

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CICLO COMPLETO LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE MARINGÁ-PR

* Camila Hamano Toledo ¹
Cláudia Telles Benatti ¹

PERFORMANCE EVALUATION OF A FULL CYCLE WATER TREATMENT PLANT LOCATED IN THE MUNICIPALITY OF MARINGÁ-PR

Recibido el 12 de mayo de 2022. Aceptado el 8 de mayo de 2023

Abstract

The full cycle water treatment plants (WTP's) perform the purification of natural waters through the stages of coagulation, flocculation, decantation, filtration, disinfection, fluoridation and pH correction. In order to guarantee the provision of good quality treated water, it is necessary to evaluate the performance of the treatment stages to ensure the efficiency of each one of them. With this in mind, the present paper aims to evaluate the performance of a WTP located in the interior of Paraná through indicators based on the quality of the raw, coagulated, decanted, filtered and treated water, on the construction and operational characteristics of the treatment units of the WTP and on the compliance with the technical standard NBR 12216/92, the legislations CONAMA Resolution n° 357/5 and Ordinance n° 888/21 and the considerations/recommendations made by the literature. Despite the quality of the raw water being compromised, it was found that the quality of the treated water is in accordance with the potability standard established by Ordinance n° 888/21. However, constructive and operational aspects of the WTP to be improved were identified. Due to this, the present paper shows subsidies that aim to improve the efficiency of the WTP and enable the sustainability of its water treatment system.

Keywords: water treatment plants, performance, efficiency, indicators, sustainability.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Brasil.

* *Autor correspondente:* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá. Av. Colombo, 5790, Zona 07, Maringá, Paraná. 87020-900. Brasil. Email: camilahtoledo.cht@gmail.com

Resumo

As estações de tratamento de água (ETA's) de ciclo completo realizam a potabilização das águas naturais por meio das etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção de pH. Para que haja a garantia do provimento de água tratada com boa qualidade, é necessário que seja avaliado o desempenho das etapas de tratamento de modo a assegurar a eficiência de cada uma delas. Pensando nisso, o presente trabalho visa avaliar o desempenho de uma ETA localizada no interior do Paraná por meio de indicadores fundamentados na qualidade da água bruta, coagulada, decantada, filtrada e tratada, nas características construtivas e operacionais das unidades de tratamento constituintes da ETA e no atendimento à norma técnica NBR 12216/92, às legislações Resolução CONAMA nº 357/5 e Portaria nº 888/21 e às considerações/recomendações realizadas pela literatura. Apesar da qualidade da água bruta mostrar-se comprometida, verificou-se que a qualidade da água tratada se encontra em conformidade com o padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria nº 888/21. Foram identificados, entretanto, aspectos construtivos e operacionais da ETA a serem melhorados. Devido a isso, o presente trabalho apresenta subsídios que visam melhorar a eficiência da ETA e possibilitar a sustentabilidade do seu sistema de tratamento de água.

Palavras chave: estações de tratamento de água, desempenho, eficiência, indicadores, sustentabilidade.

Introdução

Para que haja o abastecimento de água, é necessário que seja realizada a potabilização das águas naturais (Botero *et al.*, 2009). Esse processo consiste na adequação da água bruta aos limites físicos, químicos, biológicos e radioativos estipulados pelo Ministério da Saúde e deve ser efetuado pelo tratamento que apresente os menores custos de implantação, manutenção e operação possíveis e que gere os menores impactos ao ambiente. A escolha da tecnologia de tratamento de água para abastecimento deve considerar não somente tais premissas, mas também as características da água bruta, o manuseio e a confiabilidade dos equipamentos, a flexibilidade operacional, a localização geográfica e o perfil da população a ser atendida (Libânio, 2010).

As principais tecnologias de tratamento existentes para a potabilização das águas naturais são a filtração em múltiplas etapas (Di Bernardo *et al.*, 1999), a filtração direta ascendente (Di Bernardo e Mendes, 1986), a filtração direta descendente (Albuquerque *et al.*, 2019), a dupla filtração (Cirne *et al.*, 2019), a floto-filtração (Oliveira, 2007) e o ciclo completo (Menezes, 2019). A tecnologia de ciclo completo é a mais utilizada pelas ETA's no Brasil e purifica as águas naturais pelas etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção de pH (Sabogal Paz, 2007). A fim de assegurar a melhor eficiência de cada uma dessas etapas e o provimento de água tratada com boa qualidade é necessário que seja feita a avaliação do desempenho da ETA. O princípio de atuação dessa ferramenta trata-se da elaboração de um diagnóstico da situação operacional da ETA, pelo qual identificam-se falhas que, ao serem corrigidas, elevam a sua eficiência (Braga, 2014).

As ETA's devem cumprir critérios amplos de qualidade, seguindo normas e legislações vigentes que viabilizam a sua adequada execução e aplicação (Achon, 2008), tais como a NBR 12216 (ABNT, 1992), que dispõe sobre as condições para a elaboração do projeto de uma ETA, a Portaria n° 888 (Brasil, 2021), que estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para o consumo humano e o seu padrão de potabilidade, e a Resolução CONAMA n° 357 (Brasil, 2005), que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e as diretrizes ambientais para o seu enquadramento.

Por essa razão, evidencia-se a necessidade dos gestores das ETA's estarem sempre atentos aos diversos fatores capazes de interferir no seu desempenho (Achon, 2008). Dentre os principais, destacam-se as características da água bruta, as condições hidráulicas dos processos e das operações unitárias constituintes do sistema de potabilização da água bruta adotado pela ETA, a sua precisão operacional e as suas metas de qualidade da água tratada (Oliveira *et al.*, 2021).

Apesar disso, a avaliação do desempenho das ETA's feita pelas concessionárias de abastecimento de água brasileiras vem sendo comumente conduzida sob o prisma reducionista, ou seja, centrada apenas no percentual do tempo de operação da ETA em que a água atende as premissas impostas pelo Ministério da Saúde. Diante desse cenário, surge a necessidade da formulação e da aplicação de indicadores de desempenho que envolvam uma vasta gama de fatores de modo a tornar o controle e a avaliação do desempenho das ETA's mais amplos e objetivos (Pereira *et al.*, 2018).

Assim, o presente trabalho visa avaliar o desempenho de uma ETA de ciclo completo, no período compreendido entre os anos de 2020 e 2021, por meio de indicadores fundamentados nos parâmetros de qualidade da água bruta, coagulada, decantada, filtrada e tratada, nos parâmetros construtivos e operacionais das unidades de tratamento da ETA e no atendimento à norma técnica NBR 12216 (ABNT, 1992), às legislações Resolução CONAMA n° 357 (Brasil, 2005) e Portaria n° 888 (Brasil, 2021) e às considerações/recomendações realizadas pela literatura.

Material e métodos

A ETA analisada localiza-se em Maringá-PR, opera 24 horas por dia e possui uma vazão média atual de $1100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, podendo atender até $1440 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. Para o abastecimento municipal são explorados os mananciais Rio Pirapó, um manancial de superfície com vazão captada em torno de $3600 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, e o Aquífero Serra Geral, um manancial subterrâneo com vazão captada em torno de $550 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Segundo a Portaria SUREHMA n° 004 (Paraná, 1991), os cursos d'água pertencentes à bacia do Rio Pirapó estão enquadrados na classe 2, conforme a classificação das águas doces imposta pela Resolução CONAMA n° 357 (Brasil, 2005). O sistema de tratamento de água adotado pela ETA é o de ciclo completo, estando as principais características das unidades de tratamento que a constitui e os insumos nelas utilizados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Principais características das unidades de tratamento da ETA e os insumos nelas utilizados.

Unidade de tratamento	Principal característica	Insumos utilizados
Pré-tratamento	Oxidação química	Gás cloro
Mistura rápida	Ressalto hidráulico em canal retangular	Policloreto de alumínio (PAC)
Floculação	1 floculador hidráulico dotado de chicanas verticais (vazão de 300 L.s ⁻¹) e 3 floculadores mecânicos compartimentados em quatro câmaras com agitadores do tipo turbina de fluxo axial (vazão de 800 L.s ⁻¹)	-
Decantação	12 decantadores do tipo piscina de alta taxa	-
Filtração	10 filtros rápidos de fluxo descendente com meio filtrante de camada dupla (areia e antracito)	-
Desinfecção/ Fluoretação/ Ajuste de pH	Câmara de contato	Gás cloro, ácido fluossilícico e hidróxido de cálcio

A companhia de saneamento operadora do sistema disponibilizou a planta baixa e os cortes das unidades de tratamento constituintes da ETA, além dos boletins mensais de monitoramento da qualidade das amostras de água bruta, coagulada, decantada, filtrada e tratada, emitidos no período de novembro de 2020 a outubro de 2021, e do relatório anual de monitoramento operacional do sistema emitido em setembro de 2021.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de qualidade da água monitorados nos diferentes pontos da ETA, as suas unidades de medida, além das metodologias e equipamentos utilizados para a determinação de cada um deles. As metodologias adotadas para a determinação dos parâmetros de qualidade da água encontram-se descritas no *Standard Methods for the Examination for Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017).

Tabela 2. Unidades de medida dos parâmetros de qualidade da água monitorados pela ETA e metodologia e equipamentos empregados para a determinação de cada um deles.

Parâmetro de qualidade	Unidade	Metodologia	Equipamento
pH	-	4500-H+ B	Analizador de pH Digimed TH 404
Cor	uH	2120 B	Colorímetro Hach DR 900
Turbidez	uT	2130 B	Turbidímetro Hach 2100 Q
Alcalinidade	mg.L ⁻¹ de CaCO ₃	2320 B	pHmetro Digimed D22
Cloro residual livre	mg.L ⁻¹	4500-Cl G	Medidor de cloro Wallace & Tiernan, Depolox 3 plus/Fotômetro Hach
Fluoreto	mg.L ⁻¹	4500-F-C	Eletrodo seletivo de íons
<i>Escherichia coli</i> e Coliformes totais	ausência/presença	9223 B	-

A avaliação do desempenho da ETA foi realizada com base nas seguintes atividades:

- (i) construção de gráficos relacionando os valores mínimos diários do mês e os valores máximos diários do mês dos parâmetros de qualidade da água bruta e da água tratada com os meses em estudo;
- (ii) análise dos parâmetros de qualidade da água bruta à luz da Resolução CONAMA nº 357 (Brasil, 2005) e das considerações/recomendações de autoria de Alves *et al.* (2008), de Andreoli *et al.* (2013), da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2020), de Constantino e Yamamura (2009), de Ferreira Filho (2017), da Fundação Nacional de Saúde (Funasa) (Brasil, 2014) e de Kawamura (2000), León (2005), Libânio (2010) e Pavanelli (2001) acerca de tais parâmetros;
- (iii) determinação da interferência dos valores mensais de precipitação acumulada da região de Maringá-PR, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sobre os valores médios mensais dos parâmetros de qualidade da água bruta por meio da construção gráfica da correlação linear entre essas variáveis nos meses em estudo;
- (iv) determinação dos parâmetros construtivos e operacionais das unidades de tratamento da ETA por meio da realização de visitas técnicas *in loco* e da consulta às suas plantas baixas, aos seus cortes e ao relatório anual de monitoramento das suas operações;
- (v) análise dos parâmetros construtivos e operacionais das unidades de tratamento da ETA à luz da NBR 12216 (ABNT, 1992) e das considerações/recomendações de autoria de Amirtharajah (1978), Cassini *et al.* (2003), Cunha *et al.* (2019), Davis (2017), Di Bernardo e Dantas (2005), Ferreira Filho (2017), Kawamura (2000), Ramos *et al.* (2016), Reali e Marchetto (1997), Santos *et al.* (2018), Silva *et al.* (2019) e de Von Sperling (2007) acerca de tais parâmetros e (vi) análise dos parâmetros de qualidade da água coagulada, decantada, filtrada e tratada à luz da Portaria nº 888 (Brasil, 2021) e das recomendações de autoria de Constantino e Yamamura (2009) e de Ferreira Filho (2017) acerca de tais parâmetros.

Resultados e discussão

Avaliação da qualidade da água bruta

A Figura 1 apresenta a variação dos valores de pH, alcalinidade, cor aparente e turbidez da água bruta captada no Rio Pirapó durante o período de estudo. Pode-se observar que os valores de pH se encontram entre 6.7 e 8.7 (Figura 1(a)), o que mostra que eles estão dentro dos valores limites estipulados pela Resolução CONAMA nº 357 (Brasil, 2005) para um manancial superficial de classe 2 (pH 6 a 9). Já em relação à alcalinidade, pode-se notar que os valores desse parâmetro se encontram entre 30 e 70 mg.L⁻¹ de CaCO₃ (Figura 1(b)), ou seja, eles se enquadram com a maioria dos valores encontrados para águas naturais, que, segundo a Funasa (Brasil, 2014), variam entre 30 e 500 mg.L⁻¹ de CaCO₃.

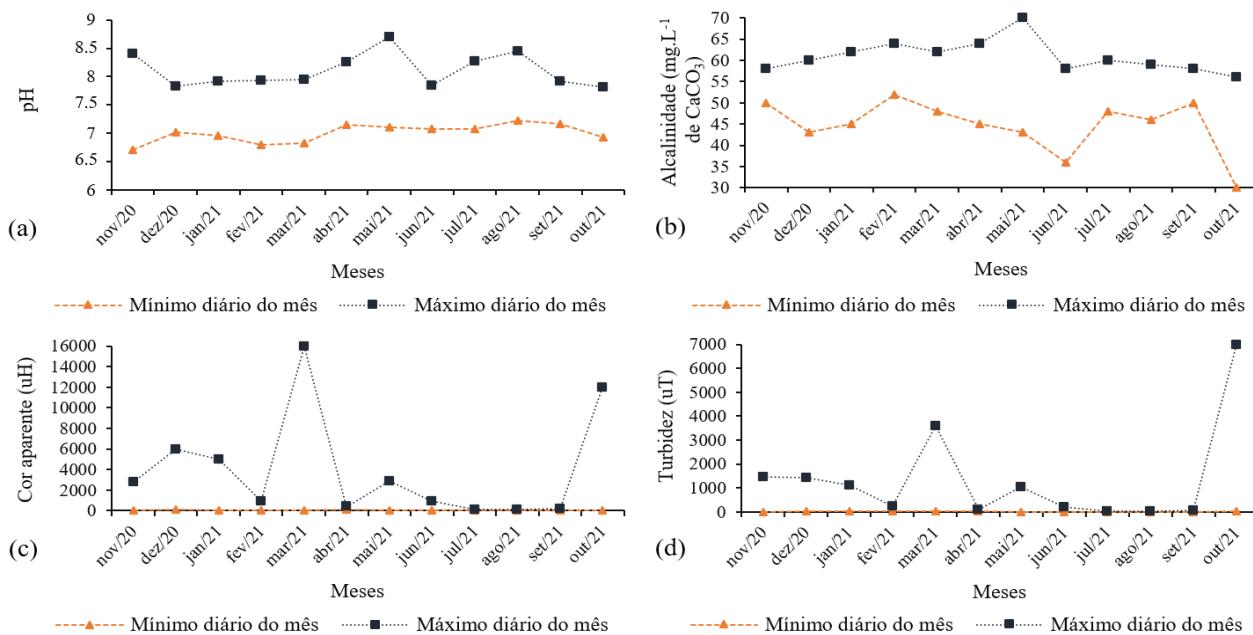


Figura 1. Variação dos valores de (a) pH, (b) alcalinidade, (c) cor aparente e (d) turbidez da água bruta captada no Rio Pirapó durante o período de estudo.

De acordo com Pavanelli (2001), a alcalinidade natural da água é considerada importante para o processo de coagulação química, visto que os coagulantes, como os sais de alumínio e ferro, atuam geralmente como ácidos em solução, promovendo o consumo da alcalinidade natural; sendo essa insuficiente, ocorre a redução do valor do pH do meio, o que pode gerar a necessidade da adição de alcalinizante. O coagulante policloreto de alumínio (PAC) apresenta baixo consumo de alcalinidade se comparado aos que são à base de sulfatos, o que gera, conseqüentemente, uma menor redução de pH.

O estudo desenvolvido por Constantino e Yamamura (2009) na ETA em análise comprovou esse fato. Ao ser utilizado o PAC como coagulante substituinte do sulfato de alumínio, o consumo de alcalinizante para o tratamento de água foi reduzido de tal forma que seu uso não foi mais necessário nos últimos dois meses do período analisado. Ademais, segundo informações operacionais, geralmente não é necessária a realização da correção de pH da água tratada com o alcalinizante, o que sugere, aliado ao estudo apresentado, que a alcalinidade da água bruta é considerada, mediante o uso de PAC, suficiente ao tratamento oferecido pela ETA em estudo.

Com relação à cor aparente, foi observado que os valores desse parâmetro se encontram entre 2.5 e 16000 uH (Figura 1 (c)). Na Resolução CONAMA n° 357 (Brasil, 2005) é apresentado o nível de cor natural do corpo d'água apenas em termos de cor verdadeira (75 uH para manancial classe

2). Em contrapartida, Kawamura (2000) recomenda um valor máximo de cor aparente para a água bruta de 1000 uH de forma a viabilizar a utilização da tecnologia de ciclo completo. Verifica-se na Figura 1(c) que os valores de cor aparente dos meses de novembro (25 a 2800 uH) e dezembro (75 a 6000 uH) de 2020, assim como os dos meses de janeiro (60 a 5000 uH), março (50 a 16000 uH), maio (30 a 2900 uH) e outubro (60 a 12000 uH) de 2021 encontram-se acima do limite recomendado pelo autor. Assim, os valores de cor aparente apresentados sinalizam que a tecnologia de ciclo completo pode não ser suficiente para tratar a água bruta captada pela ETA em estudo.

Quanto à turbidez, foi verificado que os valores desse parâmetro se encontram entre 1.68 e 7000 uT (Figura 1(d)). A Resolução CONAMA nº 357 (Brasil, 2005) estabelece para a turbidez do manancial superficial de classe 2 o valor máximo permitido (VMP) de 100 uT. Pode-se observar na Figura 1(d) que os valores de turbidez dos meses de novembro (3.76 a 1460 uT) e dezembro (19.6 a 1434 uT) de 2020, assim como os dos meses de janeiro (13.5 a 1100 uT), fevereiro (12.3 a 226 uT), março (13.09 a 3600 uT), maio (7.2 a 1050 uT), junho (2.7 a 209 uT) e outubro (13.3 a 7000 uT) de 2021 se encontraram em desacordo com a legislação. Já Kawamura (2000) recomenda um valor máximo de turbidez de 3000 uT para a água bruta de forma a viabilizar a utilização da tecnologia de ciclo completo. Pode-se observar na Figura 1(d) que os valores de turbidez dos meses de março (13.09 a 3600 uT) e outubro (13.3 a 7000 uT) de 2021 variam acima do limite recomendado pelo autor. Assim como os valores de cor aparente, os valores de turbidez apresentados sinalizam que a tecnologia de ciclo completo pode não ser suficiente para tratar a água bruta captada pela ETA em estudo.

A Figura 2 exibe a correlação linear existente entre os valores mensais de precipitação acumulada da região de Maringá-PR e os valores médios mensais de cor aparente e de turbidez da água bruta captada no Rio Pirapó durante o período de estudo.

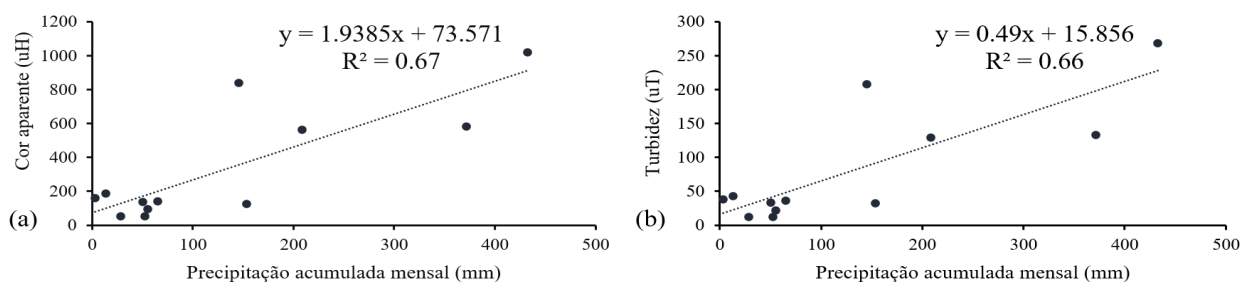


Figura 2. Correlação linear entre os valores mensais de precipitação acumulada da região de Maringá-PR e os valores médios mensais de (a) cor aparente e de (b) turbidez da água bruta captada no Rio Pirapó durante o período de estudo.

Os valores de coeficiente de determinação apresentados nas Figuras 2(a) ($R^2 = 0.67$) e 2(b) ($R^2 = 0.66$) evidenciam que, além da precipitação, outros fatores influenciam no comportamento observado da cor aparente e da turbidez no manancial. Segundo León (2005), a elevação da cor aparente na água bruta é influenciada, sobretudo, pelo aumento das chuvas, que intensificam o carregamento de material orgânico e inorgânico drenado nas margens dos rios, mas também por algas, ligninas, taninos, substâncias húmicas, fúlvicas e entre outras, derivadas da decomposição de material orgânico, que estejam presentes no corpo hídrico. Segundo Libânio (2010), minerais dissolvidos provenientes da geologia dos solos, como o ferro e o manganês, e as ações de origem antrópica, como o lançamento de efluentes domésticos e/ou industriais não tratados nos corpos d'água, podem também influenciar na constituição da cor do manancial.

Referente ao aumento da turbidez na água bruta, a CETESB (2020) afirma que ela está associada à precipitação que afeta a região de contribuição do corpo d'água, mas também aos sólidos em suspensão (partículas inorgânicas e detritos orgânicos) que podem nele estar contidos e às ações antrópicas que podem ocorrer em seu entorno, como o desmatamento, a mineração e o despejo de esgoto sanitário e de efluentes industriais e agropecuários sem tratamento. Essas atividades são consideradas causadoras de alterações significativas no ecossistema aquático, visto que geram a redução da fotossíntese de plantas aquáticas, o que inibe a produtividade dos peixes e, além disso, comprometem os usos doméstico, industrial e recreacional do recurso hídrico.

No estudo de Alves *et al.* (2008), a partir da avaliação da qualidade da água do Rio Pirapó, foi constatado duas principais fontes poluidoras do manancial: a exploração do solo, que se estende até às margens do rio, ausente de mata ciliar e que gera o carreamento, principalmente em períodos chuvosos, de sedimentos e nutrientes ao corpo hídrico, e o lançamento clandestino de esgoto doméstico, considerado o responsável pelos altos índices de matéria orgânica e coliformes presentes no corpo receptor. À vista disso, pode-se atestar a hipótese de que as ações de origem antrópica são responsáveis por influenciar na variação da coloração e da turbidez da água bruta.

Tendo em vista os fatos apresentados, é importante ressaltar que com o comprometimento da qualidade da água do manancial de captação podem ser exigidos ajustes no sistema de tratamento ou até mesmo a adoção de tecnologias de potabilização mais avançadas, os quais implicam em gastos substanciais para a empresa operadora da ETA (Andreoli *et al.*, 2013). Segundo Ferreira Filho (2017), a implantação de programas destinados ao controle e à prevenção de poluição nos mananciais de captação, com destaque à aplicação de sistemas de coleta, afastamento e tratamento dos esgotos sanitários é considerado o melhor investimento no que tange à redução dos custos de implantação e operação das ETA's. Pode-se considerar, portanto, que a implementação de tal medida é a melhor alternativa para otimizar a qualidade da água do Rio Pirapó.

Avaliação do processo de tratamento e da qualidade da água tratada

A unidade de mistura rápida, de acordo com dados operacionais, apresenta um tempo estimado para a dispersão do coagulante em torno de 0.98 s e gradiente (G) de 800 s^{-1} . Segundo a NBR 12216 (ABNT, 1992), em caso de impossibilidade da realização de ensaio experimental, o tempo de mistura rápida deve ser inferior a 5 s, com G entre 700 s^{-1} e 1100 s^{-1} . Para Ferreira Filho (2017), no caso em que o ressalto hidráulico atua como unidade de mistura rápida, o G deve estar entre 300 s^{-1} e 1000 s^{-1} . Portanto, o tempo de mistura rápida está em conformidade com a norma técnica e o G encontra-se dentro da faixa estabelecida pela norma técnica e da recomendada pelo autor.

Referente à aplicação do coagulante, foi verificado, a partir de observações feitas *in loco*, que ela é efetuada conforme preconiza a NBR 12216 (ABNT, 1992). O coagulante é aplicado imediatamente antes do ponto de maior dissipação de energia (à montante do ressalto hidráulico) por meio de jatos uniformemente espaçados (a uma distância aproximada de 3 cm), abrangendo toda a largura do canal de mistura rápida.

Quanto à definição da dosagem ótima do produto, segundo informações operacionais, ela é conduzida atualmente apenas pelo ensaio de *Jar-test*. De acordo com Silva *et al.* (2019), esse método técnico-laboratorial apresenta diversas restrições, tais como a demanda de tempo que solicita para a sua execução, a sua incapacidade de monitorar em tempo real as alterações das características físico-químicas da água bruta e ser vulnerável a erros humanos em sua operação.

Diante disso, sugere-se que seja implementado na ETA em estudo um sistema automatizado por Redes Neurais Artificiais (RNAs) para a predição do produto em tempo real. Modelos de RNAs eficientemente desenvolvidos para tal finalidade são imunes às falhas e aos ruídos (Silva *et al.*, 2019) e diminuem a necessidade da realização de ensaios de *Jar-test*, o que acarreta em menores intervenções humanas e custos operacionais e proporciona melhorias na qualidade da água tratada (Ramos *et al.*, 2016).

Durante o período de estudo, o pH da água coagulada variou entre 6 e 7.97. Tendo em vista que o PAC é o coagulante atualmente utilizado pela ETA em estudo e que, segundo Constantino e Yamamura (2009), ele geralmente age de forma eficaz numa faixa de pH compreendida entre 6 e 9, considera-se que o intervalo dos valores observados desse parâmetro químico na água coagulada se encontra dentro da faixa recomendada para que haja uma maior eficiência no processo de coagulação.

Para a realização do processo de floculação mecanizada, a água percorre a primeira unidade de floculadores mecânicos (câmaras com agitadores 9, 10, 11 e 12) com vazão de 800 L.s^{-1} e então 50% da vazão segue para a segunda unidade (câmaras com agitadores 1, 2, 5 e 6) e, o restante,

para a terceira unidade (câmaras com agitadores 3, 4, 7 e 8). A disposição dos agitadores nos floculadores mecânicos e as duas sequências que o fluxo de água percorre nessas unidades podem ser vistos na Figura 3.

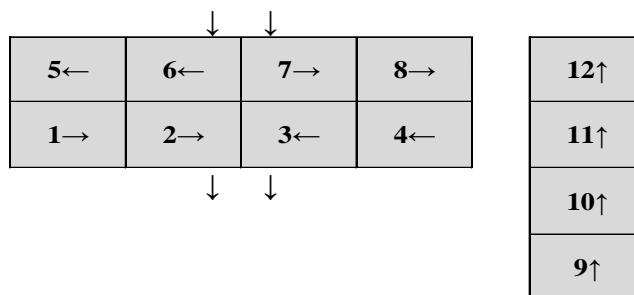


Figura 3. Representação esquemática da disposição dos agitadores nas câmaras dos floculadores mecânicos e as duas sequências que o fluxo de água percorre nessas unidades.

Segundo dados operacionais, as rotações impostas aos agitadores variam de 18 a 28 Hz, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Rotações impostas aos agitadores dos floculadores mecânicos.

Agitador	Rotação (Hz)
1	20
2	18
3	18
4	20
5	23
6	28
7	28
8	23
9	25
10	23
11	21
12	19

Os modelos matemáticos dos agitadores dos floculadores mecânicos, determinados considerando-se os resultados dos ensaios de *Jar Test*, constantes no relatório operacional da ETA em estudo, podem ser observados na Figura 4. A Figura 4(a) apresenta o modelo matemático que melhor se ajustou aos agitadores 1, 2, 3 e 4, a Figura 4(b) o que melhor se ajustou aos agitadores 5, 6, 7 e 8 e a Figura 4(c) o que melhor se ajustou aos agitadores 9, 10, 11 e 12.

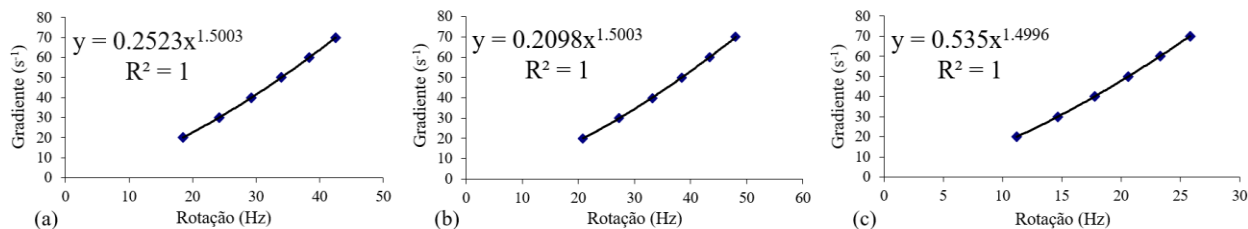


Figura 4. Modelo matemático dos agitadores (a) 1, 2, 3 e 4, (b) 5, 6, 7 e 8 e (c) 9, 10, 11 e 12.

A partir dos valores de vazão destinada para cada uma das unidades de floculação mecanizadas e do volume de cada uma delas (300 m³) foi determinado que o tempo de detenção hidráulico (TDH) do conjunto de floculadores mecânicos é de 31.25 min.

De acordo com a NBR 12216 (ABNT, 1992), em caso de impossibilidade da realização de ensaio experimental, os limites estabelecidos aos valores de G e de TDH para as unidades de floculação mecanizadas são 10 e 70 s⁻¹ e 30 e 40 min, respectivamente. Ferreira Filho (2017), no entanto, sugere valores de G entre 20 e 100 s⁻¹ e TDH entre 20 e 40 min, enquanto a empresa responsável por operar a ETA em análise, com base em experimentos, estabelece que o TDH deve ser superior a 15 min para as unidades de floculação, sejam elas hidráulicas ou mecanizadas.

Pode-se observar na Figura 4 que os valores de G gerados pelos agitadores mecânicos se encontram dentro da faixa estabelecida pela norma técnica e que apenas os valores de G gerados pelos agitadores mecânicos 2 e 3 (19.3 s⁻¹) estão fora do intervalo recomendado por Ferreira Filho (2017). Entretanto, por estarem próximos ao limite inferior sugerido pelo autor e por terem atendido à norma, considera-se que eles se encontram em conformidade com ambos, ao passo que o TDH do conjunto de floculadores mecânicos se encontra dentro da faixa estabelecida pela norma técnica, da indicada pela literatura e da determinada experimentalmente pela empresa.

Com relação à unidade existente para a floculação hidráulica, foi possível utilizar como critério avaliativo de seu desempenho somente o valor do TDH. Dados operacionais indicam que seu TDH é de 18.5 min. Considerando que a NBR 12216 (ABNT, 1992) estabelece que o TDH dos floculadores hidráulicos deve estar entre 20 e 30 min, em caso de impossibilidade de realização experimental, e que a faixa sugerida por Ferreira Filho (2017) é de 20 a 40 min, verifica-se que o TDH da unidade de floculação hidráulica encontra-se fora da faixa estipulada pela norma técnica e da recomendada pelo autor, apesar de atender a estabelecida experimentalmente pela empresa (TDH > 15 min).

Com base em observações feitas *in loco* e informações operacionais, demais constatações foram feitas quanto aos aspectos construtivos e operacionais das unidades de floculação. Tratando-se da compartimentação das unidades de floculação mecanizadas (Figura 3), ela se encontra de acordo com o recomendado pela literatura e o determinado pela NBR 12216 (ABNT, 1992). Segundo Ferreira Filho (2017), os tanques de floculação mecanizados devem estar compartimentados em duas a seis câmaras em série, enquanto Davis (2017) e a norma técnica determinam que eles devem estar compartimentados em pelo menos três câmaras em série.

Além disso, os componentes da unidade de floculação hidráulica (chicanas, telas e janelas de passagem) e os das unidades de floculação mecanizadas (turbinas, motores, redutores e inversores de frequência) estão em condições operacionais e de preservação adequadas e existem dispositivos de descarga e limpeza que possibilitam a limpeza e escoamento total tanto na unidade hidráulica quanto nas unidades mecanizadas em condições operacionais satisfatórias.

Para a realização do processo de decantação, existem dez decantadores que apresentam comprimento de 10.50 m e largura de 4.90 m e dois que apresentam comprimento de 14.35 m e largura de 6.10 m, sendo todos de alta taxa e constituídos por duas células. Considerando a vazão afluyente ao conjunto de decantadores de 1100 L.s⁻¹ e toda a sua área superficial (689.57 m²), foi determinado que sua taxa de aplicação superficial (TAS) é de 137.8 m³.m⁻².d⁻¹. A empresa responsável por operar a ETA em análise, com base em experimentos, estabelece que a TAS deve ser inferior a 160 m³.m⁻².d⁻¹ para assegurar a eficiência dos decantadores de alta taxa, ao passo que Ferreira Filho (2017) recomenda para eles uma TAS entre 120 e 180 m³.m⁻².d⁻¹. Assim, foi considerado que o valor encontrado para a TAS do conjunto de decantadores se encontra dentro dos intervalos esperados.

Ademais, tendo em vista a vazão afluyente ao conjunto de decantadores e o seu volume, sendo esse calculado considerando-se a profundidade de 5.20 m de cada decantador, foi determinado que o seu TDH é de 54.33 min. A empresa responsável por operar a ETA em estudo, com base em experimentos, estabelece que o TDH para os decantadores de alta taxa deve ser superior a 40 min. Portanto, o valor encontrado para o TDH do conjunto de decantadores está dentro da faixa determinada experimentalmente.

A partir de observações feitas *in loco* e informações operacionais, demais constatações foram feitas quanto aos aspectos construtivos e operacionais dos decantadores. Não há arraste de flocos nos decantadores, o nivelamento dos vertedores dos decantadores e das calhas/tubos coletores de água decantada se encontram em conformidade com a NBR 12216 (ABNT, 1992), o valor da taxa de coleta de água decantada (1.42 L.s⁻¹ por metro linear de calha) está de acordo com a NBR 12216 (ABNT, 1992), que estabelece, em caso de impossibilidade de ensaio

experimental, que ela seja inferior a 2.5 L.s^{-1} por metro linear de calha e os dispositivos de passagem da água floculada aos decantadores e o seu sistema de descarga de lodo estão em bom estado de conservação e operando de forma satisfatória.

A partir dos valores médios mensais de turbidez das amostras de água bruta e de água decantada apresentados durante o período de estudo, foi determinada a eficiência de remoção da turbidez da água bruta pelo processo de decantação, conforme exposto na Tabela 4. Embora a remoção da turbidez da água bruta pelo processo de decantação tenha sido significativa, pode-se visualizar na Tabela 4 que os valores de turbidez das amostras de água decantada em todos os meses em estudo variaram acima de 2 uT , faixa essa que se encontra em desacordo com a indicada como ótima por Ferreira Filho (2017) (inferior a 2 uT) para processos de mistura rápida que utilizam como coagulante o PAC.

Tendo em vista que não foram identificadas falhas construtivas ou operacionais nos decantadores, sugere-se que sejam realizadas intervenções no processo operacional das etapas de potabilização anteriores à decantação para otimizar a sua eficiência. Para tornar as condições mais favoráveis à decantação, recorre-se usualmente à aplicação de altas dosagens de coagulante, alternativa essa que implica em maior custo operacional e em maior volume de lodo gerado (Reali e Marchetto, 1997). Diante do exposto, se reforça a necessidade de ser implementado na ETA em estudo um sistema automatizado por RNAs para a predição do coagulante em tempo real, alternativa essa que evita superdosagens do produto e gastos operacionais desnecessários.

Outra possível solução para o problema identificado é a adição de polímeros auxiliares de coagulação e floculação. Além de otimizarem a qualidade da água decantada e filtrada, esses produtos aumentam a eficiência da desinfecção, devido à atenuação da concentração de sólidos suspensos na água filtrada, e diminuem o consumo do coagulante primário, os gastos com produtos químicos, o volume de lodo gerado dos decantadores e a ocorrência da deposição de lodo na rede e nos reservatórios de distribuição (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Diante dos valores médios de turbidez mensais das amostras de água decantada e de água filtrada, foi também possível determinar a eficiência de remoção da turbidez pelo processo de filtração, conforme pode ser observado na Tabela 4. Apesar da considerável remoção de turbidez pelo processo de filtração, foi diagnosticado que a qualidade apresentada pela água filtrada durante o período de estudo não se encontra em conformidade com o padrão de potabilidade brasileiro vigente. A Portaria nº 888 (Brasil, 2021) estabelece para a filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta) que 95% das amostras analisadas mensalmente devem apresentar no máximo 0.5 uT de turbidez, não podendo ultrapassar 1 uT nas 5% amostras restantes. Conforme pode ser visto na Tabela 4, os valores de turbidez de

todas as amostras de água filtrada analisadas nos meses de fevereiro, abril, maio, junho e julho de 2021 variaram até 0.5 uT, ou seja, eles atendem ao padrão de potabilidade estabelecido pela legislação brasileira.

Tabela 4. Valores médios de turbidez mensais da água bruta, decantada e filtrada, valores mínimos e máximos diários mensais de turbidez da água decantada e filtrada e porcentagens de remoção mensal de turbidez da água bruta pela decantação e da água decantada pela filtração durante o período de estudo.

Meses	Turbidez (uT)				Turbidez removida na decantação (%)	Turbidez (uT)			Turbidez removida na filtração (%)
	Água bruta	Água decantada				Água filtrada			
		Médio	Mínimo diário	Médio		Máximo diário	Mínimo diário	Médio	
Novembro/20	35.72	0.28	1.72	19.7	95.18	0.09	0.27	1.25	84.3
Dezembro/20	128.85	0.66	1.84	18	98.57	0.09	0.29	1.2	84.24
Janeiro/21	133.27	0.58	1.71	26	98.72	0.09	0.34	6.5	80.12
Fevereiro/21	42.81	0.68	1.38	3.44	96.78	0.14	0.32	0.5	76.81
Março/21	207.96	0.59	2.06	22	99.01	0.08	0.33	1.6	83.98
Abril/21	37.91	0.79	1.57	4.48	95.86	0.07	0.31	0.5	80.25
Maio/21	31.9	0.82	1.58	5.34	95.05	0.07	0.26	0.5	83.54
Junho/21	32.7	0.88	1.58	3.21	95.17	0.09	0.25	0.5	84.18
Julho/21	11.69	0.79	1.5	5.2	87.17	0.1	0.25	0.5	83.33
Agosto/21	11.79	0.76	1.44	3	87.79	0.13	0.29	0.65	79.86
Setembro/21	21.46	0.64	1.51	4.56	92.96	0.17	0.34	0.78	77.48
Outubro/21	268.02	0.61	1.97	29.4	99.26	0.13	0.38	2.19	80.71

Quanto aos valores de turbidez das amostras de água filtrada analisadas nos meses de agosto e setembro de 2021, embora eles tenham ultrapassado 0.5 uT (Tabela 4), os boletins de monitoramento de qualidade das amostras de água filtrada analisadas mensalmente pela empresa mostraram que o percentual desses valores foi pouco significativo a ponto desses meses ainda permanecerem, respectivamente, com 99.46% e 97.5% de suas amostras com valores de turbidez abaixo de 0.5 uT. Ademais, considerando que os valores de turbidez registrados em agosto e setembro de 2021 variaram, respectivamente, entre 0.29 e 0.65 uT e 0.34 e 0.78 uT (Tabela 4) assegura-se que o restante das amostras de água filtrada analisadas nesses meses apresenta valores de turbidez abaixo de 1 uT. Assim, pode-se dizer que os valores de turbidez das amostras de água filtrada analisadas nesses dois meses também atendem ao padrão de potabilidade estabelecido pela legislação brasileira.

Referente aos valores de turbidez das amostras de água filtrada analisadas nos meses de novembro e dezembro de 2020 e nos meses de janeiro, março e outubro de 2021, apesar de terem ultrapassado 0.5 uT (Tabela 4), os boletins de monitoramento de qualidade das amostras

de água filtrada analisadas mensalmente pela empresa mostraram que o percentual desses valores foi pouco expressivo a ponto desses meses ainda permanecerem, respectivamente, com 99.44%, 99.19%, 95.43%, 98.65% e 96.24% de suas amostras com valores de turbidez abaixo de 0.5 uT. Porém, pelo restante dos valores de turbidez das amostras de água filtrada analisadas nesses cinco meses terem ultrapassado 1 uT (Tabela 4), pode-se dizer que o padrão de potabilidade estabelecido pela legislação brasileira não foi respeitado nesse período.

O nível de turbidez na água filtrada é que determina a eficiência da desinfecção na inativação dos microrganismos patogênicos (Libânio, 2010). Assim, a Portaria nº 888 (Brasil, 2021) estabelece que para a qualidade microbiológica da água tratada ser assegurada, é necessário que o padrão de turbidez por ela imposto à água filtrada seja atendido. À vista disso, evidencia-se a necessidade de serem realizadas as intervenções sugeridas ao processo operacional das etapas de potabilização anteriores à filtração e a inspeção dos parâmetros construtivos e operacionais dos filtros da ETA em estudo.

Para a realização do processo de filtração, existem dez filtros, em que todos apresentam duas células, sistema de drenagem composto por vigas californianas e um canal central para a coleta de água de lavagem e a introdução da água decantada. Desses, oito apresentam comprimento de 9 m e largura de 4.80 m e dois apresentam comprimento de 7 m e largura de 6.10 m. Com exceção de quatro (comprimento de 9 m e largura de 4.80 m) dos dez filtros, todos apresentam calhas coletoras de água de lavagem. Com base na vazão afluyente ao conjunto de filtros ($1100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$) e em toda a sua área superficial (431 m^2), foi calculado que a TAS do conjunto de filtros é de $220.51 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$.

Considerando que as unidades são de filtração rápida de dupla camada (areia e antracito), a NBR 12216 (ABNT, 1992) estabelece, em caso de impossibilidade de ensaio experimental, que a TAS seja de até $360 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ enquanto Kawamura (2000) recomenda que a TAS esteja entre 240 e $360 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ para esses tipos de filtros. Ademais, a empresa responsável por operar a ETA em estudo, com base em experimentos, estabelece uma TAS inferior a $320 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}$ para garantir a eficiência dessas unidades de filtração. Assim, foi considerado que o valor encontrado para a TAS do conjunto de filtros se apresenta dentro da faixa estabelecida pela norma técnica e da determinada experimentalmente, mas abaixo do limite inferior recomendado pelo autor.

Com relação à carreira de filtração, de acordo com dados operacionais a sua duração é de 50 horas. Segundo Ferreira Filho (2017) e experimentos realizados na ETA em estudo, é recomendado que a duração da carreira de filtração para os filtros rápidos por gravidade do tipo dupla camada (areia e antracito) seja maior que 24 horas. Assim, é possível dizer que o valor da duração da carreira de filtração dos filtros da ETA em análise está em conformidade com a faixa indicada pela literatura e a estabelecida experimentalmente.

A velocidade da água de lavagem e a taxa de lavagem dos filtros, de acordo com dados operacionais são de $75 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e $1080 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectivamente. A NBR 12216 (ABNT, 1992) estabelece que a velocidade da água de lavagem dos filtros não seja inferior a $60 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e Ferreira Filho (2017) recomenda, para filtros rápidos por gravidade constituídos de areia e antracito, taxas de lavagem entre 900 e $1100 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Portanto, pode-se dizer que esses parâmetros hidráulicos estão adequados. Em contrapartida, foi verificada a presença de aglutinações de lodo no meio filtrante dos filtros desprovidos de calhas coletoras da água de lavagem.

Como medidas corretivas, se propõe a instalação de calhas coletoras da água de lavagem nos filtros destituídos desses elementos e a alteração do método de lavagem dos filtros, a qual atualmente é realizada exclusivamente com água em contracorrente. Segundo Amirtharajah (1978), esse método de lavagem não é capaz de remover completamente as impurezas retidas durante o processo de filtração. As impurezas não removidas tendem então a se acumular continuamente no meio filtrante, o que favorece a formação de aglutinações de lodo que podem elevar a sua perda de carga e comprometer a qualidade da água filtrada. Devido a isso, Ferreira Filho (2017) recomenda que sejam adotados outros métodos de lavagem, como o de lavagem superficial seguido de água em contracorrente.

Quanto ao processo de desinfecção, inicialmente foram analisados os parâmetros microbiológicos e, posteriormente, a concentração de cloro residual livre da água tratada. Com relação à *Escherichia coli* e Coliformes Totais, foram analisados dados coletados em dois pontos de amostragem, na saída do tratamento e na rede de distribuição de água (ponto de coleta não especificado). Todas as amostras coletadas apresentaram ausência de *Escherichia coli* e Coliformes Totais em 100 mL. Portanto, os parâmetros microbiológicos da água tratada estão em conformidade com o estabelecido pela Portaria n° 888 (Brasil, 2021).

A variação dos valores da concentração de cloro residual livre na água produzida pela ETA em análise (reservatórios) durante o período de estudo está apresentada na Figura 5. A partir dos dados apresentados, é possível verificar que os valores da concentração de cloro residual livre presente na água tratada (reservatórios) se encontram abaixo do VMP estabelecido pela legislação ($5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

A Figura 6 apresenta a variação dos valores de pH, cor aparente, turbidez e concentração do íon fluoreto da água produzida pela ETA em análise durante o período de estudo. A partir dos dados apresentados é possível averiguar que todos os parâmetros estão em conformidade com a Portaria n° 888 (Brasil, 2021), que estabelece para água tratada pH de 6 a 9, cor aparente com VMP de 15 uH, turbidez com VMP de 5 uT e íon fluoreto com VMP de $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

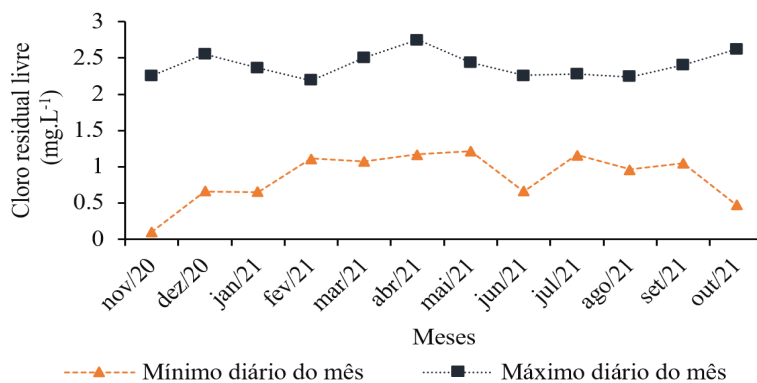


Figura 5. Variação dos valores da concentração de cloro residual livre na água tratada durante o período de estudo.

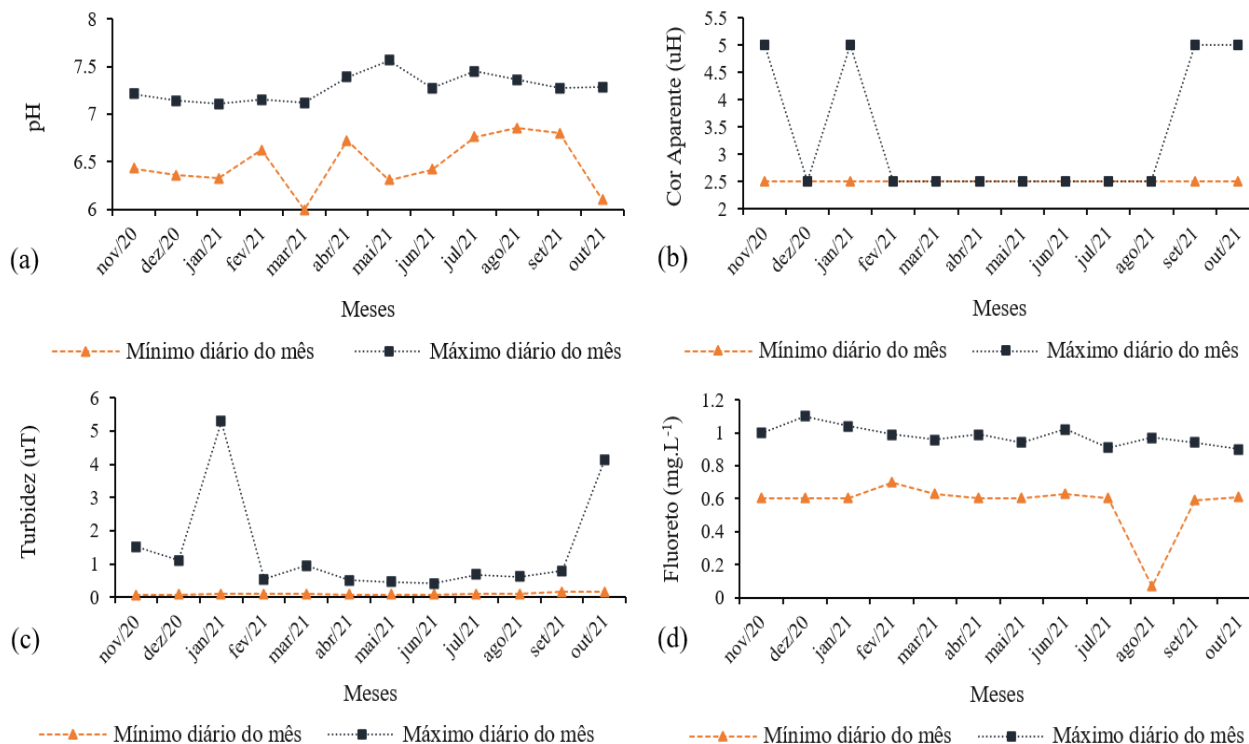


Figura 6. Variação dos valores de (a) pH, (b) cor aparente, (c) turbidez e (d) concentração do íon fluoreto da água tratada durante o período de estudo.

Se tratando dos resíduos gerados pela ETA em estudo, dados operacionais apontam que as águas de lavagem dos floculadores, decantadores e filtros e o lodo gerado nos decantadores são descartados na rede de drenagem de águas pluviais desprovidos de tratamento prévio. Portanto, é necessário que sistemas destinados à recuperação das águas provenientes desse processo e ao processamento/tratamento e destinação ambientalmente corretos do lodo sejam implementados. O sistema destinado à recuperação das águas de lavagem das unidades de tratamento de uma ETA é usualmente constituído por um tanque de equalização, por um sistema de clarificação e por estações elevatórias, o que permite o retorno das águas clarificadas para o início do processo de tratamento (Ferreira Filho, 2017). Já o sistema destinado ao processamento/tratamento do lodo é usualmente constituído pelos processos de adensamento, estabilização, condicionamento, desidratação e de higienização, visando o manuseio adequado e a disposição final ambientalmente adequada desse resíduo (Cassini *et al.*, 2003; Ferreira Filho, 2017; Von Sperling, 2007). Dentre as alternativas de aproveitamento do lodo existentes, pode-se citar a sua aplicação em solos agrícolas, na produção de mudas (Cunha *et al.*, 2019) e como substituto parcial das argilas na fabricação de materiais cerâmicos e do cimento na fabricação de pastas, argamassas e concreto (Santos *et al.*, 2018).

Comentários finais

A avaliação de desempenho aplicada na ETA em estudo se mostrou viável e efetiva desde a sua concepção até os resultados obtidos com a sua implementação. Foi estruturada utilizando-se indicadores fundamentados em dados cruciais para o adequado funcionamento de uma ETA e de fácil acesso ao seu gestor e, ao ser implementada, possibilitou a identificação dos pontos críticos e das falhas de caráter construtivo e operacional da unidade estudada, fornecendo, assim, subsídios para a melhoria do seu processo de tratamento.

Inicialmente foi diagnosticado que a qualidade da água do Rio Pirapó está comprometida por motivadores de origem natural e antrópica e, a tal ponto, de impactar negativamente o desempenho do tratamento oferecido pela ETA em estudo. Se considera a implementação de medidas de proteção do manancial a melhor alternativa para otimizar a qualidade da água do Rio Pirapó por ser menos onerosa e mais sustentável que a realização de ajustes no tratamento e a adoção de tecnologias de potabilização mais avançadas.

Avaliadas as etapas do tratamento de água foram identificados como pontos críticos a qualidade apresentada pela água decantada e filtrada e o modo como é executado o descarte das águas de lavagem e do lodo. Em vista disso, se sugere o uso de RNAs para a predição do coagulante em tempo real, a adição de polímeros auxiliares de coagulação e floculação, a instalação de calhas coletoras de água de lavagem nos filtros desprovidos desses elementos, a substituição do atual método de lavagem dos filtros, efetuado exclusivamente com água em contracorrente, por outro

alternativo, como o de lavagem superficial seguido de água em contracorrente, e a implementação de sistemas destinados à recuperação das águas de lavagem e ao processamento/tratamento do lodo, visando a destinação ambientalmente correta de tais resíduos.

Mesmo diante da má qualidade apresentada pela água bruta e de anomalias detectadas nas etapas do tratamento de água foi possível verificar que a qualidade apresentada pela água tratada se encontra em conformidade com o padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria nº 888/21. Ainda assim, se julga necessária a implementação das medidas corretivas supracitadas na ETA em estudo, tendo em vista que é por meio desse feito que será possível aumentar a sua eficiência e propiciar a sustentabilidade do seu sistema de tratamento de água.

Referências bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) *NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público*, ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 18 pp.
- Achon, C. L. (2008) *Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água a luz dos conceitos da ISO 14.001*, Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 235 pp.
- Albuquerque, M.V. D. C., Lopes, W. S., Cartaxo, A. D. S. B., Leite, V. D. (2019) Filtração Direta Descendente: conceito, características e aplicações no tratamento de água, *I Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade e III Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido*, Campina Grande, Brasil.
- Alves E. C., Silva C. F., Cossich E. S., Tavares C. R. G., Souza-Filho E. E., Carniel A. (2008) Avaliação da qualidade da água da bacia do rio Pirapó - Maringá, Estado do Paraná, por meio de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos, *Acta Scientiarum Technology*, **30**(1), 39-48.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226520006>
- Amirtharajah, A. (1978) Optimum backwashing of sand filters, *Journal of Environmental Engineering Division*, **104**(5), 917-932. <https://doi.org/10.1061/JEEGAV.0000827>
- Andreoli, C. V., Rocha, W. N., Schuchardt, W. (2013) Processo de Captação Subsuperficial com Pré-filtração de Água. In: Carneiro, C., Andreoli, C. V., (Eds.), *Lodo de Estações de Tratamento de Água - Gestão e Perspectivas Tecnológicas*, Sanepar, Curitiba, Brasil, 273-300. Acesso em 12 de janeiro de 2022, disponível em: https://www.faprr.pr.gov.br/sites/fundacao-araucaria/arquivos_restritos/files/documento/2020-06/cp18_2013_araucariasanepar_captacaosubsuperficial.pdf
- APHA, AWWA, WEF, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation (2017) *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, 23rd ed. Washington, D.C.: APHA, 1504 pp.
- Botero, W. G., Santos, A. D., Oliveira, L. C. D, Rocha, J. C. (2009) Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola, *Revista Química Nova*, **32**(8), 2018-2022.
<https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000800007>
- Braga, F. P. (2014) *Avaliação de desempenho de uma estação de tratamento de água do município de Juiz de Fora-MG*, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental), Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, 61 p.
- Brasil (2005) *Resolução nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA*, Diário Oficial da União, Brasília, Distrito Federal, 17 de março de 2005.

- Brasil (2014) *Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS*, Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde - FUNASA, Brasília, Distrito Federal.
- Brasil (2021) *Portaria GM/MS nº 888*, Diário Oficial da União, Brasília, Distrito Federal, 7 de maio de 2021.
- Cassini, S. T., Chernicharo, C. A. L., Andreoli, C. V., França, M., Borges, E. S. M., Gonçalves, R. F. (2003) Hidrólise e Atividade Anaeróbia em Iodos. In: Cassini, S. T., (Coord.), *Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás, ABES/RiMA, Rio de Janeiro*, Brasil. Acesso em 14 de abril de 2023, disponível em: <http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/ProsabStulio.pdf>
- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2020) *Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos metodologias analíticas e de amostragem*. Acesso em 05 de dezembro de 2021, disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2021/09/Apendice-C-Significado-ambiental-e-sanitario-das-variaveis-de-qualidade-das-aguas-e-dos-sedimentos-metodologias-analiticas-e-de-amostragem.pdf>
- Cirne, J. R. R., Lima, E. D. D., Alves, M. P., Lopes, W. S. (2019) Tecnologia de dupla filtração para o tratamento de água eutrofizada: revisão, *IV Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências*, Campina Grande, Brasil.
- Constantino A. F., Yamamura V. D. (2009) Redução do gasto operacional em estação de tratamento de água utilizando o PAC, *Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana*, Maringá, Brasil.
- Cunha, G. D. D., Lima, J. A. V., Stachiw, R., Tronco, K. M. D. Q. (2019) Caracterização e destinação ambientalmente corretas do lodo gerado pelas estações de tratamento de água, *Nature and Conservation*, **12**(2), 19-30. <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2019.002.0003>
- Davis, M. (2017) *Tratamento de águas para abastecimento e residuárias: princípios e práticas*. 1ª ed., Elsevier, Rio de Janeiro, Brasil, 824 pp.
- Di Bernardo, L., Brandão, C. C. S., Heller, L. (1999) *Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas*. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB), Rio de Janeiro, Brasil. Acesso em 13 de abril de 2023, disponível em: http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/aguas_de_abastecimento.pdf
- Di Bernardo, L., Dantas, A. D. B. (2005) *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. 2ª ed., RiMa, 792 pp.
- Di Bernardo, L., Mendes, C. G. D. N. (1986) Coagulação e filtração direta ascendente, *Revista DAE*, **46**(145), 202-208.
- Di Bernardo, L., Sabogal Paz, L. P. (2008) *Seleção de tecnologias de tratamento de água*. LDiBe, São Carlos, Brasil, 878 pp.
- Ferreira Filho, S. S. (2017) *Tratamento de Água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento - Um guia prático para alunos e profissionais*, 1ª ed., Elsevier, Rio de Janeiro, Brasil, 463pp.
- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia (2021) *Chuva Acumulada Mensal - Estação Maringá (83767) - 2020/2021*. Acesso em 18 de novembro de 2021, disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/>.
- Kawamura, S. (2000) *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*, 2ª ed., John Wiley & Sons, 691 pp.
- León, J. A. C. (2005) *Calidad de aguas para estudiantes de ciencias ambientales*, 1ª ed., Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 300pp.
- Libânio, M. (2010) *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*, 3ª ed., Átomo, Campinas, Brasil, 486 pp.
- Menezes, M. C. D. (2019) *Investigação de processos operacionais de uma estação de tratamento de água de ciclo completo*, Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, 142 pp.
- Oliveira, A. L. D. (2007) *Floto-filtração como pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio tratando esgoto sanitário*, Dissertação (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 233 pp.
- Oliveira, M. D., Bianchi, D. P. Z., Fonseca, J. F. R.; Gorza Júnior, N. A., Libânio, M. (2021) Avaliação de fatores intervenientes no desempenho de estações de tratamento de água, *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, **26**(4), 613-625. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220180203>

- Paraná (1999) *Portaria Superintendência dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente (SUREHMA) nº 004/91*. Acesso em 18 de novembro de 2021, disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/enquadramento_b_pirapo.pdf
- Pavanelli, G. (2001) *Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada*, Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 233 pp.
- Pereira, L. G., Silva, G. A., Libânio, M. (2018) Proposição de sistema de indicadores de desempenho operacional de estações de tratamento de água à luz do prestador de serviço: aplicação a cinco estações de ciclo completo, *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, **23**(6), 1163-1172. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018168875>
- Ramos, R. O., Sátiro, J. R., Albuquerque, M. V. C., Lopes, W. S. (2016) Redes neurais artificiais aplicadas na predição de dosagens de coagulante no tratamento convencional de água: uma revisão, *I Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido*, Campina Grande, Brasil.
- Reali, M. A. P., Marchetto, M. (1997) Clarificação por flotação de água bruta com cor moderadamente elevada, *19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Sabogal Paz, L. P. (2007) *Modelo conceitual de seleção de tecnologias de tratamento de água para abastecimento de comunidades de pequeno porte*, Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 398 pp.
- Santos, G. Z. B. D., Melo Filho, J. D. A., Manzato, L (2018) Perspectivas de aplicações tecnológicas de lodo gerado no processo de tratamento de água dos rios Negro e Solimões, *Revista Materia*, **23**(3), 1-14. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0501>
- Silva, A. E., Filho, J. A. A., Andrade, V. C. V., Macena, J. C. (2019) Aplicação de inteligência artificial no tratamento de água, *Revista Anais Semana Nacional de Ciência e Tecnologia*, **1**(1), 419-421.
- Von Sperling, M. (2005) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, 3ª ed, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 452 pp.