



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LOUYSE DAYANE SILVA DE OLIVEIRA

**DESEMPENHO DE SISTEMA DE DUPLA FILTRAÇÃO
PARA CLARIFICAÇÃO DE ÁGUA**

NATAL-RN

2019

LOUYSE DAYANE SILVA DE OLIVEIRA

**DESEMPENHO DE SISTEMA DE DUPLA FILTRAÇÃO PARA
CLARIFICAÇÃO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Delgado Tinôco.

Natal-RN

2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Oliveira, Louyse Dayane Silva de.

Desempenho de sistema de dupla filtração para clarificação de água / Louyse Dayane Silva de Oliveira. - 2019.
33 f.: il.

Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental. Natal, RN, 2019.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Delgado Tinôco.

1. Tratamento de água - Monografia. 2. Filtração da água - Processo - Monografia. 3. Dupla filtração da água - Processo - Monografia. 4. Oxidação - Monografia. I. Tinôco, Juliana Delgado. II. Título.

LOUYSE DAYANE SILVA DE OLIVEIRA

DESEMPENHO DE SISTEMA DE DUPLA FILTRAÇÃO PARA CLARIFICAÇÃO
DE ÁGUA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental da Universidade Federal do
Rio Grande do Norte como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Profa. Dra. Juliana Delgado Tinôco (UFRN) – Orientadora

Prof. Dr. Paulo Eduardo Vieira Cunha (UFRN) – Examinador Interno

Prof. Dr. Marco Antonio Calazans Duarte (IFRN) – Examinador Externo

Natal-RN

2019

"O futuro da humanidade está nas mãos daqueles que são capazes de transmitir às gerações do amanhã razões de vida e de esperança."

São João Paulo II.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a Deus por, ao longo deste processo complicado e desgastante, me ter feito ver o caminho, nos momentos em que pensei em desistir.

Gostaria de agradecer a minha professora orientadora Juliana Tinôco, que ao longo desse trabalho esteve sempre prestativa e paciente para me ensinar e mostrar os melhores caminhos, pelas suas correções e incentivos.

Agradeço a minha mãe Maria Dalva heroína que me deu apoio mesmo sem entender o que passei nesse tempo, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. Mãe, eu te amo muito, obrigada.

Agradeço ao meu esposo Jefferson Heitor, que jamais me negou apoio, carinho e incentivo. Obrigada, amor da minha vida, por aguentar tantas crises de estresse e ansiedade. Sem seu apoio e confiança, esse trabalho não seria possível.

A Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte pela oportunidade de contribuir com o projeto, em especial as minhas queridas amigas Patrícia, Cinthya Gurgel, Marineida Oliveira e Roberta Medeiros, vocês foram pessoas importantes no meu crescimento profissional. Quero também agradecer aos meus amigos do Jiqui, Valéria em especial, por toda paciência e cuidado.

A empresa A&E Equipamentos e serviços Ltda que forneceu a piloto para realização do presente trabalho.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma estiveram presente nessa fase tão longa da minha vida, possibilitando a conclusão de uma grande etapa.

RESUMO

Desempenho de sistema de dupla filtração para clarificação de água

Com a frequente dificuldade tanto por falta de disponibilidade de água quanto pela qualidade, novas tecnologias de tratamento objetivando garantir a qualidade da água no abastecimento e um melhor aproveitamento dos recursos hídricos tem sido alvo de pesquisa e desenvolvimento já alguns anos. A dupla filtração, caracterizada pelo uso de filtração direta ascendente como pré-tratamento para filtração descendente, pode ser ponderada como uma das mais promissoras tecnologias para tratamento de água. Este trabalho consistiu na avaliação do desempenho de uma instalação piloto de dupla filtração no tratamento de água superficial de moderada cor e baixa turbidez. A pesquisa foi realizada em duas fases: na primeira foram efetuados ensaios de caracterização da água bruta do manancial (lagoa do Jiqui, Parnamirim-RN) e ensaios de jar test para definição da dosagem ótima do oxidante (cloro gasoso). A dose do coagulante (hidroxicloreto de alumínio) foi fixado em 10 mg/L. Na segunda etapa iniciaram-se os testes no sistema piloto de dupla filtração, avaliando a eficiência na remoção dos parâmetros cor aparente e turbidez. A operação foi realizada durante um período de um mês, com duração diária de oito horas e com coleta em intervalos de duas horas, totalizando 145 amostras. As taxas de filtração adotadas foram de 144 m³/m².dia para o filtro ascendente de pedregulho e 257 m³/m².dia para os filtros descendente em areia. Em função dos resultados obtidos, foi observado que a pré-oxidação alcançou uma eficiência de remoção de 14%, melhorou a qualidade do efluente do sistema removendo cor aparente, porém, a eficiência global do piloto não foi satisfatória. A turbidez e cor aparente remanescentes estiveram acima dos valores máximos estabelecidos na Portaria de Consolidação N°5/2017 do Ministério da Saúde, em 92,3% e 40% das amostras realizadas, respectivamente.

Palavras-chave: Filtração, oxidação, tratamento de água, dupla filtração.

ABSTRACT

Performance of double filtration system in water clarification

With the frequent difficulty both due to lack of water availability and quality, new treatment technologies aimed at ensuring water quality in supply and better use of water resources have been the target of research and development for some years. Double filtration, characterized by the use of direct upward filtration as a pretreatment for downward filtration, can be considered as one of the most promising technologies for water treatment. This work consisted in evaluating the performance of a double filtration pilot plant in the treatment of moderate color and low turbidity surface water. The research was carried out in two phases: in the first one, it were performed characterization tests of the raw water of the spring (Jiqui lake, Parnamirim-RN) and jar test assays to define the optimal dosage of the oxidant (chlorine gas). The coagulant (aluminum hydroxychloride) dose was fixed at 10 mg / L. In the second stage, the tests were started in the double filtration pilot system, evaluating the efficiency in the removal of apparent color and turbidity parameters. The operation was performed over a period of one month, with a daily duration of eight hours and collection at two-hour intervals, totaling 145 samples. The filtration rates adopted were 144 m³ / m².day for the boulder upward filter and 257 m³ / m².day for the downward filter on sand. Due to the results obtained, it was observed that pre-oxidation improved the effluent quality of the system by removing apparent color, but the overall efficiency of the pilot was not satisfactory. The remaining turbidity and apparent color were above the maximum values established in the Ministry of Health Consolidation Ordinance No. 5/2017, in 92.3% and 40% of the samples, respectively.

Keywords: Filtration, oxidation, water treatment, double filtration.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAIS E MÉTODOS	10
2.1 Área de estudo.....	10
2.2 Instalação piloto de dupla filtração	15
2.4 Etapas dos experimentos.....	19
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
3.1 Caracterização da água bruta e tratada pela ETA Jiqui.....	22
3.2 Ensaio de bancada.....	24
3.3 Resultados da remoção de cor e turbidez na IPDF	25
4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	28
REFERÊNCIAS	29

1. INTRODUÇÃO

Com a frequente escassez dos recursos hídricos, novas tecnologias de tratamento objetivando garantir a qualidade da água dos mananciais e um melhor aproveitamento dos recursos hídricos têm sido alvo de pesquisa e desenvolvimento já alguns anos (SAKAMOTO, 2013). Existem muitas tecnologias e variantes que podem ser empregadas na potabilização da água. No entanto, a seleção final dos processos mais adequados deve ser baseada na segurança e na sustentabilidade do sistema, levando em consideração as características da água bruta e sua variação sazonal. Di Bernardo (2003) afirma que sempre que possível, deve-se investigar em laboratório e em instalações-piloto os parâmetros de projeto e de operação das estações de tratamento de água – ETA.

Na potabilização das águas naturais, as tecnologias de tratamento apresentam três fases distintas: clarificação, filtração e desinfecção. Para as águas subterrâneas, com algumas exceções, apenas a desinfecção faz-se necessário (DI BERNARDO, 2003).

Paras as águas superficiais, as tecnologias de tratamento de água para abastecimento humano são classificadas em dois grupos, sem coagulação química e com coagulação química. Ambas podem ou não ser precedidas de pré-tratamento. Com exceção da filtração lenta, as principais tecnologias utilizam a coagulação, exemplificam-se: ciclo completo, filtração direta (ascendente ou descendente), dupla filtração e floto-filtração (DI BERNARDO et al., 2006).

As estações de tratamento de ciclo completo são as mais usuais no Brasil, representavam em 2008, 69,30% do volume de água tratada no país (BRASIL, 2013). São adequadas para águas de turbidez, cor aparente, *Escherichia Coli* e algas de até, 3.000 uT, 1.000 uH, 10^6 NMP/ 100 mL e 10^5 UPA/mL, respectivamente (KAWAMURA, 2000). Com inserção de outras etapas, como pré-oxidação e adsorção, pode-se prestar à potabilização da quase totalidade das águas naturais (LIBÂNIO, 2010). Alternativamente, pode-se ainda substituir a decantação pela flotação, para remoção de cor verdadeira associada ao processo de eutrofização de mananciais.

Dentre as demais tecnologias não-convencionais, a filtração lenta se destaca pela elevada capacidade de remoção de microrganismos, apresenta baixo custo de construção e manutenção, além da simplicidade operacional. No entanto, a filtração lenta é empregada para águas advindas de mananciais de baixa cor aparente (< 20 uH), turbidez (< 10 uT), e algas (< 250 UPA/mL) (KAWAMURA, 2000).

Com relação a filtração direta, a modalidade ascendente, é a mais difundida em diferentes países. No Brasil, em 2008, existiam aproximadamente 560 instalações com essa tecnologia (IBGE, 2008).

Comparando-se com o sistema de ciclo completo, a filtração direta ascendente apresenta algumas vantagens, a saber: menor número de unidades envolvidas; baixa quantidade de coagulante utilizado por volume de água tratada e menor geração de lodo. Essas vantagens favorecem a operação e manutenção e geram economia de recursos (SABOGAL, 2007).

Apesar das vantagens apresentadas, a filtração direta ascendente possui limitações no que diz respeito à qualidade da água bruta a ser tratada, principalmente quando os mananciais possuem elevadas concentrações de algas, cor verdadeira ou de turbidez, ou coliformes, suspeita de presença de vírus, protozoários e outros microrganismos patogênicos, alterações inesperadas dos parâmetros de qualidade, e quando forem indispensáveis altas dosagens de alcalinizante (ou acidificante) e de coagulante. Nessas circunstâncias, é recomendado o tratamento complementar com filtros descendentes, estabelecendo o sistema de dupla filtração (DI BERNARDO, 2003).

Além de apresentar as vantagens referentes à filtração direta ascendente (FDA), a dupla filtração (DF) possibilita tratamento de água de menor qualidade, uso de taxas de filtração mais elevadas no filtro ascendente, proporciona maior segurança quando a qualidade da água apresenta variações bruscas, maior remoção de microrganismos, aumentando a segurança na desinfecção final, e não há necessidade do descarte do efluente do filtro ascendente no início da carreira de filtração devido o fluido ser filtrado posteriormente pelo filtro descendente (DI BERNARDO, 2003)

No Nordeste do Brasil as águas superficiais representam 57% do abastecimento público (BRASIL, 2013). Vários destes mananciais,

especialmente, lagos e açudes (reservatórios artificiais), vêm progressivamente apresentando condições eutróficas e hipereutróficas, inclusive com ocorrência de florações de cianobactérias (TINÔCO, 2011).

Pesquisas realizadas por Dantas (2004) avaliou o desempenho de sistema de dupla filtração no tratamento de água com turbidez elevada com o uso de dois sistemas sendo o primeiro com areia grossa no FDA e no FDD de areia e o segundo consiste no uso de pedregulho no FDA e areia no FDD. Com os dados obtidos foi possível observar que os dois filtros foram capazes de clarificar as águas tipo I e tipo II, em condições distintas, com produção de água filtrada com valores menores que 0,05 uT, valor recomendado pela Portaria 518/2004 (vigente na época).

Duarte (2011) teve como objetivo avaliar a técnica de dupla filtração em leitos de pedregulho e areia, com pré ou interoxidação e adsorção com carvão ativado granulado e pulverizado, para a potabilização de água de reservatório eutrofizado com elevada densidade de cianobactérias - Açude de Gargalheiras, Acari, semiárido do RN. Os ensaios de bancada definiram dosagens de coagulante hidróxido de alumínio entre 13 mg.L⁻¹ e 15 mg.L⁻¹, sob gradiente e tempo de mistura rápida de 700 s⁻¹ e 17 s; dosagem de oxidante (cloro) entre 2,0 mg Cl₂.L⁻¹ e 3,0 mg Cl₂.L⁻¹ e tempo de oxidação de 20 min. O pré-filtro com camada filtrante (FAP4) entre 2,0 mm e 3,0 mm apresentou menores médias de turbidez e cor aparente remanescentes. A taxa de filtração, 160 m³.m⁻² dia⁻¹ e 200 m³.m⁻² dia⁻¹ foi a faixa escolhida pela melhor performance. Como conclusão foi possível observar que o pré-filtro FAP4 com granulometria da camada filtrante mais fina (2,0 a 3,2 mm), apresentou melhor eficiência e as menores médias de turbidez e cor aparente remanescente.

Duarte (2018) objetivou em seu trabalho avaliar o desempenho da tecnologia de dupla filtração como alternativa para a estação de tratamento de água da lagoa de Extremoz (RN) em instalação piloto. A pesquisa consistiu em duas fases, a primeira avaliou o comportamento do tratamento pela tecnologia de DF nas taxas de filtração de 190, 210, 230 e 255 m³.m⁻² dia⁻¹ para os para os filtros ascendentes de pedregulhos (FAP) e 250, 280, 310 e 340 m³.m⁻² dia⁻¹ para os filtros de areia, realizou ensaios em instalação piloto com oito horas de duração. Concluiu-se que apesar do desempenho semelhante aos demais FAP, o pré-filtro FAP3 apresentou melhor eficiência e as menores médias de

turbidez e cor aparente remanescentes e o FAP1 foi o de pior desempenho. Os desempenhos dos FDA foram estaticamente equivalentes, porém, por ter carreira de filtração superior aos demais, o FDA3 foi o filtro com granulometria mais adequada ao tratamento da água bruta.

A situação da lagoa do Jiqui em Parnamirim - RN, não difere dessa problemática. Agrava-se que esse manancial é responsável pelo abastecimento de 30% da população das zonas sul, leste e oeste da cidade de Natal/RN, o que equivale a 260.000 habitantes (IBGE, 2019). Além disso, o emprego da tecnologia, filtração direta em linha, adotada pelo prestador de serviço de abastecimento de água, é incompatível com a qualidade da água do referido manancial nos períodos chuvosos.

Conforme dados fornecidos pela Companhia de Água e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), nos períodos de 2015 a 2019, a água bruta da lagoa do Jiqui obteve cor aparente, em 6.479 amostras, menor que 20 uH em apenas 8% dos casos, menor que 25 uH em 23% e menor que 50 uH em 79% descendente, atual ETA do Jiqui, de acordo com Di Bernardo (2003). Já a turbidez se enquadra nas condições necessárias da tecnologia atual com 98% das amostras menor que 10 uT, 99% menor que 25 uT e 100% dos casos são menores que 100 uT. Diante do exposto, o presente trabalho buscou avaliar o desempenho de uma instalação piloto de dupla filtração com pré-oxidação, como alternativa ao tratamento de água adotada para a lagoa do Jiqui - Natal (RN).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O desenvolvimento das atividades deste trabalho foi realizado na Estação de Tratamento de Água – ETA Jiqui, localizada no município de Parnamirim/RN.

A Lagoa do Jiqui é uma das principais fontes de abastecimento de água das zonas sul, leste e oeste na cidade do Natal, Rio Grande do Norte (RN), responsável por atender aproximadamente 30% da população, o que equivale

a cerca de 260.000 habitantes (IBGE 2019), enquanto que os 70% restantes são abastecidos através da exploração de poços tubulares (NATAL, 2015). A lagoa situa-se em Parnamirim (Latitude: 05°55'8.94"S; Longitude: 35°11'15.07"O), mesorregião do estado RN (figura 1), próximo ao limite da zona sul da capital, dispendo de 1.210 m de comprimento e 200 m de largura máxima, totalizando uma área de 15,25 ha, o que equivale a um volume máximo de 466.093 m³ (LIMA, 2010).

A lagoa do Jiqui é drenada pelo próprio leito do Rio Pitimbu, este está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi, que possui uma bacia hidrográfica de 98 Km². De modo geral, o clima predominante no litoral do RN é o tropical úmido com verão seco, precipitação pluviométrica anual de 1.300 mm, a temperatura média do ar no verão está entre 30°C e 32°C e no inverno a temperatura varia entre 24°C e 26°C (IDEMA, 2016).

Conforme dados fornecidos pela Companhia de Água e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), nos períodos de 2015 a 2019, a água bruta da lagoa do Jiqui apresentou cor aparente, em 6.479 amostras, menor que 20 uH em apenas 8% dos casos, menor que 25 uH em 23%, menor que 50 uH em 79% dos casos, situação desfavorável para tratamento de filtração direta descendente de acordo com Di Bernardo (2003). Já a turbidez se enquadra nas condições necessárias da tecnologia atual com 98% menor que 10 uT, 99% menor que 25 uT e 100% dos casos são menores que 100 uT.

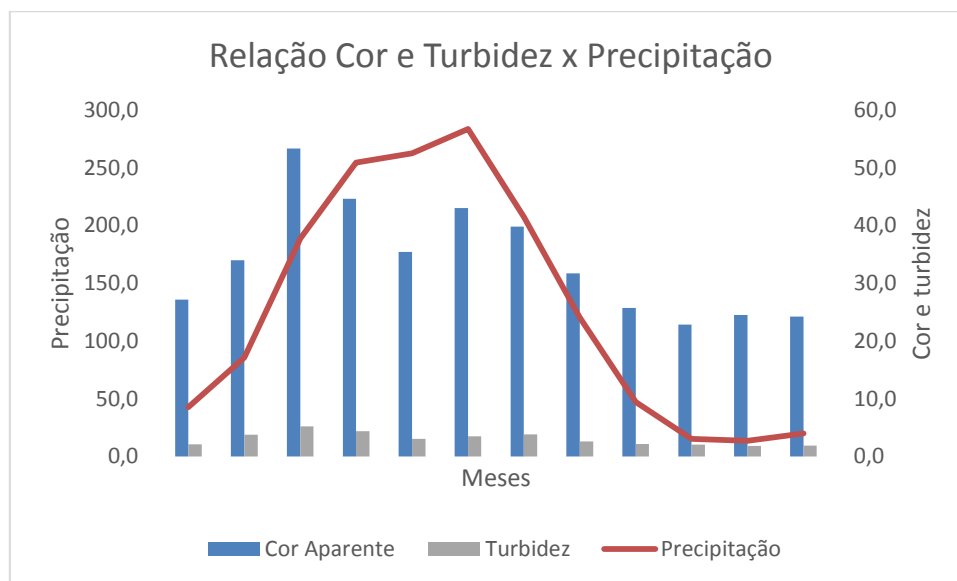
Em períodos de chuva intensa (figura 2) essas características sofrem variações devido ao carreamento de sedimentos sólidos e matéria orgânica em suspensão, fazendo com que a cor supere 200 uH e a turbidez passe dos 25 uT (MONDARDO, 2004). Esses parâmetros aumentam o suficiente para que a ETA não consiga atender o padrão de potabilidade exigido pela Portaria da Consolidação do Ministério da Saúde n° 5/2017 no Anexo XX.

Figura 1 – Vista de satélite da Lagoa do Jiqui e da localização da ETA do Jiqui.



Fonte: Liberatto (2019).

Figura 2 – Avaliação da cor aparente e turbidez com a precipitação no ano de 2018 na lagoa do Jiqui -RN.



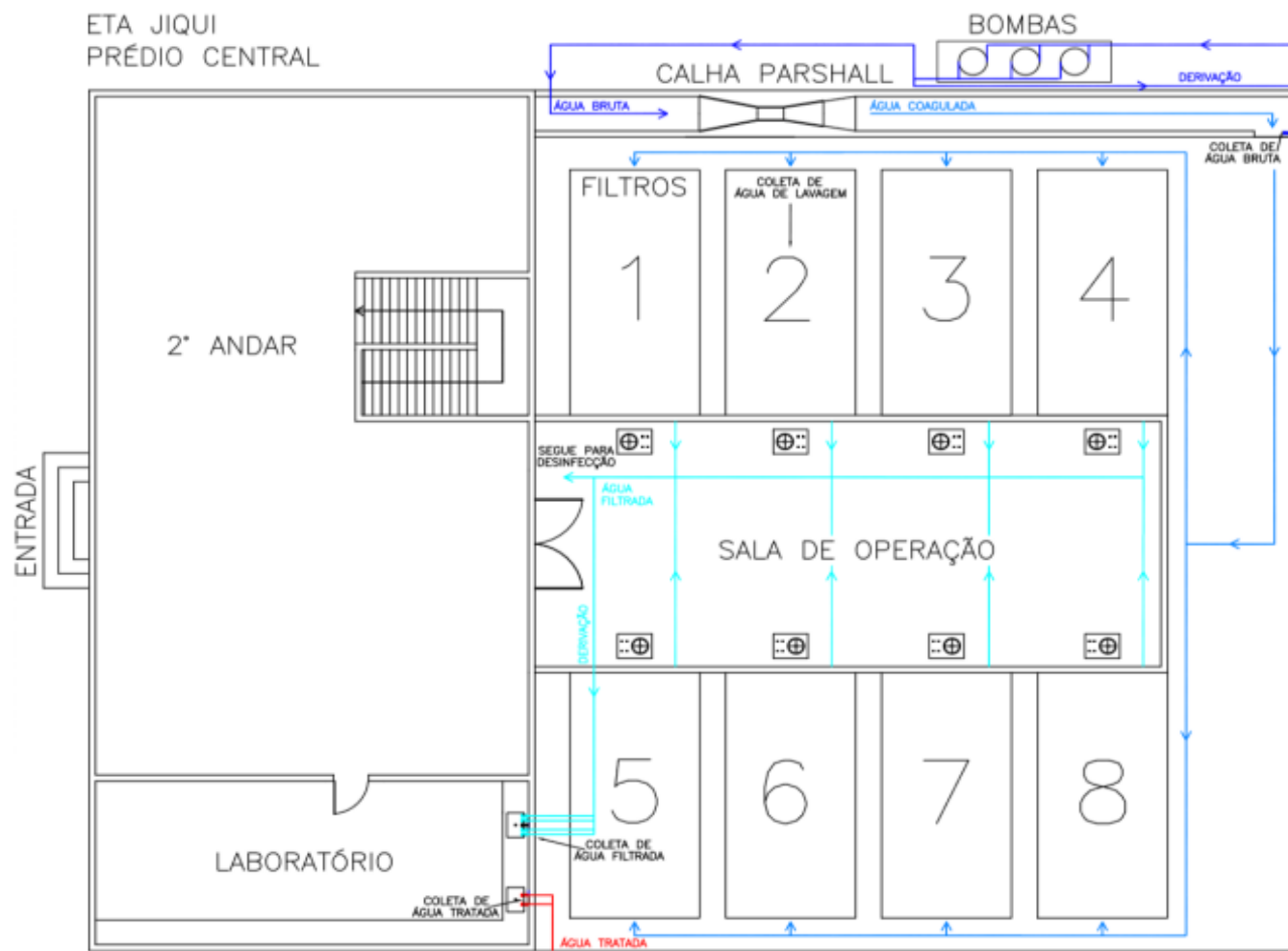
Fonte: INMET e CAERN (2018).

A ETA Jiqui é do tipo filtração direta em linha, com os seguintes processos: coagulação química, filtração e desinfecção através do cloro. Ressalta-se que a pré-oxidação é utilizada somente em períodos chuvosos devido ao aumento significativo de cor aparente (NATAL, 2015).

O tratamento se inicia com a entrada da água bruta na calha parshall, com adição do coagulante hidroxidreto de alumínio líquido a 23%, que permite uma mistura rápida imediata. A água bruta segue por um canal de distribuição até os filtros, com meio filtrante de fluxo descendente. A ETA Jiqui trata 2.000 m³/h de vazão (PEREIRA, 2014).

Os filtros são lavados em contra corrente através de reservatório apoiado, e o efluente desse processo é disposto no mesmo manancial (PEREIRA, 2014). Na figura 3, o croqui da estação de tratamento de água Jiqui com as unidades complementares.

Figura 3 – Croqui representando a ETA do Jiqui.

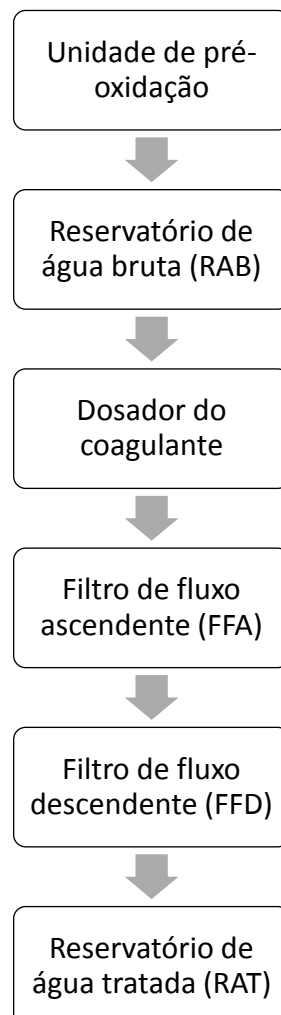


Fonte: Liberatto (2019).

2.2 Instalação piloto de dupla filtração

A instalação piloto de dupla filtração – IPDF foi instalada nas dependências da ETA Jiqui em junho de 2019. A IPDF tem capacidade de vazão de 3 m³/h e o tratamento segue as seguintes fases sequenciais (figura 4): dosador de cloro para pré-oxidação; Reservatório de água bruta (RAB); Placa de orifício para mistura rápida do coagulante; Filtro de fluxo ascendente (FFA) com piezômetro acoplado; Filtro de fluxo descendente (FFD); Reservatório apoiado (RAT) com acúmulo de água filtrada para análise e lavagem dos filtros. A figura 5 ilustra as etapas da IPDF.

Figura 4 – Fluxograma da IPDF



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 5 – Unidades da IPDF utilizadas nas etapas de testes.



(a) Unidade de pré-oxidação;



(b) reservatório de água bruta (RAB);



(c) dosador do coagulante;



(d) filtro de fluxo ascendente (FFA), filtro de fluxo descendente (FFD) e o reservatório de água tratada (RAT).

Fonte: Autoria própria (2019).

Unidade de pré-oxidação

Antes de chegar ao primeiro filtro, a água oriunda da Lagoa do Jiqui passa pela bomba centrífuga que distribui água tanto para o bombeamento até o reservatório de água bruta (RAB) com capacidade de acúmulo de 2 m³ (figura 5b), quanto para o sistema de oxidação (figura 5a). O tempo teórico de contato da água bruta com o cloro é de 40 min.

Unidade de mistura rápida

Posterior ao tanque de contato, RAB, a água passa por um misturador hidráulico no interior da tubulação antes do FFA, constituído de uma placa de orifício, onde ocorre a inserção da solução do produto químico coagulante, submetida a uma mistura rápida, com gradiente entre 700 e 1000 s⁻¹. O dosador do coagulante está representado na figura 5c.

Filtro de Fluxo Ascendente

Na sequência, a água coagulada segue para o filtro de fluxo ascendente, figura 6d, passando inicialmente pela camada suporte (pedregulho) e em seguida pela camada de areia grossa. O método de operação do sistema é taxa constante com valor de $144,0 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. O diâmetro é de $0,80 \text{ m}$ e a área filtrante é de $0,50 \text{ m}^2$, tem seu funcionamento por 24 horas ao dia, entretanto o sistema é contemplado por apenas um filtro e por isso nos períodos da lavagem, o sistema é paralisado.

O filtro possui um fundo interno formado por ramais de seção elíptica (com formato de viga Califórnia), os quais possibilitam maior eficiência na remoção das impurezas retidas na camada de pedregulho por ocasião da realização das descargas de fundo, além de uniformizar a distribuição da água coagulada e de lavagem.

Dispõe ainda de tubulações para introdução de água na interface areia-pedregulho, evitando a formação de vácuo, formado pela diferença de gradiente de percolação da água na areia filtrante e nas camadas de pedregulhos; calha coletora e uma caixa distribuidora para águas filtrada e de lavagem.

Filtro de Fluxo Descendente

A água proveniente do FFA é coletada por meio de calhas e conduzida ao FFD capaz de remover impurezas remanescentes. O filtro é de fluxo descendente, dispondo de um fundo plano, tubulações de coleta de água filtrada e distribuição de água de lavagem, calha coletora e uma caixa receptora do efluente do filtro ascendente.

O FFD tem taxa de filtração constante com valor de $257 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, como a maior parte das impurezas ficam retidas no filtro ascendente, o filtro descendente é menor, com maior taxa de filtração. O diâmetro é de $0,60 \text{ m}$ e a área filtrante é de $0,28 \text{ m}^2$, tem seu funcionamento por 24 horas ao dia, entretanto o sistema possui apenas uma unidade, e por consequência, nos períodos da lavagem o sistema é paralisado.

Características granulométricas

As características granulométricas das camadas filtrantes e suporte dos filtros FFA e FFD estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estratificação do material filtrante do filtro de fluxo ascendente e do filtro de fluxo descendente.

Filtro	Material	Subcamada	Tamanho dos grãos (mm)	Espessura (cm)	
Ascendente (FFA)	Pedregulho (Suporte)	01 (fundo)	38,0 – 25,4	10	
		02	25,4 – 15,9	10	
		03	15,9 – 9,6	10	
		04	9,6 – 4,8	20	
		05	15,9 – 9,6	15	
		06	9,6 – 4,8	10	
		07 (topo)	4,8 – 2,4	10	
	Areia	01	1,2 – 2,8	160	
	TOTAL PEDREGULHO			85 cm	
	TOTAL AREIA			160 cm	
Coeficiente de desuniformidade			1,5 a 1,7		
Coeficiente de esfericidade			0,70 a 0,80		
Diâmetro efetivo			0,60		
Descendente (FFD)	Pedregulho	01	38,0 – 25,4	15	
		02	25,4 – 15,9	10	
		03	15,9 – 9,6	10	
		04	9,6 – 4,8	7,5	
		05	4,8 – 9,6	7,5	
	Areia	01	0,30 – 1,41	70	
	TOTAL PEDREGULHO			50 cm	
TOTAL AREIA			70 cm		
Coeficiente de desuniformidade			1,3 a 1,5		
Coeficiente de esfericidade			0,70 a 0,80		
Diâmetro efetivo			0,60		

Fonte: A&E (2019).

Lavagem dos filtros

É possível fazer três lavagens na IPDF, sendo: descarga de fundo com introdução de água na interface do filtro ascendente, lavagem geral do filtro ascendente e lavagem geral do filtro descendente. A vazão, o volume requerido e o tempo de cada uma dessas lavagens estão descritos na Tabela 2. Para determinar o

período das lavagens observa-se a carreira de filtração de acordo com o nível da câmara de carga, ou quando a turbidez da água filtrada passa de 1 uT. Para os filtros descendentes, o momento de lavagem se dará também com o aumento da perda de carga no interior do filtro, fará o nível de água subir.

Tabela 2 – Parâmetros das lavagens dos filtros da IPDF.

Lavagem	Vazão	Velocidade	Volume	Tempo
Interface	15,0 m ³ /h	0,5 m/min	0,25 m ³	1 min
Geral – Filtro Ascendente	30,0 m ³ /h	1,0 m/min	5,0 m ³	8 a 10 min
Geral – Filtro Descendente	12,0 m ³ /h	0,7 m/min	1,5 m ³	6 a 8 min

Fonte: A&E (2019).

2.4 Etapas dos experimentos

O trabalho experimental desta pesquisa foi desenvolvido em duas etapas. Na primeira foram realizados ensaios em escala de laboratórios para caracterizar a água bruta da Lagoa do Jiqui, com coletas amostrais de água bruta em triplicata, para cada amostra analisou-se os parâmetros cor aparente, turbidez, pH e ensaios de jar test para definição da dosagem ótima do oxidante (cloro). A dose do coagulante (hidroxicloreto de alumínio) foi fixado em 10 mg/L. Na segunda etapa iniciaram-se os testes no sistema piloto de dupla filtração, avaliando a eficiência na remoção dos parâmetros cor aparente e turbidez.

O experimento foi realizado do período de 04 de junho a 02 de julho de 2019, com duração diária de oito horas e com coletas em intervalos de duas horas, totalizando 145 amostras.

ETAPA I - Ensaios em escala de laboratório

As dosagens do pré-oxidante, cloro gás, aplicadas na água de estudo foram determinadas em função dos resultados obtidos em ensaios de demanda de pré-oxidante em função do tempo de contato.

Foram efetuados ensaios de pré-oxidação com o cloro, nos quais utilizou-se vários tempos de contato (30, 45, 60 e 75 min) e doses de cloro na faixa de 2,5 a 7 mg/L. Os ensaios foram realizados em jar teste e o gradiente de velocidade foi

mantido em torno de 600 s^{-1} . Estabeleceu-se os seguintes parâmetros de controle: pH, residual de cloro, cor aparente e turbidez. Com os resultados obtidos de residual calculou-se as demandas através da diferença entre dose aplicada e residual em função do tempo de contato. Outro critério foi o resultado de cor aparente em cada tempo de contato. A Tabela 3 apresenta as condições fixadas para determinação da dosagem do cloro.

Tabela 3 – Condições estabelecidas para os ensaios de determinação de dosagem do oxidante.

Parâmetros	Condições
Água de estudo	2L
Temperatura ambiente	25°C
Pré-oxidação	
Tempo de contato	30 min; 45 min; 60 min; 75 min
Dose	2,5 mg/l; 5 mg/l; 7 mg/l
Gradiente de velocidade e tempo de mistura rápida	1486 s^{-1} (1s); 15 s^{-1} (4min)

Fonte: Autoria Própria (2019).

ETAPA II – Ensaios na IPDF

Unidade de mistura rápida

Para neutralização das cargas, a etapa de coagulação é essencial. Foi realizada através da inserção da solução de hidroxiclreto de alumínio, PAC a 23% à montante dos filtros, e submetida a uma mistura rápida no interior da tubulação, com gradiente de velocidade da ordem de 700 a 1000 s^{-1} . O misturador hidráulico adotado foi a placa de orifício.

Padilha (2011) avaliou o uso de três diferentes coagulantes nos processos de tratamento de água para abastecimento. Utilizou em seus ensaios o equipamento Jar test, empregando-se como agentes coagulantes o cloreto férrico, o sulfato de alumínio e o hidropocloreto de alumínio (PAC). Foi possível verificar que o PAC demonstrou maior eficiência, uma vez que com menor dosagem estudada, 10 mg/L, obteve-se o menor valor de turbidez remanescente, atendente aos parâmetros estabelecidos e ainda gerando benefícios econômicos.

O valor utilizado na dose do coagulante foi de 10 mg/L, com vazão de dosagem de 0,7 L/h.

Filtros ascendentes e descendentes

O método de operação do sistema de fluxo ascendente é taxa constante com valor inicial de 144 m³/m².dia. O diâmetro é de 0,80 m, tem seu funcionamento por 24 horas ao dia. O FFD tem taxa de filtração constante com valor de 257 m³/m².dia, o diâmetro é de 0,60 m e a área filtrante é de 0,28 m².

O resumo das condições estabelecidas para os ensaios na IPDF está descrito na tabela 4.

Tabela 4 – Condições estabelecidas para os ensaios na IPDF.

Parâmetros	Condições
Água de estudo	2L
Temperatura ambiente	25°C
Pré-oxidação:	
Tempo de contato	40 min
Dose	2,5 mg/l
Coagulação:	
Dose do coagulante	10,0 mg/L
Vazão de dose	0,7 l/h
Gradiente de velocidade de mistura rápida	700 a 1000 s ⁻¹
Filtro ascendente:	
Taxa de filtração	144,0 m ³ /m ² .dia
Diâmetro	0,80 m
Área filtrante por unidade	0,50 m ²
Filtro descendente	
Taxa de filtração	257,0 m ³ /m ² .dia
Diâmetro	0,60 m
Área filtrante por unidade	0,28 m ²

Fonte: Autoria Própria (2019).

Coleta da água

Cada ensaio na IPDF teve duração de 8h em cada dia, às análises da água filtrada iniciavam às 8h e terminavam às 16h, com intervalos de 2h entre as coletas, totalizando as 145 amostras.

A água filtrada era coletada na tubulação após a passagem da água pelo o FFD.

Análise dos parâmetros turbidez e cor aparente

Todos os procedimentos analíticos realizados seguiram as metodologias descritas no Standard Methods (APHA *et al.*, 2012), Tabela 5.

Tabela 5 – Métodos analíticos adotados nas análises realizadas.

Parâmetro	Método Analítico	Protocolo
Turbidez	Nefelométrico	2130 B
Cor aparente	Espectrofotométrico tristimulus	2120 E
pH	Potenciométrico	4500- H+ B

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da água bruta e tratada pela ETA Jiqui

Os dados relacionados à qualidade da água tratada na ETA e da água bruta da Lagoa do Jiqui no período de 04 de junho a 02 de julho de 2019, que corresponde ao período do experimento, foram fornecidos pela CAERN.

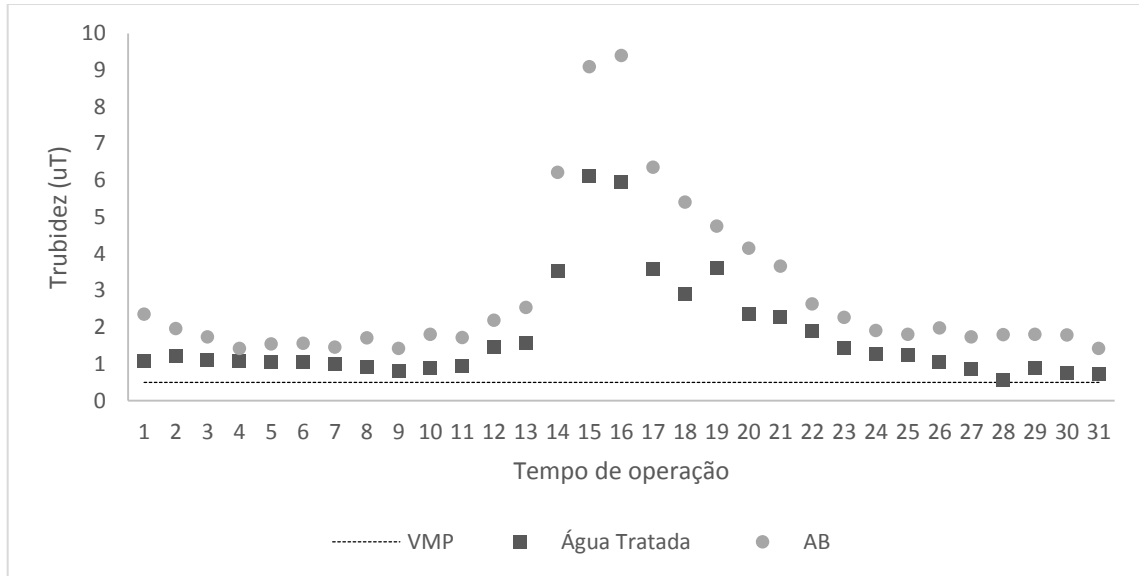
Os valores médios de turbidez e cor aparente da água bruta e da água tratada nos períodos do estudo estão representados nas figuras 11 e 12, respectivamente.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte S/A – EMPARN (2019) as precipitações no mês de junho ficam mais intensas, por isso é possível observar que a partir do 10º dia ocorreram alterações nos parâmetros de cor aparente e turbidez, isso acontece devido ao carreamento de sedimentos sólidos e matéria orgânica em suspensão para o interior do manancial.

Nos períodos de intensa precipitação, 13 a 23 de junho, a ETA atual não conseguiu alcançar os padrões de cor aparente preconizado pela Portaria de Consolidação do Ministério da Saúde Nº 5/2017 (BRASIL, 2017) em seu Anexo XX e em todo período estudado a turbidez remanescente apresentou valores superiores ao Valor Máximo Permitido (VMP) para estações com filtração rápida, limite de até 0,5 uT, na saída dos filtros.

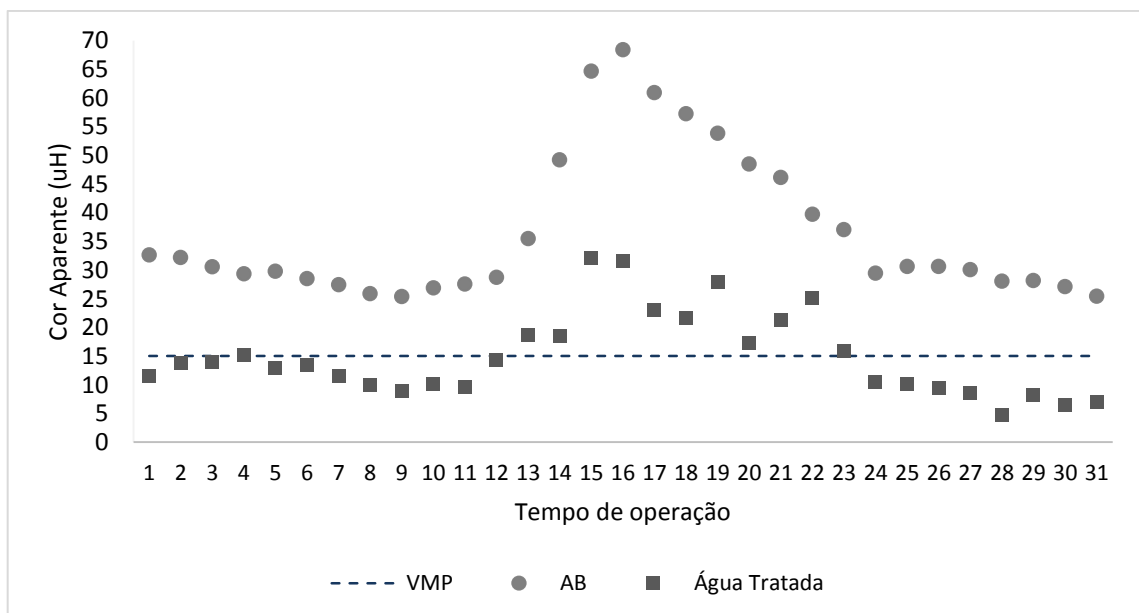
Os resultados apresentados nas figuras 6 e 7 indicam que o sistema não foi capaz de atender os padrões preconizados pela Portaria vigente nos períodos chuvosos, permitindo a passagem de partículas, possivelmente com protozoários, quando associado à turbidez da água filtrada e a qualidade parasitológica da água (MONARDO, 2004).

Figura 6 - Valores médios de turbidez da água bruta e da água tratada pela ETA Jiqui.



Legenda: AB – Água bruta; VMP – Valor Máximo Permitido.
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 7 - Valores médios de cor aparente da água bruta e da água tratada pela ETA Jiqui.



Legenda: AB – Água bruta; VMP – Valor Máximo Permitido.
Fonte: Autoria própria (2019).

A ETA Jiqui atingiu uma eficiência de 59,2% na remoção de cor aparente, 39,7% na remoção de turbidez, Tabela 6.

Com relação ao pH, apresentou-se neutro com leve acidez na água bruta (6,2 a 6,7) e na água tratada (5,9 a 6,5), e valores dentro do recomendado para o abastecimento humano pela Portaria da Consolidação nº 5/2017. 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 de ser responsável por corrosão nas unidades constituintes do sistema de abastecimento de água (BRASIL, 2017).

Tabela 6 - Resultados referentes aos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água bruta e da água tratada pela ETA Jiqui

Variáveis de controle	Água bruta (entrada)		Água tratada (saída)		
	Amplitude (Mínimo - Máximo)	Média ± DP	Amplitude (Mínimo - Máximo)	Média ± DP	(%) de remoção
Cor aparente (uH)	25,4 – 68,4	36,6 ± 12,7	4,8 – 32,1	14,9 ± 7,2	59,2
Turbidez (uT)	1,4 – 9,4	3 ± 2,2	0,6 – 6,1	1,8 ± 1,4	39,7
pH*	6,2 – 6,7	6,5 ± 0,1	5,9 – 6,5	6,3 ± 0,1	-

Legenda: DP- Desvio Padrão.

*A média geométrica e o DP do pH foram determinados através do cálculo da concentração de íons H⁺ (pH = -log[H⁺]), com a posterior determinação das médias e DP dessas concentrações e o log desses resultados.

Fonte: Autoria própria (2019).

3.2 Ensaios de bancada

Nos meses de chuva, a cor verdadeira da água bruta aumenta consideravelmente, foi alterado as características naturais da água para valores de cor verdadeira entre 140 a 160 uH.

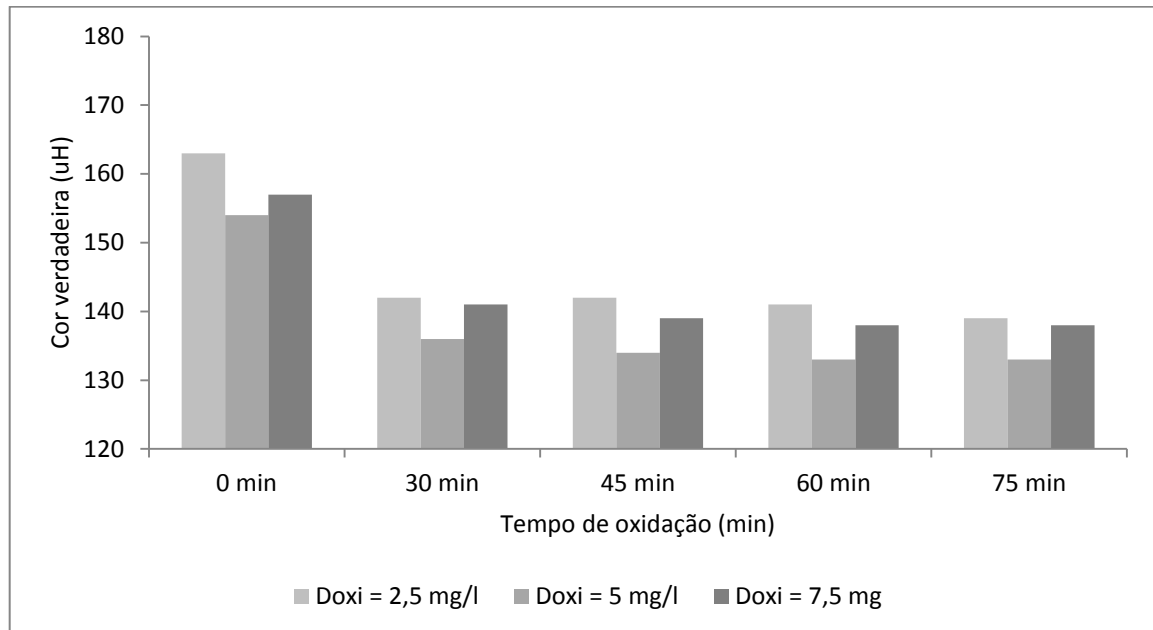
Na Figura 8 é possível observar o comportamento da água com as doses do oxidante cloro de 2,5 mg/L, 5 mg/L e 7,5 mg/L, no tempo de 30 min, 45 min, 60 min e 75 min. Os melhores resultados de remoção de cor verdadeira ocorreram para doses mais baixas de cloro, sendo 2,5 mg/l, com eficiência de remoção de 14%, doses de cloro a 5 mg/l obteve 13% e com cloro a 7,5 mg/l, 12%.

Lima (2019) constatou que para a variável turbidez, as doses de cloro e tempo de contato não foram relevantes, pois foi possível observar resultados

semelhantes de turbidez remanescente para a dose de 2 mg/L e 3 mg/L de cloro, nos tempos de contato de 10, 15 e 20 minutos.

Os valores encontrados no experimento foram estatisticamente iguais, por isso, foi escolhida a menor dose.

Figura 8 – Remoção de cor para diferentes doses de cloro.



Legenda: Doxi - Dose de oxidante;

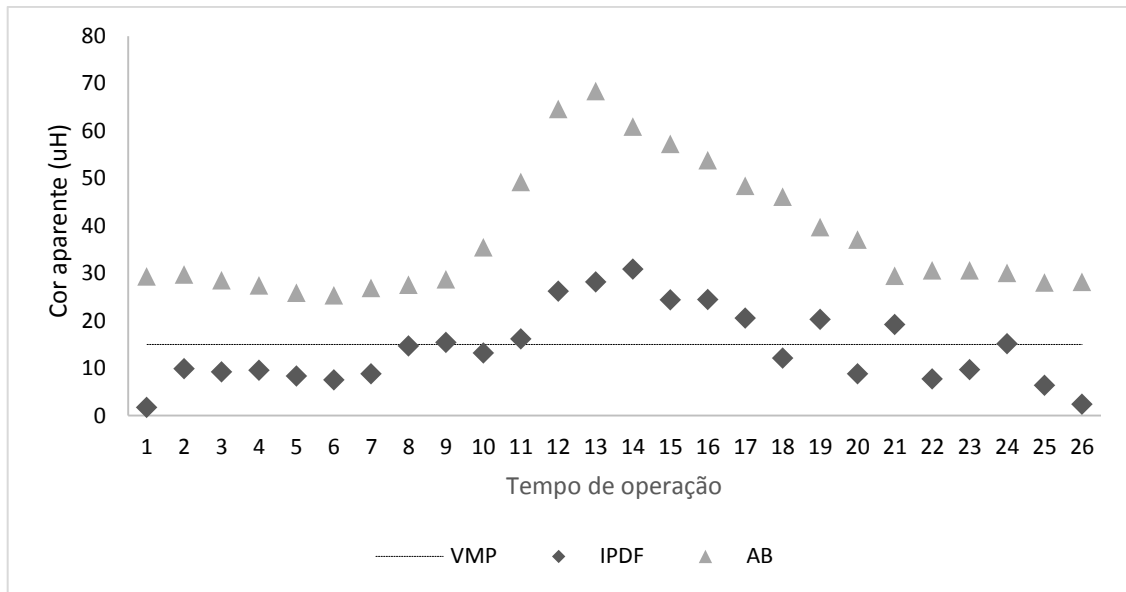
Fonte: Autoria própria (2019).

3.3 Resultados da remoção de cor e turbidez na IPDF

De acordo com os resultados representados na Figura 9, a IPDF foi eficiente em 64,13% das 145 amostras, quando relacionado à remoção da cor aparente. No entanto, nos dias 11 a 21, a cor aparente apresentou valores maiores do que o recomendado pela Portaria n° 5/2017 (BRASIL, 2017). Em 60% das amostras, a cor aparente atingiu valores menores que 15 uH.

Com relação a turbidez, em 92,3% das amostras (Figura 10) o sistema de dupla filtração com as condições operacionais estabelecidos não atingiu valores inferiores a 0,5 uT, VMP preconizado pela Portaria n° 5/2017.

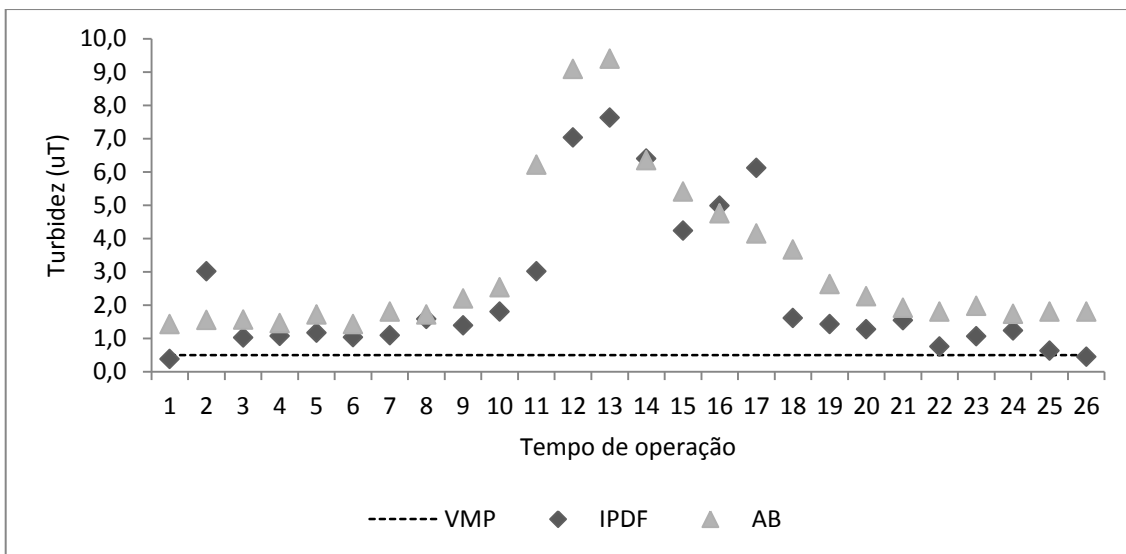
Figura 9 - Valores médios de cor aparente da água bruta e da água tratada pela IPDF.



Legenda: AB – Água bruta; IPDF – Instalação piloto de dupla filtração; VMP – Valor Máximo Permitido.

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 10 - Valores médios de turbidez da água bruta e da água tratada pela IPDF.



Legenda: AB – Água bruta; IPDF – Instalação piloto de dupla filtração; VMP – Valor Máximo Permitido.

Fonte: Autoria própria (2019).

A IPDF instalada no Jiqui alcançou uma eficiência de 64,3% na remoção de cor aparente, 23,6% na remoção de turbidez, conforme descrito na Tabela 7.

Os valores de pH da água bruta estavam enquadrados nos limites preconizados pela Portaria, mas após o tratamento a água atingiu valores abaixo de 6, o que não se enquadra no limite 6 e 9,5 recomendado pela Portaria da Consolidação do Ministério da Saúde nº 5/2017 no Anexo XX (BRASIL, 2017).

Tabela 7 - Resultados referentes aos parâmetros físico-químicos da água bruta e da água tratada pela IPDF.

Variáveis de controle	Água bruta (entrada)		Água tratada (saída)		
	Amplitude (Mínimo - Máximo)	Média ± DP	Amplitude (Mínimo - Máximo)	Média ± DP	(%) de remoção
Cor aparente (uH)	25,4 – 68,4	36,6 ± 12,7	1,54 – 30,9	14,9 ± 7,2	64,3
Turbidez (uT)	1,4 – 9,4	3 ± 2,2	0,4 – 7,6	2,4 ± 2,2	23,6
pH*	6,2 – 6,7	6,5 ± 0,1	4,2 – 6,5	5,3 ± 0,7	-

LEGENDA: DP- Desvio Padrão; IPDF – Instalação piloto de dupla filtração.

*A média geométrica e o DP do pH foram determinados através do cálculo da concentração de íons H⁺ (pH = -log[H⁺]), com a posterior determinação das médias e DP dessas concentrações e o log desses resultados.

Fonte: Autoria própria (2019).

O encerramento da carreira de filtração e lavagem dos filtros era definido pela ocorrência de perda de carga superior ao limite estabelecido pelo sistema. No período de 4 a 16 de junho a carreira de filtração adotada foi de 24h com a execução de descargas de fundo intermediárias (DFI) e de descargas de fundo. No dia 17, foi realizado cinco lavagens de interface com lavagem geral, devido ao aumento significativo da turbidez na água bruta. Do dia 18 de junho a 2 de julho a carreira de filtração foi de 12h.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base no trabalho realizado, conclui-se que:

- a) Os melhores resultados de remoção de cor verdadeira ocorreram para doses mais baixas de cloro, sendo 2,5 mg/l, com eficiência de remoção de 14%, doses de cloro a 5 mg/l obteve 13% e com cloro a 7,5 mg/l, 12%. Os valores não foram significativamente diferentes, por isso, foi escolhido o de menor dose.
- b) As doses de coagulante e de oxidante não devem ser constantes para experimentos com água bruta natural, visto que a alteração na qualidade da água bruta requer alteração nas doses.
- c) A ETA Jiqui alcançou no tratamento da água amplitudes de 4,8 a 32,1 uH de cor aparente. A turbidez remanescente esteve entre 0,6 e 6,1uT. Porém, nos períodos de intensa precipitação, 13 a 23 de junho, a ETA Jiqui não conseguiu alcançar os padrões de cor aparente preconizado pela Portaria de Consolidação Nº 5/2017.
- d) A IPDF resultou em amplitudes de 1,54 a 30,9 uH, nos dias 11 a 21, a cor aparente apresentou valores maiores do que o recomendado pela Portaria nº 5/2017, o que permite concluir que nas condições operacionais a IPDF não é eficiente. A turbidez, em 92,3% das amostras, o sistema não atingiu valores inferiores a 0,5 uT, obteve amplitudes de 0,4 a 7,6 uT no período estudado.

Em função dos resultados obtidos nesta investigação, recomenda-se:

- a) Realizar mais testes de bancadas para identificar as condições de pré-oxidação e coagulação, acompanhando as variações da qualidade da água.
- b) Providenciar e instalar o tanque de pré-oxidação para que aumente o tempo de contato da água com o cloro.
- c) Realizar ensaios visando à otimização da lavagem dos filtros.

REFERÊNCIAS

A&E – Tratamento de águas e efluentes. Memorial descritivo do sistema de adequação da ETA Jiqui, Parnamirim/RN, 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Dispõe sobre a consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Diário Oficial da União, Brasília, 2017.

CAERN - Companhia de água e esgotos do Rio Grande do Norte. Relatório anual 2019 – qualidade da água Natal/RN Zonas Sul, Leste e Oeste. 2019. Disponível em: Acesso em: 23 de out de 2019.

DANTAS, Angela di Bernardo. Desempenho de sistemas de dupla filtração no tratamento de água com turbidez elevada. 2004. 301 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DI BERNARDO, L. Dupla Filtração. In: PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO. Empresa Brasileira de Inovação e Pesquisa. Tratamento de água para abastecimento por filtração direta. São Carlos/SP: Rima, 2003.

DI BERNARDO, L., LUCA, S. J., KURODA, E. K., PEGORER, M. G. L. Oxidação. In: PÁDUA, V. L. (coord.). Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano. PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Belo Horizonte: SERMOGRAF. 504 p, 2006.

DI BERNARDO, L. & PAZ, L.P.S. Seleção de tecnologias de tratamento de água. v. 1. 1. ed. São Carlos: Editora LDiBe, 2008.

DUARTE, Gustavo Marques Calazans. Simulação em instalação piloto da adequação de eta convencional para dupla filtração. 2018. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária, Programa de Pósgraduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

DUARTE, Marco Antonio Calazans. Tratamento de água para consumo humano de reservatório eutrofizado através de pré e interoxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração. 2011. 318 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB, 2008. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 10 out. 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Senso demográfico de 2019. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/natal/panorama>>. Acesso em: 15 out. 2019.

IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente. PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento da qualidade da água: Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de setembro a novembro de 2016. 5^o relatório semestral. Natal, maio de 2017. Disponível em: < <http://www.programaaguaazul.ct.ufrn.br> >. Acesso em: 16 fev. 2019.

KAWAMURA, S. Integrated design and operation of water treatment facilities. 2nd. Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc. 621p. 2000.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. Campinas: Átomo, 2010.

LIBERATTO, Leonard Gomes Vieira. Ocorrência de interferentes endócrinos na estação de tratamento de água do Jiqui – Natal/RN. 2019. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

LIMA, Alexya Brendha Pinheiro de. Avaliação da associação da filtração lenta com a filtração rápida no tratamento da água de uma lagoa litorânea tropical com baixa turbidez e cor moderada. 2019. 52 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

LIMA, Patrícia Luiza da Silva Carmo de. Comunidade Fitoplactônica e qualidade da água da Lagoa do Jiqui, Parnamirim, RN. 2010. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Bioecologia Aquática, Centro de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

MONDARDO, Renata Iza. Influência da pré-oxidação na tratabilidade das águas via filtração direta descendente em manancial com elevadas concentrações de microalgas e cianobactérias. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Cap. 3. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87242/204387.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 09 out. 2019.

NATAL (RN). Prefeitura Municipal de Natal. Plano municipal de saneamento básico do município de Natal/RN: diagnóstico da situação do saneamento. Tomo I: Situação dos Serviços de Abastecimento de Água Potável e de Esgotamento Sanitário. Natal, RN: Start Pesquisa e Consultoria Técnica LTDA, 2015.

PADILHA, J. D. et al. Análise da utilização de três diferentes coagulantes na remoção da turbidez de água de manancial de abastecimento. In: Encontro Internacional de Produção Científica, 7. 2011. Maringá. Disponível em: http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/epcc2011/anais/diana_janice_padilha2.pdf. Acesso em: 15 nov. 2013.

PEREIRA, H. W. B. Sistema de Abastecimento de Água de Natal – Projeto de implantação de estação de tratamento de resíduos gerados (ETRG) para reaproveitamento da água de lavagem dos filtros da ETA Jiqui. Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), Natal, 2014.

SABOGAL PAZ, L. P. (2007). Modelo Conceitual de seleção de tecnologias de tratamento de água para abastecimento de comunidades de pequeno porte. 364p. [Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo. São Carlos].

SAKAMOTO, Jaqueline Akiko. Seleção de tecnologias para tratamento de água para pequenas e médias comunidades brasileiras considerando aspectos ambientais. 2013. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

TINÔCO, Juliana Delgado. Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica. 2011. 229 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-04052012-093819/publico/JulianaTinoco.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2019.