 2005.

PADISÁK, Judit. **Cylindrospermopsis raciborskii (Woloszynska) Seenayya et Subba Raju, an expanding, highly adaptive cyanobacterium: worldwide distribution and review of its ecology**. [S. l.: s. n.], 1997.

PALANI, V. Evaluation of Cyanobacteria Removal in an Integrated Process of Electroflotation and Rapid Filtration Using Plastic Filter Media. [s. l.], n. March, 2019. Disponível em: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2621011>

PESCARA, I. C. Ocorrência e remoção de contaminantes emergentes por tratamentos convencionais de água e esgoto. **Unicamp**, [s. l.], p. 167, 2014. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/249647/1/Pescara_IgorCardoso_D.pdf

RODRIGUES LUNA, R. Biodiversidade de Cianobactérias e Algas das Represas Billings (Braço Taquacetuba) e Biodiversidade de Cianobactérias e Algas das Represas Billings (Braço Taquacetuba) e Guarapiranga, SP, Brasil, 2008. Tese

SARMA, T. A. **Handbook of Cyanobacteria**. CRC Press, 2012.

SMITH, Gerald J.; DANIELS, Vincent. Algal blooms of the 18th and 19th centuries. **Toxicon**, [s. l.], v. 142, p. 42–44, 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/J.TOXICON.2017.12.049>

SENS, M. L.; MELO FILHO, L. C.; DALSSASSO, R. L.; PROENÇA, L. A. Efficiency of ozonization as pre or posttreatment to the direct descent filtration for the removal of cyanobacteria and saxitoxins. In: Conferência Internacional Água, Cali, 2005. Universidad del Valle, 2005.

SVRCEK, C.; SMITH, D. W. REVIEW / SYNTHÈSE **Cyanobacteria toxins and the current state of knowledge on water treatment options: a review**. 2004.

TEIXEIRA, Ana Raquel. Aplicabilidade da filtração direta para o tratamento de água eutrofizada. [s. l.], p. 114, 2004.

TUCCI, A. et al. Atlas de cianobactérias e microalgas de águas continentais brasileiras. **Instituto de Botânica-Núcleo de Pesquisa em Ficologia**, p. 175, 2012.

WHO. WHO | Guidelines for safe recreational water environments. [s. l.], v. 1, p. 118–127, 2013. Disponível em: http://www.who.int/water_sanitation_health/bathing/srwe1/en/

APÊNDICE A – Resultados das análises das carreiras de filtração 1 e 2 (areia).

Carreira 1.

Tempo (h)	0		1		2		3		4		5		6			
	AB	AE	AF	AE	AF	AE	AF	AE	AF	AE	AF	AE	AF	AB	AE	AF
pH	7,11	7,11	7,11	6,18	6,16	6,3	6,33	6,32	6,46	8,12	7,83	6,77	6,79	8,65	8,42	8,25
Temperatura (°C)	18,5	18,5	18,5	20,4	20,1	19,8	19,8	20	20,2	20	20,1	20,1	20	18,7	20,2	19,8
Condutividade (uS.cm⁻¹)	103,1	103,1	103,1	84	83,5	85,9	85,1	85,6	84,8	88	88,9	87,6	87,3	104,5	88,3	88,5
CA (uH)	192	192	192	158	118	153	119	150	108	147	112	163	110	206	147	124
Turbidez (uT)	21,8	21,8	21,8	16,3	14,2	16,8	13,7	16,9	12,9	16,8	13,2	16,1	12,9	22,3	16,2	11,1
CV (uH)	27	27	27	26	21	28	25	22	28	41	36	42	39	28	28	-
Cianobactérias (ind/mL)	224800	224800	224800	102400	65600	100000	74400	78400	60800	98400	82400	98400	68800	228000	120000	108000

Carreira 2.

Tempo (h)	0		1		2		3		4		5		6			
	AB	AE	AF	AB	AE	AF										
pH	8,1	8,1	8,1	7,15	6,96	6,75	6,67	6,79	6,88	6,9	6,87	7,15	6,98	7,2	7,12	7,22
Temperatura (°C)	23	23	23	25,6	25,6	25,9	25,6	26,1	26,1	26,1	25,6	25,6	25,9	24,4	26	25,6
Condutividade (uS.cm⁻¹)	88,7	88,7	88,7	80,2	79,2	77,87	77,9	78,8	77,4	79,6	79,2	79,9	79,5	89,6	78,9	80,2
CA (uH)	200	200	200	138	117	145	112	137	121	130	128	150	119	197	142	109
Turbidez (uT)	18,9	18,9	18,9	16,1	13,5	15,3	13,2	15,2	13,1	15,4	12,9	15,3	12,9	19,1	15,2	12,8
CV (uH)	23	23	23	19	17	15	12	22	16	35	28	20	23	19	18	18
Cianobactérias (ind/mL)	198000	198000	198000	175180	114480	171100	130900	184500	98300	184000	96000	188000	115800	250600	148300	131400

APÊNDICE B – Resultados das análises das carreiras de filtração 3 e 4 (areia + antracito).

Carreira 3.

	0		1		2		3		4		5		6			
	AB	AE	AF	AB	AE	AF										
pH	8,36	8,36	8,36	5,91	6,05	6,72	6,61	7,13	7,03	7,11	6,98	7,16	7,14	7,37	7,31	7,33
Temperatura (°C)	21,6	21,6	21,6	23,4	23,5	24	23,8	23,8	23,8	23,9	23,8	24,1	24,3	23,5	25	23,8
Condutividade (uS.cm⁻¹)	152,4	152,4	152,4	79,1	74,3	77,9	73,8	80,6	75,1	79,9	75,9	79,3	77,2	88,8	78,5	77,6
CA (uH)	189	189	189	132	108	139	111	141	113	143	107	166	130	212	141	118
Turbidez (uT)	16,3	16,3	16,3	13,2	11	10,9	11	12,6	11,2	13,1	10,8	13,8	11,2	20,4	13,2	10,9
CV (uH)	33	33	33	17	17	36	27	33	42	40	50	51	60	41	34	38
Cianobactérias (ind/mL)	368400	368400	368400	202100	135200	199800	99400	202000	129000	198400	141300	225900	105700	343600	191700	105700

Carreira 4.

	0		1		2		3		4		5		6			
	AB	AE	AF	AB	AE	AF										
pH	7,99	7,99	7,99	7,03	6,69	7,09	6,8	7,12	6,79	6,74	6,7	6,85	6,87	7,15	6,12	6,23
Temperatura (°C)	23,2	23,2	23,2	25,1	25,4	24,9	25,4	25,1	25,2	25,4	24,7	25,5	25,6	23,9	25,5	25,7
Condutividade (uS.cm⁻¹)	97,3	97,3	97,3	76,7	73,8	76,6	74	78	74,9	77,2	76,3	79,3	77,1	91,8	81,2	78
CA (uH)	168	168	168	94	72	97	69	92	63	108	92	103	72	155	109	81
Turbidez (uT)	12,5	12,5	12,5	8,16	6,14	7,68	5,54	7,69	5,41	7,72	5,59	7,71	5,33	10,3	7,33	5,19
CV (uH)	15	15	15	11	14	10	12	18	21	29	26	21	27	-	33	20
Cianobactérias (ind/mL)	307200	307200	307200	156200	51800	150300	56900	155900	62100	143800	57800	152800	56000	268300	143100	48500

APÊNDICE C – Resultados das análises das carreiras de filtração 5 e 6 (areia + antracito + esferas de polietileno).

Carreira 5.

	0			1		2		3		4		5		6		
	AB	AE	AF	AE	AF	AE	AF	AE	AF	AE	AF	AE	AF	AB	AE	AF
pH	8,14	8,14	8,14	6,87	6,72	7,54	6,88	7,03	6,87	7	6,84	6,98	6,83	7,19	7,08	7,3
Temperatura (°C)	25,7	25,7	25,7	28,2	27,7	27,4	27,6	25,5	27,6	28,1	28,3	27,8	28,1	25,6	27,9	27,6
Condutividade (uS.cm⁻¹)	209	209	209	77,4	80,6	88,7	77,1	77,6	77,1	84	77,6	77,9	78,8	92,7	78,8	82,2
CA (uH)	179	179	179	105	81	107	90	86	70	102	71	89	64	139	94	79
Turbidez (uT)	12,4	12,4	12,4	7,42	5,45	7,61	5,42	5,19	5,53	5,72	5,09	6,48	5,42	10,5	6,32	5,98
CV (uH)	15	15	15	29	18	17	14	16	21	21	16	13	16	28	19	27
Cianobactérias (ind/mL)	330700	330700	330700	177000	119800	191000	97300	182900	107900	185300	111600	184900	103600	343100	204500	101100

Carreira 6.

	0			1		2		3		4		5		6		
	AB	AE	AF	AE	AF	AE	AF	AE	AF	AE	AF	AE	AF	AB	AE	AF
pH	7,79	7,79	7,79	6,55	6,32	6,84	6,83	6,83	6,87	6,94	6,93	6,91	6,92	7,55	6,91	6,92
Temperatura (°C)	24,6	24,6	24,6	26,8	26,1	26,1	26,6	26,1	25,8	25,6	26	25,8	25,6	24,1	26	25,5
Condutividade (uS.cm⁻¹)	258	258	258	75,2	79,2	76,8	76,8	77,5	98,1	78	78,3	78	79,3	90	77,3	79,4
CA (uH)	150	150	150	91	82	93	83	91	78	131	110	138	91	147	112	83
Turbidez (uT)	19,1	19,1	19,1	9,2	5,04	10,1	5,3	9,7	6,1	15	13	14,3	13,5	18,2	15,4	12,2
CV (uH)	23	23	23	19	24	15	16	15	18	20	18	24	30	17	19	17
Cianobactérias (ind/mL)	291300	291300	291300	132600	68600	137200	74900	138200	70800	150100	77000	153600	78000	299500	153900	79400