



Aplicação do controle estatístico de processo no monitoramento da estação de tratamento de água de uma indústria de laticínios

Application of statistical process control in monitoring and evaluating of a water treatment plant in a dairy industry

Desirée Bridgitt de França Bernardo¹, Gustavo Henrique Daniel Santos Silva¹, Elisandra Rabêlo da Silva¹, Marteson Cristiano dos Santos Camelo¹, Andrea Galindo Carneiro Rosal¹, Suzana Pedroza da Silva¹

¹ Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Garanhuns, Brasil

Contato: desireebriidgitt@gmail.com

Palavras-Chave

água industrial
controle de qualidade
diagrama de Ishikawa
diagrama de Pareto
eficiência
potabilidade da água

Key-word

industrial water
quality control
Ishikawa diagram
Pareto diagram
efficiency
water potability

RESUMO

O objetivo deste trabalho consistiu na aplicação dos diagramas de Ishikawa e de Pareto para monitorar a estação de tratamento de água (ETA) de uma indústria de laticínios, com o intuito de identificar e reduzir erros que causam não conformidades nos padrões de potabilidade da água. O trabalho foi dividido em 4 etapas: monitoramento (6 meses), avaliação e identificação das causas das não conformidades e, proposição de soluções possíveis. O monitoramento revelou que o parâmetro pH apresentou o maior grau de conformidade, enquanto o residual de cloro demonstrou o menor percentual. A eficiência geral da ETA (64,04%) foi classificada como estado de alerta. O diagrama de Ishikawa identificou 20 principais causas e o diagrama de Pareto indicou que a resolução das 6 primeiras causas reduzirá aproximadamente 52% das não conformidades. Foi possível identificar os fatores relacionados à mão de obra, material, métodos, meio ambiente, máquina e medição, responsáveis pelas não conformidades no tratamento e nos parâmetros físico-químicos da água tratada. Portanto, é necessário implementar melhorias na ETA através do planejamento de ações corretivas como treinamento aos colaboradores, seguindo a resolução dos fatores indicados nos diagramas de Ishikawa e de Pareto.

ABSTRACT

The objective of this work consisted of applying Ishikawa and Pareto diagrams to monitor the water treatment station (WTS) of a dairy industry, in order to identify and reduce errors that cause non-conformities in water potability standards. The work was divided into 4 stages: monitoring (6 months), evaluation and identification of the causes of non-conformities, and proposition of possible solutions. Monitoring revealed that the pH parameter showed the highest degree of conformity, while residual chlorine demonstrated the lowest percentage. The overall efficiency of the WTS (64.04%) was classified as an alert state. The Ishikawa diagram identified 20 main causes, and the Pareto diagram indicated that resolving the first 6 causes will reduce approximately 52% of non-conformities. It was possible to identify factors related to labor, materials, methods, environment, machinery, and measurement, responsible for non-conformities in the treatment and physicochemical parameters of treated water. Therefore, it is necessary to implement improvements in the WTS through corrective action planning such as employee training, equipment calibration, maintenance, following the resolution of the factors indicated in the Ishikawa and Pareto diagrams.

Informações do artigo

Recebido: 26 de julho, 2023
Aceito: 4 de novembro, 2023
Publicado: 01 de dezembro, 2023

Introdução

A água desempenha um papel fundamental no processo produtivo da indústria de alimentos, sua qualidade higiênico-sanitária exerce influência direta nos alimentos produzidos e, portanto, deve apresentar características que assegurem a sua qualidade, necessitando passar por um procedimento em uma Estação de Tratamento de Água (ETA) (SIMENSATO; BUENO, 2019).

Esse procedimento tem como objetivo transformar a água bruta proveniente de rios, lagos ou barragens em água potável, por meio de processos químicos, físicos ou uma combinação de ambos, o resultado desse processo é conhecido como água tratada (AL-OMARI; KHAN; JAAFAR, 2020).

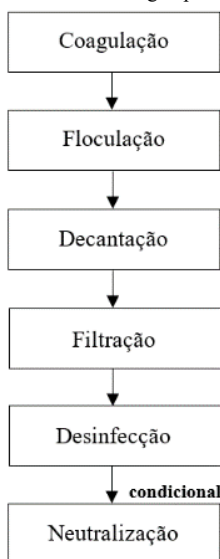
O tratamento da água para fins industriais ocorre em seis etapas distintas: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e, opcionalmente, neutralização (CESAN, 2013).

O Fluxograma da Figura 1 representa o sequenciamento dessas etapas no tratamento de água para uso industrial.

Para otimizar a eficiência do processo de tratamento e garantir a qualidade da água, é possível utilizar o Controle Estatístico de Processo (CEP).

O CEP consiste em um conjunto de ferramentas que têm como objetivo padronizar e viabilizar a qualidade, identificando defeitos no produto final, evitando desperdícios e tornando o processo produtivo eficaz e de alta qualidade (SOARES, 2017; JUSOH et al., 2021).

Figura 1. Fluxograma do tratamento de água para fins industriais



Fonte: Adaptado de CESAN (2013); AL-OMARI; KHAN; JAAFAR (2020); SILVA et al. (2021)

Para otimizar a eficiência do processo de tratamento e garantir a qualidade da água, é possível utilizar o Controle Estatístico de Processo (CEP).

O CEP consiste em um conjunto de ferramentas que têm como objetivo padronizar e viabilizar a qualidade, identificando defeitos no produto final, evitando

desperdícios e tornando o processo produtivo eficaz e de alta qualidade (SOARES, 2017; JUSOH et al., 2021).

A aplicação das ferramentas de CEP, como o Diagrama de Ishikawa e o Diagrama de Pareto, no monitoramento e avaliação da eficiência da estação de tratamento de água em uma indústria de laticínios proporciona uma abordagem científica e sistemática para identificar e analisar as causas raiz dos problemas relacionados ao processo de tratamento de água.

O Diagrama de Ishikawa, também conhecido como Diagrama de Causa e Efeito, permite a visualização e classificação das diversas causas potenciais que podem afetar a qualidade da água tratada, agrupando-as em categorias como meio ambiente, máquina, mão de obra, medição e método (MONTGOMERY, 2021).

Enquanto que o Diagrama de Pareto, desenvolvido por Vilfredo Pareto, auxilia na priorização dessas causas, identificando as mais significativas com base em sua frequência de ocorrência e impacto negativo (MONTGOMERY, 2021).

A aplicação conjunta dessas ferramentas no contexto do monitoramento e avaliação da eficiência da estação de tratamento de água em indústrias de laticínios permite uma análise mais precisa dos fatores que influenciam o processo de tratamento. Essas ferramentas permitem uma identificação clara das principais causas que podem comprometer a eficiência da estação de tratamento, fornecendo insights para a tomada de decisões embasadas em dados e a implementação de ações corretivas direcionadas (MONTGOMERY, 2021).

Ao utilizar o Diagrama de Ishikawa e o Diagrama de Pareto, é possível compreender de forma mais aprofundada os fatores que afetam a eficiência da estação de tratamento de água, levando em consideração aspectos ambientais, operacionais e de controle de qualidade (MONTGOMERY, 2021).

Essa abordagem baseada em evidências contribui para a garantia da conformidade dos parâmetros físico-químicos da água industrial, além de proporcionar melhorias contínuas no processo de tratamento (OAKLAND, 2019).

Portanto, a utilização do CEP, por meio das ferramentas do Diagrama de Ishikawa e do Diagrama de Pareto, no monitoramento e avaliação da estação de tratamento de água em indústrias de laticínios é fundamentada em metodologias reconhecidas e amplamente aplicadas, proporcionando uma base sólida para a pesquisa e a implementação de melhorias no processo de tratamento de água (MONTGOMERY, 2021; OAKLAND, 2019).

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo aplicar a ferramenta do CEP (Diagrama de Ishikawa e Diagrama de Pareto) no monitoramento e avaliação da eficiência da estação de tratamento de água de uma indústria de laticínios. E mais especificamente, identificar e reduzir erros que causam não conformidades nos padrões de potabilidade da água industrial, de acordo com a legislação vigente, evitando possíveis contaminações indiretas do produto final, desperdício de produtos químicos e problemas de manutenção.

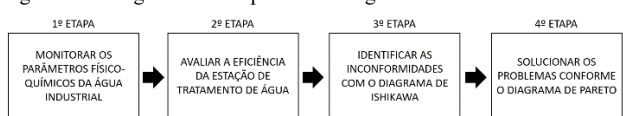
Material e Métodos

A indústria de laticínios em estudo possui uma barragem como principal fonte de abastecimento de água, a qual é captada, tratada e armazenada em uma cisterna para ser utilizada no processo produtivo. Entretanto, devido à alta demanda é necessário comprar água tratada da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), como esta água já passou por um tratamento é apenas depositada na cisterna de água tratada da barragem, formando a água industrial utilizada no sistema de distribuição da indústria.

As análises da água industrial quanto aos parâmetros de cor aparente, pH, turbidez e residual de cloro são realizadas no Laboratório de Controle de Qualidade da indústria e a frequência dessas análises é determinada pelo seu Programa de Autocontrole (PAC), 12 vezes ao dia, a cada 2 horas, com registros em planilhas físicas e eletrônicas. Sendo assim, os dados referentes aos resultados das análises desses parâmetros foram disponibilizados pela empresa para realização deste trabalho.

Para o desenvolvimento do mesmo, a metodologia foi dividida em quatro etapas (Figura 2), as quais promovem o monitoramento, avaliação e identificação das possíveis causas de inconformidades no processo de tratamento e nos parâmetros físico-químicos da água industrial, bem como promovem possíveis soluções de melhoria através da aplicação das ferramentas CEP.

Figura 2. Fluxograma das etapas metodológicas.



Fonte: Autores (2022)

A primeira fase do estudo consistiu no monitoramento dos parâmetros físico-químicos da água industrial (cor aparente, pH, turbidez e residual de cloro) a partir dos resultados das análises de água realizadas em laboratório interno e cedidos pela empresa. O monitoramento se deu com uma amostragem de 12 amostras diárias ao longo de um período de seis meses (janeiro a junho de 2022), totalizando 2.172 amostras para os quatro parâmetros analisados. Em seguida, foi realizada a segunda fase, que envolveu a avaliação da eficiência da Estação de Tratamento de Água (ETA), analisando os resultados dos quatro parâmetros físico-químicos da água obtidos na etapa anterior e avaliando-os em relação à conformidade determinada pelo padrão da legislação.

A terceira fase foi dedicada à elaboração do Diagrama de Ishikawa, com o objetivo de identificar as possíveis causas que afetam o processo de tratamento da água, levando a resultados não conformes e comprometendo a eficiência da ETA. Por fim, a quarta fase teve como objetivo solucionar e priorizar a resolução dos problemas identificados na fase anterior, visando garantir a eficiência da ETA. Para isso, o Diagrama de Pareto foi utilizado como ferramenta de auxílio na tomada de decisões para corrigir as possíveis causas que afetam o tratamento da água bruta e os parâmetros físico-químicos da água industrial.

O monitoramento e a avaliação da eficiência da ETA descritos nas fases um e dois foram realizados com base na conformidade dos parâmetros físico-químicos da água tratada em relação à Portaria N° 888/2021, que estabelece os padrões de potabilidade da água, conforme estabelecido pelo Ministério da Saúde, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de potabilidade da água

Parâmetro	Padrão
Cor aparente	≤ 15 PCU
pH	6,0 a 9,0
Turbidez	≤ 1 NTU
Residual de cloro	0,2 a 2,0 mg/L

Fonte: Portaria N° 888/2021

Para realizar a análise dos dados, cálculos e criação de gráficos, utilizou-se o software Excel. A fim de determinar a conformidade dos parâmetros físico-químicos avaliados em relação à legislação vigente sobre a potabilidade da água, foi calculado o grau de conformidade individualmente para cada um desses parâmetros, utilizando a Equação 1.

$$GC_i = \frac{TA_c}{TA} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

GC_i : grau de conformidade

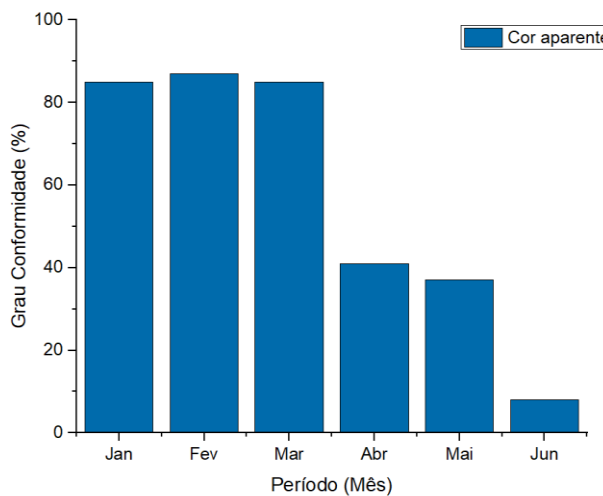
TA_c : total de amostras conforme.

TA : total de amostras ou análises realizadas.

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos no monitoramento da qualidade da água industrial, fornecidos pela empresa, são apresentados a partir de gráficos para os percentuais de conformidade de cada um dos parâmetros físico-químicos avaliados (cor, pH, turbidez e residual de cloro). A Figura 3 apresenta a porcentagem de conformidade para o parâmetro de cor aparente da água industrial ao longo dos seis meses de monitoramento.

Figura 3. Grau de conformidade mensal da cor aparente da água da indústria de laticínios



Fonte: Autores (2022)

Observou-se que nos três primeiros meses houve uma estabilidade com resultados de conformidade acima de 80%, mais próxima do ideal (100%).

No entanto, a partir de abril, ocorreu uma queda significativa, com dados abaixo de 50% e chegando a apenas 8% no mês de junho; o qual registrou o maior índice de inconformidade para esse parâmetro.

A coloração da água é influenciada pela presença de substâncias minerais e/ou orgânicas, como ferro, manganês e algas, que podem conferir diferentes tonalidades dependendo da quantidade e natureza dessas substâncias (AL-OMARI; KHAN; JAAFAR, 2020). Normalmente, a água proveniente de rios e lagos apresenta uma coloração amarelada devido à presença de ácidos húmicos, que são compostos naturais resultantes da decomposição de vegetais. Esses compostos não representam riscos para a saúde, e sua presença é mais pronunciada durante períodos de chuva intensa, quando ocorre a lixiviação de substratos orgânicos no ambiente aquático, afetando assim a coloração da água (AL-OMARI; KHAN; JAAFAR, 2020; KUMAR, SHARMA, 2021).

A indústria em questão está localizada em uma região onde, de acordo com Cavalcante, Lucena e Moura (2019), o período chuvoso ocorre entre os meses de março a agosto, enquanto o período seco abrange os meses de setembro a fevereiro. Dessa forma, é possível relacionar que os primeiros três meses de monitoramento, que correspondem ao período seco, apresentaram maior conformidade no parâmetro de cor, devido à menor ocorrência de chuvas, o que evitou o acúmulo de matéria orgânica na água e, conseqüentemente, não afetou negativamente o grau de conformidade deste parâmetro (Figura 3).

Por outro lado, os meses de abril a junho, caracterizados como períodos chuvosos, apresentaram altos índices de precipitação, o que resultou em um aumento na coloração da água bruta, dificultando seu tratamento e impactando negativamente o grau de conformidade da água industrial (Figura 03). A Figura 04 ilustra os valores máximos, mínimos e médios para o parâmetro de cor aparente da água industrial encontrados durante o período de monitoramento. Como demonstrado, os valores máximos de cor aparente são ainda mais elevados durante os períodos chuvosos, alcançando um pico de 115 PCU no mês de abril, quando as chuvas intensas começam na região.

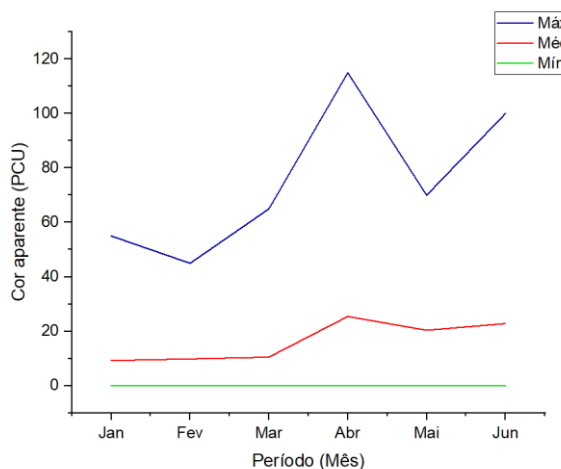
Além disso, é possível observar que os valores médios para o parâmetro de cor nos meses de janeiro a março e os valores mínimos estão dentro do limite estabelecido pela portaria N° 888/2021, que determina que a cor aparente da água industrial deve ser de 15 PCU (BRASIL, 2021).

No entanto, nos meses de abril a junho, os valores médios estão fora desse limite estabelecido pela legislação, evidenciando ainda mais o impacto das chuvas no tratamento da água. Especificamente no mês de abril, a média de cor aparente foi de 25,46 PCU (Figura 4).

O período chuvoso (fator ambiental) não é o único elemento que afeta o tratamento de água e o parâmetro de cor aparente. Existem inúmeros outros fatores relacionados ao ambiente operacional, materiais, mecânicos e outros, que podem desequilibrar as variáveis

do tratamento de água e ter um efeito negativo na qualidade da água tratada, tornando-se imprescindível controlar esses fatores.

Figura 4. Valores máximos, mínimos e médios da cor aparente da água da indústria de laticínios

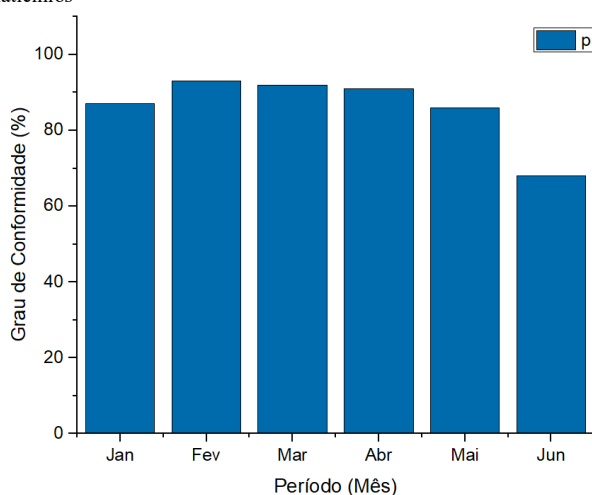


Fonte: Autores (2022)

Além disso, investir em outros recursos como por exemplo o processo de osmose reversa irá aumentar a eficiência da remoção da cor da água, pois esse processo separa cerca de 99% dos sais minerais dissolvidos na água e remove grande parte dos componentes orgânicos presentes, os quais são envolvidos na água devido os fatores ambientais, especialmente os períodos chuvosos (SILVA; SANTOS; DUARTE, 2013).

A Figura 5 ilustra graficamente a porcentagem de conformidade mensal do parâmetro de pH da água industrial. Demonstrando que nos cinco primeiros meses de monitoramento, a conformidade ficou acima de 80%. No entanto, houve uma diminuição dessa porcentagem no mês de junho, atingindo 68% de conformidade.

Figura 5. Grau de conformidade mensal do pH da água da indústria de laticínios



Fonte: Autores (2022)

A variável de pH da água é de extrema importância para garantir a eficiência do seu tratamento, pois indica o nível de alcalinidade, neutralidade ou acidez da água, variando de 0 a 14. O pH da água é influenciado tanto por suas características naturais quanto pela presença de

resíduos, como materiais orgânicos e/ou químicos (CABRAL; XAVIER, 2018; KUMAR, SHARMA, 2021).

No processo de tratamento da água, os produtos químicos utilizados nas etapas de coagulação e floculação requerem faixas específicas de pH para funcionarem adequadamente. O sulfato de alumínio, utilizado na etapa de coagulação, necessita que a água bruta esteja dentro da faixa de pH entre 4 e 10. Já o polímero catiônico, utilizado na etapa de floculação, apresenta melhor desempenho em águas brutas com pH na faixa entre 6 e 9. Portanto, é necessário um controle rigoroso desse parâmetro para garantir a estabilidade do processo de tratamento da água (DND QUÍMICA, 2022; PEREIRA; BELCHOL; SANTOS, 2014).

A etapa de neutralização, realizada com o auxílio do hidróxido de sódio, tem como objetivo equilibrar o pH da água durante o tratamento, para que esteja dentro da faixa ideal exigida pela legislação (AL-OMARI; KHAN; JAAFAR, 2020).

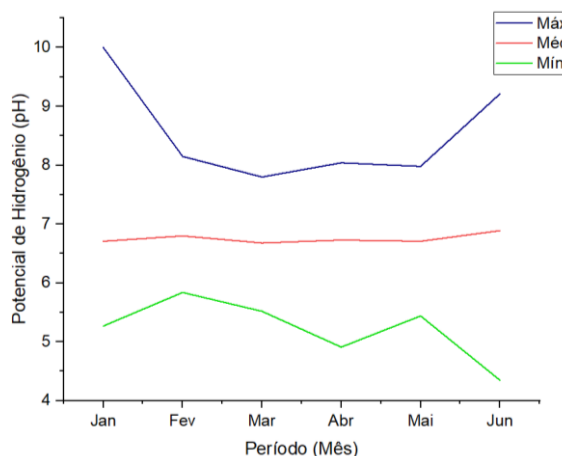
A Figura 5 mostra que durante três meses consecutivos de monitoramento, o pH da água industrial apresentou uma conformidade acima de 90% em relação à legislação vigente. Isso pode indicar uma maior facilidade na manutenção desse padrão no processo de tratamento de água, devido à utilização da etapa de neutralização. Além disso, os dados de conformidade desse parâmetro sugerem que o processo de tratamento da água favoreceu a ação dos produtos químicos utilizados, trabalhando dentro da faixa ideal de pH da água bruta ou utilizando a neutralização com hidróxido de sódio para atingir o pH ideal para a água industrial. Isso resultou nos maiores índices de conformidade entre os parâmetros avaliados. Ressalta-se que apesar dos bons percentuais de conformidade desse parâmetro, não significa que a água esteja completamente dentro dos padrões exigidos pela legislação ou que o processo de tratamento de água esteja 100% eficiente, indica que apesar de todos os fatores externos há um controle adequado desse parâmetro e que o pH da água e/ou a ação dos produtos químicos está ocorrendo corretamente, beneficiando o processo de tratamento da água (PEREIRA; BELCHOL; SANTOS, 2014).

Os meses que apresentaram queda no grau de conformidade do pH da água industrial implicam que o processo de tratamento sofreu alterações das variáveis internas e externas à ETA, uma vez que o processo de tratamento de água requer o equilíbrio entre variáveis químicas, físicas e mecânicas das quais podem afetá-lo negativamente. Sendo assim, o pH age como indicador para facilitar a identificação dos fatores que causam inconformidade no tratamento (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2018).

A Figura 6 apresenta os valores máximos, mínimos e médios de pH da água industrial durante os seis meses de monitoramento. De acordo com a portaria N° 888/2021, a faixa de pH da água industrial está entre 6 e 9. Valores de pH muito baixos tornam a água corrosiva devido à sua acidez, enquanto valores de pH muito altos podem levar à formação de incrustações nas tubulações (BRASIL, 2021a; CABRAL; XAVIER, 2018; KUMAR, SHARMA, 2021). De acordo com a Figura 6 os valores máximos de pH encontrados, apenas os meses de janeiro (pH 10,0) e junho (9,21) estão fora do padrão exigido pela legislação, indicando alcalinidade da água e maior propensão à

formação de incrustações nas tubulações. Quanto aos valores mínimos, todos os meses estão fora do padrão (valores de pH abaixo de 6), indicando acidez da água e maior probabilidade de corrosão das tubulações.

Figura 6. Valores máximos, mínimos e médios do pH da água da indústria de laticínios



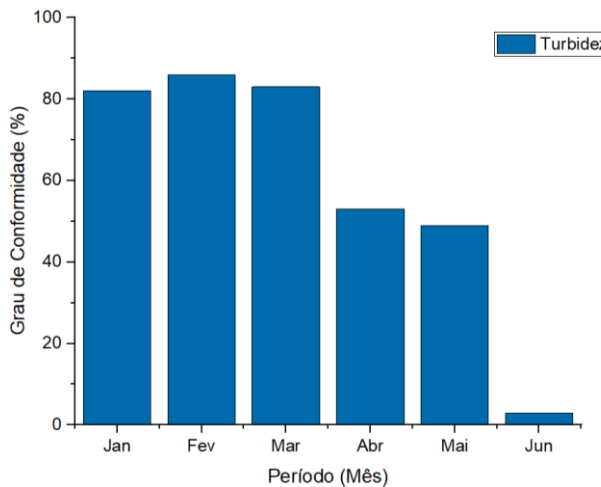
Fonte: Autores (2022)

Os valores médios de pH durante todos os meses de monitoramento estão dentro da faixa determinada para a potabilidade da água industrial.

Isso indica que houve uma maior eficiência na estabilidade desse parâmetro ao longo desse período, o que contribui positivamente para a formação dos flocos nas etapas do tratamento, uma vez que a ação dos químicos é favorecida pela faixa de pH ideal da água e, consequentemente, para a qualidade da água industrial.

No que diz respeito à turbidez da água industrial, assim como o parâmetro de cor aparente, houve uma estabilidade razoável de conformidade nos três primeiros meses de monitoramento, mantendo-se em torno de 80%. No entanto, nos três meses seguintes, houve uma diminuição desse percentual, chegando a valores inferiores a 50%, conforme demonstrado na Figura 7.

Figura 07. Grau de conformidade mensal da turbidez da água da indústria de laticínios



Fonte: Autores (2022)

A turbidez é medida a partir da quantidade de partículas sólidas em suspensão na água, o que a torna um indicador importante da sua qualidade.

Dentre essas partículas pode-se identificar: argila, lodo, substâncias orgânicas e microrganismos, que

dificultam a passagem de luz, resultando em uma aparência turva da água.

Esse aspecto turvo é esteticamente indesejável e representa um potencial perigo, uma vez que dentre essas partículas podem incluir diferentes tipos de microrganismos, dos quais só podem ser identificados a partir de uma análise microbiológica (AL-OMARI; KHAN; JAAFAR, 2020).

Sendo assim, a turbidez da água também é um indicativo de alerta para a presença de microrganismos patogênicos, o que a torna um parâmetro relevante para garantir a potabilidade da água (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2018). Valores elevados de turbidez podem afetar negativamente a aparência, o sabor e o odor da água, além de representar um desafio para o tratamento, uma vez que sofre influência por diversos fatores internos e externos ao processo de tratamento, os quais, se não forem controlados, podem dificultar a sua remoção ou diminuição, sendo necessário maior controle das variáveis do processo de tratamento, dosagem de químicos e tempo de tratamento (AL-OMARI; KHAN; JAAFAR, 2020; RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2018).

A etapa de filtração é a principal responsável pela remoção da turbidez da água, atuando como uma barreira sanitária dentro do processo de tratamento, retendo as partículas suspensas, incluindo grande parte dos microrganismos (CESAN, 2013; AL-OMARI; KHAN; JAAFAR, 2020). Assim como o parâmetro de cor aparente, a turbidez da água também é afetada por períodos intensos de chuvas, que causam lixiviação do solo e arraste de resíduos vegetais para os corpos d'água, resultando em uma água bruta com elevada turbidez e intensa coloração amarelada (KUMAR, SHARMA, 2021).

Os baixos percentuais de conformidade observados na Figura 7 nos meses de abril a junho podem ser reflexo do impacto do período chuvoso na região, enquanto os altos índices de conformidade nos meses de janeiro a março, correspondentes ao período seco, corroboram essa relação (CAVALCANTE; LUCENA; MOURA, 2019).

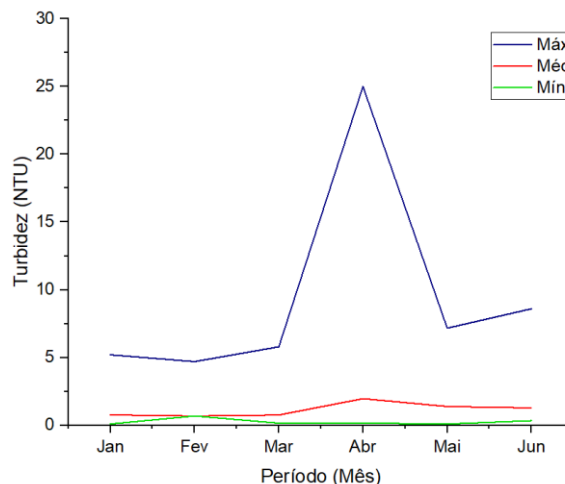
De acordo com Kumar, Sharma (2018), a turbidez da água bruta influencia a turbidez final após o tratamento, tornando mais difícil o processamento da água bruta e exigindo maior estabilidade e controle das etapas do processo de tratamento.

É importante destacar que fatores externos e internos podem impactar o processo de tratamento da água, e ajustes devem ser realizados para garantir a eficiência das etapas e a qualidade da água. Esses ajustes podem incluir a redução da vazão da estação de tratamento, prolongando o tempo de duração das etapas do processo, ou o ajuste das dosagens dos produtos químicos de acordo com a vazão, garantindo a formação adequada de flocos para sua posterior remoção na etapa de filtração.

Conforme a Portaria Nº 888/2021, o valor máximo permitido para turbidez da água de abastecimento industrial é de 1 NTU (BRASIL, 2021). A Figura 8 apresenta graficamente os valores máximos, mínimos e médios encontrados durante o período de monitoramento para o parâmetro de turbidez da água industrial.

Os resultados mostram que os valores mínimos de turbidez em todos os meses e os valores médios nos meses de janeiro a março estão de acordo com os padrões de potabilidade da água estabelecidos pela legislação.

Figura 8. Valores máximos, mínimos e médios de turbidez da água da indústria de laticínios



Fonte: Autores (2022)

No entanto, os valores médios de turbidez nos meses de abril a junho e todos os valores máximos encontrados, especialmente em abril (25 NTU), estão acima dos padrões permitidos (Figura 8). Indicando que o período chuvoso, combinado com outros fatores, como questões químicas, mecânicas ou operacionais, dificultam o tratamento da água bruta, tornando o processo ou algumas de suas etapas menos eficientes e resultando em alta turbidez na água industrial (KUMAR, SHARMA, 2021).

Quando a água apresenta turbidez acima dos limites estabelecidos pela legislação, é importante realizar análises microbiológicas para verificar a presença de microrganismos patogênicos, uma vez que o aspecto turvo da água pode indicar a presença desses organismos. Além disso, é crucial reforçar a atenção e o controle na etapa de desinfecção, uma vez que a adição de cloro serve como uma barreira microbiológica adicional no processo de tratamento da água (CESAN, 2013; AL-OMARI; KHAN; JAAFAR, 2020).

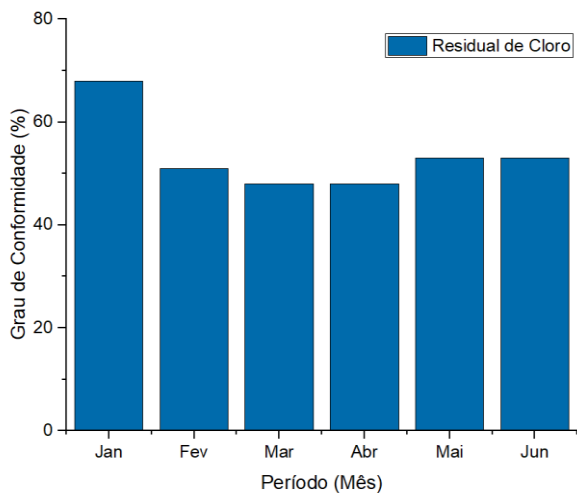
O parâmetro de residual de cloro livre na água apresentou variação entre os meses de monitoramento, resultando em um grau de conformidade máximo de 68% no mês de janeiro e mínimo de 48% nos meses de março e abril, conforme ilustrado na Figura 09, que mostra os percentuais de conformidade do parâmetro de residual de cloro na água industrial.

O residual de cloro livre na água industrial é um indicador da eficiência da etapa de desinfecção, garantindo a ausência de microrganismos que possam afetar negativamente o processo industrial.

Esse parâmetro é fundamental para determinar a potabilidade da água, indicando o grau de desinfecção alcançado (KUMAR, SHARMA, 2021; SILVA et al., 2021; SIMENSATO; BUENO, 2019).

Durante a etapa de desinfecção do processo de tratamento da água, o cloro ativo passa por reações químicas de hidrólise, liberando compostos como ácido hipocloroso e íon hipoclorito, responsáveis pela oxidação da matéria orgânica indesejada e desinfecção da água.

Figura 9. Grau de conformidade mensal do residual de cloro da água da indústria de laticínios



Fonte: Autores (2022)

Esses componentes são voláteis e podem ser perdidos ao longo do processo ou nas tubulações que conduzem a água até os pontos de distribuição (SILVA et al., 2021; RODRIGUES; SCALIZE, 2016).

Existem diversos fatores que podem afetar o teor residual de cloro livre na água após a etapa de desinfecção. Entre eles, destacam-se problemas mecânicos e hidráulicos, velocidade e tempo de escoamento, duração da água nas tubulações, presença de componentes inorgânicos, minerais ou biofilme na água ou nas tubulações. Além disso, fatores operacionais, como a dosagem do cloro ativo na água, também podem influenciar a eficiência dessa etapa (SILVA et al., 2021).

A variação no grau de conformidade do residual de cloro na água industrial, conforme demonstrado na Figura 09, pode indicar dificuldades em equilibrar a dosagem de cloro durante a etapa de desinfecção do processo de tratamento, devido à mistura da água tratada proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) com a água tratada pela COMPESA.

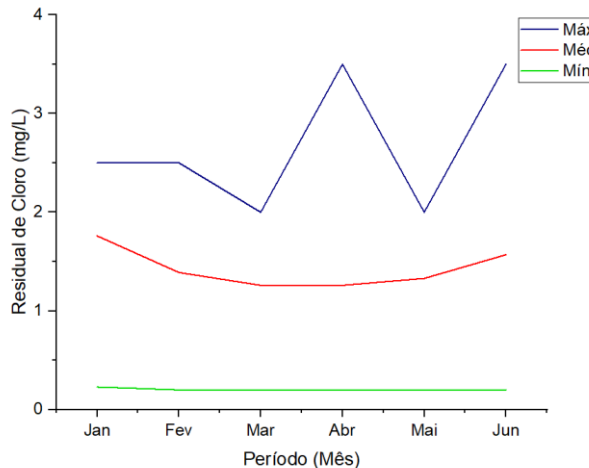
A água da COMPESA já chega à indústria clorada e, após a mistura com a água tratada da ETA, é realizada a dosagem de cloro para atingir os requisitos estabelecidos pela legislação de potabilidade da água.

Portanto, é necessário que o operador tenha uma atenção especial nessa etapa, ajustando a dosagem de cloro ativo na ETA com base no residual de cloro presente na mistura das águas tratadas da ETA e da COMPESA, a fim de garantir a eficiência do agente químico e da desinfecção.

Além disso, é importante manter o teor ideal de cloro livre na água industrial até o último ponto de distribuição, o que pode exigir uma dosagem maior de cloro ativo durante a etapa de desinfecção para compensar possíveis perdas ao longo das tubulações (COSTA, 2020; KUMAR, SHARMA, 2021).

A Figura 10 ilustra os valores máximos, mínimos e médios do residual de cloro na água industrial durante o período de monitoramento.

Figura 10. Valores máximos, mínimos e médios do residual cloro da água da indústria de laticínios.



Fonte: Autores (2022)

Apesar da variação no grau de conformidade desse parâmetro ao longo dos meses de monitoramento e dos diversos fatores que afetam sua estabilidade, os valores mínimos e médios do residual de cloro livre estão dentro da faixa exigida pela Portaria N° 888/2021, que estabelece os padrões de potabilidade da água e determina que o residual de cloro livre na água de abastecimento industrial deve estar entre 0,2 a 2 mg/L, assegurando a segurança da água industrial para uso (BRASIL, 2021).

Os valores máximos do residual de cloro livre na água industrial, de acordo com a Figura 10, estão acima da faixa permitida, com exceção dos meses de março e maio, atingindo um pico de 3,5 mg/L em abril e junho. Esse excesso de cloro pode resultar em consequências indesejadas e, a longo prazo, causar prejuízos financeiros para a indústria.

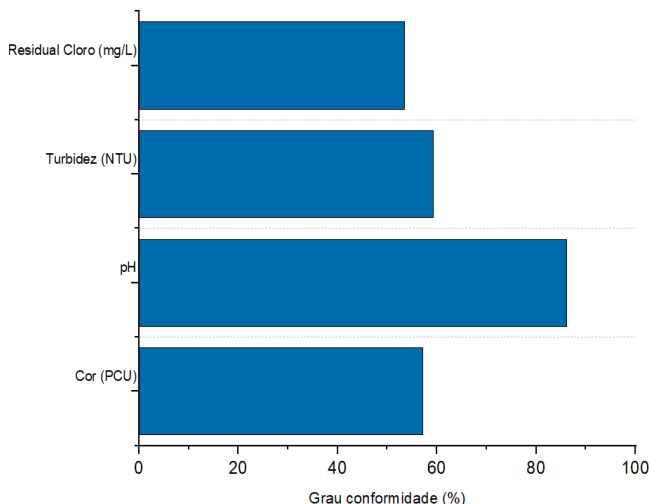
O excesso de cloro livre na água pode afetar o sabor, odor, cor e turbidez, gerando substâncias prejudiciais à saúde, alergênicas e potencialmente cancerígenas, como as cloraminas e os trihalometanos. Além disso, pode aumentar a corrosão das tubulações galvanizadas, resultando em maiores gastos com manutenção, equipamentos e tubulações (COSTA, 2020).

Portanto, conforme mencionado por Costa (2020), o residual de cloro livre serve como parâmetro de controle ao longo da rede de distribuição, sendo crucial manter esse parâmetro dentro da faixa ideal para garantir a ação desinfetante, a potabilidade da água industrial e a eficiência do processo de tratamento, evitando possíveis efeitos negativos para a indústria.

A Figura 11 demonstra graficamente o grau de conformidade geral dos parâmetros de cor aparente, turbidez e residual de cloro da água industrial que foram avaliados em relação à legislação vigente para potabilidade da água durante o período de monitoramento. De acordo com a Figura 11, todos os parâmetros físico-químicos avaliados apresentaram uma conformidade geral superior a 50%.

Os resultados mostram que os parâmetros de cor aparente e turbidez apresentaram um percentual de conformidade inferior a 60% (Figura 11).

Figura 11. Grau de conformidade geral dos parâmetros físico-químicos da água da indústria de laticínios



Fonte: Autores (2022)

Essa baixa conformidade pode ser atribuída à ação de fatores ambientais, como períodos chuvosos intensos, e a falhas nas etapas do tratamento da água, incluindo fatores mecânicos de processo. Além disso, fatores operacionais também afetaram negativamente esses parâmetros, exigindo um controle mais rigoroso e ação por parte dos operadores em casos de inconformidade.

Por outro lado, o parâmetro de pH apresentou o maior grau de conformidade, com mais de 85% de conformidade (Figura 11). Isso indica uma maior estabilidade e controle desse indicador por parte dos operadores durante o processo de tratamento da água, apesar dos fatores operacionais e químicos de processo que podem afetar sua estabilidade.

No entanto, o parâmetro de residual de cloro livre apresentou o menor grau de conformidade em relação aos outros parâmetros, com menos de 55% de conformidade (Figura 11). Isso é evidenciado pelas variações mensais desse parâmetro, que sofreu efeitos negativos devido a fatores operacionais e hidráulicos/mecânicos do processo, levando a níveis inadequados de cloro ativo na água industrial e saindo da faixa ideal estabelecida para esse parâmetro.

Esses resultados indicam a necessidade de uma atenção especial para a correção dos valores de cor aparente, turbidez e residual de cloro livre na água industrial, a fim de garantir a conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação e assegurar a qualidade da água utilizada no processo industrial.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, todos os parâmetros avaliados na água industrial durante o período de monitoramento excederam os valores máximos estabelecidos pela legislação. Além disso, os valores médios de cor aparente e turbidez também estão acima do padrão exigido.

Tabela 2. Valores máximos, mínimos e médios para os parâmetros físico-químicos da água industrial.

	Cor aparente (PCU)	Potencial de Hidrogênio (pH)	Turbidez (NTU)	Residual de cloro (mg/L)
Valor máximo	115	10,00	25,00	3,50
Valor Mínimo	0	4,35	0,10	0,20
Valor Médio	16,38	6,75	1,15	1,43

Fonte: Autores (2022)

O valor mínimo de pH encontra-se abaixo do limite estabelecido pela Portaria Nº 888/2021 para a potabilidade da água, enquanto os valores mínimos dos demais parâmetros e os valores médios do residual de cloro e pH estão em conformidade com o referido padrão (Tabela 2).

Os dados apresentados na Tabela 2 reforçam a influência significativa de diversos fatores internos e externos sobre o processo de tratamento da água e sua qualidade final. Torna-se necessário identificar e abordar esses fatores, utilizando os parâmetros físico-químicos como indicadores para monitorar a eficiência do processo e a potabilidade da água.

É fundamental ressaltar que a conformidade desses parâmetros tem um impacto direto na qualidade da água industrial, na segurança dos colaboradores e consumidores, na redução de problemas de manutenção e perdas de equipamentos e tubulações, bem como na minimização do risco de contaminação direta ou indireta dos alimentos (BAVARESCO, 2018; RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2018).

Para realizar uma análise detalhada dos problemas e fornecer sugestões de melhorias, foram aplicadas as ferramentas de Controle Estatístico de Processo (CEP), como o diagrama de Ishikawa e o diagrama de Pareto. Essas ferramentas foram baseadas no diagnóstico gerado pelo monitoramento dos parâmetros físico-químicos avaliados neste estudo, na análise do processo de tratamento e no acompanhamento *in loco* da ETA.

O diagrama de Ishikawa, apresentado na Figura 12, foi desenvolvido para identificar os fatores internos e externos que impactam o processo de tratamento de água e causam inconformidades nos parâmetros físico-químicos.

Figura 12. Diagrama de Ishikawa da ETA



Fonte: Autores (2022)

Esses fatores foram classificados em seis categorias: mão de obra, material, meio ambiente, máquina, método e medição. Essa classificação facilita a identificação dos problemas e direciona o foco na resolução, permitindo uma clara compreensão das causas envolvidas.

Os problemas identificados relacionados à mão de obra estão principalmente relacionados a fatores operacionais, como erros operacionais, falta de monitoramento dos operadores e divisão inadequada de responsabilidades entre os setores.

Esses problemas dificultam o tratamento da água e impedem que os operadores dediquem a devida atenção à

ETA. A mão de obra desempenha um papel crucial no monitoramento constante, no preparo e abastecimento dos produtos químicos, no controle dos parâmetros físico-químicos da água, na execução efetiva das etapas do processo de tratamento e na manutenção da infraestrutura da ETA.

No tópico relacionado aos materiais, foram identificados problemas relacionados aos produtos químicos utilizados no tratamento da água, como a presença de sulfato de alumínio em pó aglomerado, dificultando a sua diluição adequada, diluição incompleta do polímero e falta de produtos químicos durante o processo de tratamento. A falta de monitoramento por parte dos operadores, mencionada anteriormente, também contribui para a ocorrência desses problemas. É evidente que esses fatores estão interconectados e frequentemente resultam em outros problemas, afetando de forma significativa os parâmetros da água industrial.

No que se refere ao meio ambiente, as chuvas intensas, o nível elevado de água e a lixiviação do solo na barragem são causas identificadas. Esses fatores afetam principalmente os parâmetros de cor aparente e turbidez da água, uma vez que a água bruta proveniente da barragem chega à ETA com alta carga de matéria orgânica e coloração amarelada/marrom, indicando a presença de material barroso, como argila, oriundo da lixiviação do solo causada pelas chuvas intensas. Além disso, outras partículas presentes na água podem afetar esses parâmetros. É importante ressaltar que o fator ambiental afeta o tratamento da água, mas está além do alcance direto de intervenções para resolução. Nesse sentido, é necessário adaptar o processo de tratamento, ajustando as dosagens dos produtos químicos e a vazão de entrada da água bruta durante períodos de chuvas intensas, a fim de reduzir a quantidade de partículas presentes na água, que serão retidas nas etapas do tratamento.

Os fatores classificados na categoria "máquina", conforme apresentados na Figura 12, estão relacionados a problemas mecânicos, hidráulicos, estruturais ou de equipamentos, como tubulações sujas, entupidas ou danificadas, bombas inoperantes, equipamentos de análise descalibrados e alta vazão na ETA. Vale ressaltar que a vazão na ETA se enquadra nessa classificação devido à variação do tempo de ação das etapas do tratamento. Dependendo da vazão e da quantidade de partículas suspensas na água bruta, o floccodécantador utilizado no processo pode não conseguir realizar todas as etapas efetivamente, resultando em sobrecarga nos filtros e inconformidades nos parâmetros físico-químicos (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2018).

No tópico de método, foram identificadas as seguintes causas: falta de agitação, dosagem incorreta e preparo inadequado dos produtos químicos, falta de drenagem do floccodécantador para remoção dos flocos decantados durante o processo de tratamento e falta de limpeza dos filtros para remoção das partículas retidas. Esses últimos fatores evitam a sobrecarga das etapas de decantação e filtração, respectivamente, assegurando que a água tratada não seja afetada (Figura 12).

Os produtos químicos utilizados no processo de tratamento de água desempenham um papel fundamental nas etapas de coagulação, floculação, neutralização e desinfecção. Portanto, é essencial manter um controle

adequado das dosagens e garantir o preparo correto dos produtos químicos, a fim de evitar efeitos negativos no processo de tratamento. Assim, dentro da categoria de método, podem-se observar causas relacionadas a fatores químicos e de processo, que também são influenciados por fatores operacionais mencionados na categoria de mão de obra.

O tópico de medição, listado na Figura 12, também é influenciado pelos fatores operacionais, demonstrando a falta de monitoramento por parte dos operadores em relação ao controle das dosagens dos produtos químicos utilizados no processo de tratamento e à realização das análises físico-químicas da água.

Essas causas afetam o tratamento da água, resultando em lacunas no acompanhamento da água industrial, na manutenção dos equipamentos e no aspecto financeiro da indústria. Quando os produtos químicos são dosados em quantidade insuficiente, as etapas do tratamento não são efetivas. Por outro lado, dosagens excessivas podem levar à incrustação e corrosão das tubulações, além de causar inconformidades em outros parâmetros de potabilidade da água (CABRAL; XAVIER, 2018; COSTA, 2020).

É evidente que existe uma correlação entre as causas, onde a classe de mão de obra com seus fatores operacionais influencia diretamente os demais problemas, aumentando o efeito negativo no processo de tratamento da água e na inconformidade dos parâmetros físico-químicos, reduzindo a eficiência da ETA.

Portanto, para evitar a acumulação de causas e seus efeitos negativos, é necessário buscar soluções para esses fatores, visando eliminar ou reduzir seu impacto na ETA. A premissa da correlação entre esses fatores pode servir como direcionamento inicial para a resolução dos problemas.

As 20 causas descritas no diagrama de Ishikawa (Figura 12) foram listadas e avaliadas durante um período de 181 dias (janeiro a junho) de monitoramento da ETA. Foi quantificada a frequência de ocorrência desses fatores quando houve inconformidades no processo de tratamento de água e/ou nos parâmetros físico-químicos da água industrial.

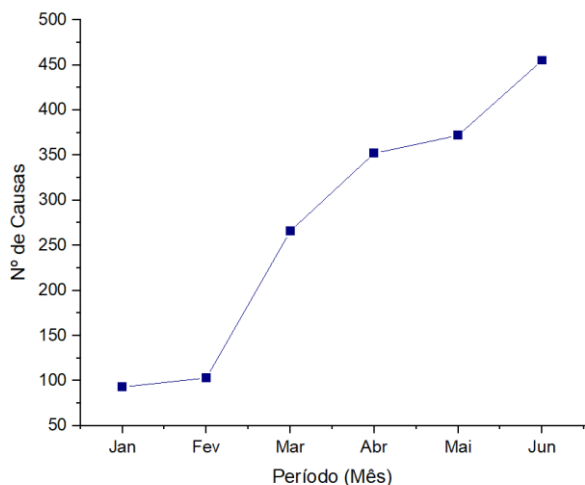
Além disso, para a construção do diagrama de Pareto, foram calculadas as porcentagens individuais e acumuladas.

As porcentagens individuais e acumuladas foram arredondadas, e as causas que apresentaram uma porcentagem individual igual ou inferior a 2% foram unificadas para facilitar a montagem e visualização do diagrama.

Durante o monitoramento diário da ETA, foi observado que várias causas apresentavam efeitos simultâneos, demonstrando uma correlação entre elas. A frequência mensal de ocorrências dessas causas ao longo do período de monitoramento é representada graficamente na Figura 13. Durante todo o período, o número total de ocorrências de todas as causas foi de 1.641.

O mês de janeiro registrou o menor número de ocorrências, com um total de 93, enquanto o mês de junho teve a maior frequência de ocorrências, com um total de 455.

Figura 13. Frequência mensal de ocorrência das causas durante o período de monitoramento

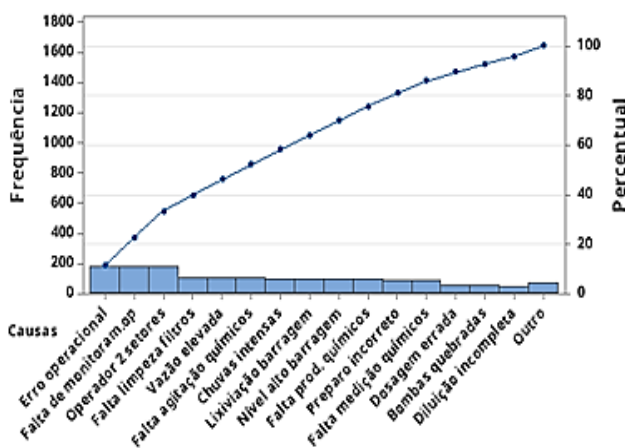


Fonte: Autores (2022)

Isso indica que o mês de junho teve um impacto mais significativo nos índices de conformidade, conforme discutido na avaliação geral da ETA. A frequência das ocorrências reforça o impacto negativo que essas causas têm no processo de tratamento e nos parâmetros físico-químicos da água industrial.

Com base nessas informações, foi elaborado o diagrama de Pareto da ETA, apresentado na Figura 14. Essa ferramenta permite a classificação das causas em ordem de importância e a visualização da porcentagem acumulada dessas causas que contribuem para as inconformidades. Isso facilita a identificação de uma sequência de resolução para implementar melhorias no processo e obter resultados mais rápidos (SANTOS et al., 2020).

Figura 14. Diagrama de Pareto da ETA



Fonte: Autores (2022)

De acordo com o diagrama de Pareto (Figura 14), se as seis primeiras causas relacionadas aos erros operacionais, de limpeza dos filtros, ajuste da vazão ideal da ETA e agitação dos produtos químicos forem resolvidas, é possível obter uma redução de aproximadamente 52% no impacto negativo na ETA, uma vez que essas causas estão relacionadas a classificação de mão de obra, a principal fonte dos fatores que afetam o processo de tratamento.

Quanto aos fatores ambientais é possível mitigar seu impacto por meio da captação adequada da ETA ou do processo de tratamento de água. Devido à correlação entre as causas, ao resolver principalmente as causas relacionadas à mão de obra, é esperada uma redução no impacto dos outros fatores, o que aumentará a eficiência da ETA. Portanto, o diagrama de Pareto demonstra de forma clara e objetiva a ordem ideal de resolução desses problemas (Figura 14).

Conclusão

A qualidade da água bruta e o processo de tratamento industrial são influenciados por vários fatores. O monitoramento constante é crucial para atender os padrões de conformidade e garantir a segurança dos alimentos.

Durante o monitoramento, observou-se que o pH apresentou alta conformidade, enquanto o residual de cloro teve o menor percentual, especialmente nos meses de chuva.

A eficiência da ETA foi calculada em 64,04%, sinalizando a necessidade de implementar melhorias como calibração e manutenção dos equipamentos, reparos nas bombas e nas tubulações e treinamento aos colaboradores.

O uso das ferramentas CEP revelou causas principais associadas à mão de obra que, ao serem resolvidas, podem melhorar a eficiência em cerca de 52%.

Portanto, para garantir a estabilidade do tratamento e dos parâmetros físico-químicos da água industrial, a ETA requer ajustes estratégicos e ações corretivas, seguindo a ordem de resolução do diagrama de Pareto.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE) e à indústria de laticínios pela parceria e pelo suporte fornecido durante a realização desta pesquisa.

Referências

AL-OMARI, M.; KHAN, M. R. T.; JAAFAR, O. H. Monitoring and control of water treatment plants: A review *Journal of Water Process Engineering*, v. 35, 2020 DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101178

BRASIL. **Portaria Nº 888, de 4 de maio de 2021**. Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Edição: 85, Seção: 1, Página: 127, 2021.

CABRAL, L. L. M.; XAVIER, E. G. Qualidade das águas do córrego Calção de Couro. *Ipê Agronomic Journal*, v. 2, n. 1, p. 38-52, 2018.

CAVALCANTE, G. P.; LUCENA, D. B.; MOURA, M. O. As chuvas na região agreste do nordeste brasileiro: variabilidade interanual. *Revista Equador (UFPI)*, v. 8, n. 2, p. 290-308, 2019.

CESAN. **Companhia Espírito-Santense de Saneamento**. Tratamento da água. 2013. Disponível em: www.cesan.com.br. Acesso em: 28 mar. 2022.

COSTA, F. A. S. **Por que as oscilações de cloro residual livre nos sistemas de água são um problema?** 2020. Disponível em: www.microambiental.com.br. Acesso em: 10 set. 2022.

DND QUÍMICA. Ficha técnica sulfato de alumínio. 2022. Disponível em: dndquimica.com.br. Acesso em: 10 set. 2022.

USOH, A., AL-OQLA, F. M., AB RAHMAN, M. N., SAHARUDIN, M. S. Application of the Seven Basic Quality Tools in Manufacturing Industry: A Systematic Review. **International Journal of Engineering Research and Applications**. 2021. v. 11 n. 2 p. 15-24 ISSN: 2248-9622 DOI: 10.9790/9622-1102021524

KUMAR, A., SHARMA, S. K. Monitoring and evaluation of raw water quality and its impact on treated water quality: A review. **Journal of Water Process Engineering**, 43, 102342. 2021. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102342.

MONTGOMERY, D. C. Introduction to Statistical Quality Control. John Wiley & Sons. 2021.

OAKLAND, J. S. Total Quality Management and Operational Excellence: Text with Cases. Routledge. 2019.

PEREIRA, V. F.; BELCHOL, F.; SANTOS, W. C. **Ficha técnica polímero catiônico**. 2014. Disponível em: www.hquimica.com.br. Acesso em: 10 set. 2022.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. 13ª Ed. São Paulo: Blucher, 2018.

SANTOS, A. P.; POZZETTI, J. V. T.; MORAES, P. A. V.; AVELINO, C. H. Utilização da ferramenta Diagrama de Pareto para auxiliar na identificação dos principais problemas nas empresas. **Revista UNISALESIANO**, v. 1, n.1, p. 1-12, 2020.

SILVA, D. A. C.; SANTOS, É. B.; DUARTE, J. A. Utilização de osmose reversa para tratamento de águas. **Revista Eletrônica e-Fatec - Faculdade de Tecnologia de Garça**, v. 3, n. 1, p. 1-10, 2013.

SILVA, M. A. C.; PEREIRA, G. C.; MARQUES, M. J.; BARRETO, P. L. M.; FERREIRA, A. C. Decay of Free Residual Chlorine in Water Distribution System Reservoirs and Potential Influence of Physicochemical Parameters: A Case Study" **Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua**, v. 70 n. 3 p. 227-240 ISSN: 1606-9935. 2021DOI: 10.2166/aqua.2021.176

SIMENSATO, L. A.; BUENO, S. M. Importância da qualidade da água na indústria de alimentos. **Revista Científica**, v. 1, n. 1, p. 1-9, 2019.

SOARES, G. B. Utilização de controle estatístico do processo para a análise de qualidade da água em um município adjacente ao Parque Nacional do Iguaçu. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 8, n. 18, p. 1-23, 2017.