



ICARO DA SILVA DE BORTOLI

ENZO FURIERI DEL PUPPO

CAROLINA SIMÕES GAMA

**ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE FALHA SOBRE A QUEDA DE NÍVEL DO
RESERVATÓRIO DE ÁGUA DE UMA PLANTA INDUSTRIAL DE CELULOSE E
PAPEL**

ARACRUZ ES
2024

ICARO DA SILVA DE BORTOLI

ENZO FURIERI DEL PUPPO

CAROLINA SIMÕES GAMA

**ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE FALHA SOBRE A QUEDA DE NÍVEL DO
RESERVATÓRIO DE ÁGUA DE UMA PLANTA INDUSTRIAL DE CELULOSE E
PAPEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Faculdade de Engenharia das Faculdades Integradas
de Aracruz como requisito parcial para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. M Sc. Cristiano Pessotti Del Carro

ARACRUZ ES
2024

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de tratamento e distribuição de água na planta industrial.	19
Figura 2 - Timeline da ocorrência.....	20
Figura 3 - FTA árvore de falhas.....	23
Figura 4 - Diagrama de causa x efeito.	25
Figura 5 - Causa 1.....	30
Figura 6 – Causa 2.....	31
Figura 7 - Causa 3.....	33
Figura 8 - Causa 4.....	34
Figura 9 - Causa 5.....	35
Figura 10 - Causa 6.....	36
Figura 11 - Causa 7.....	37
Figura 12 - Causa 8.....	38
Figura 13 - Causa 9.....	39
Figura 14 - Causa 10.....	41
Figura 15 - Causa 11.....	42
Figura 16 - Tela de Gerenciamento atualizada	44
Figura 17 - Monitoramento da Qualidade da Água Bruta (WFR).....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Plano de Ação	28
Tabela 2 - Gestão do Consumo de Água	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	8
2.1. Objetivos Específicos.....	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1. Gestão Hídrica	9
3.2. Introdução ao Sistema Toyota e Metodologia Lean	10
3.3. Diagrama de Ishikawa.....	12
3.4. Análise da Árvore de Falhas - FTA	13
3.5. Plano de Ação - FCA	14
3.6. 5 Por Quês.....	14
4. METODOLOGIA.....	15
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
5.1. Contexto da Ocorrência	17
5.2. Timeline das Ocorrências	20
5.3. Construção do Pensamento Crítico para Resolução do Problema	22
6. CONCLUSÃO.....	47
7. REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

A gestão eficaz dos recursos hídricos é um dos pilares centrais da operação em plantas industriais, particularmente em indústrias de celulose e papel, onde a água desempenha um papel crucial em diversas fases do processo produtivo. Desde a preparação da polpa até o tratamento de efluentes, a água é amplamente utilizada em grandes volumes e com níveis de pureza específicos. Qualquer queda repentina no nível de um reservatório de água tratada pode ser sintomática de falhas estruturais, operacionais ou de gestão, devendo ser prontamente investigada e solucionada (CASTRO et al., 2018). Esse cenário é agravado pelo aumento do consumo de água e pelas mudanças nas condições da água captada, que não apenas ameaçam a continuidade da produção, como também elevam os custos operacionais e ampliam o impacto ambiental devido ao uso intensivo de recursos hídricos.

Nas indústrias de celulose e papel, estima-se que são necessários entre 10 a 50 metros cúbicos de água para produzir uma tonelada de papel, dependendo do tipo de papel e do processo adotado (DIAS et al., 2017). Qualquer interrupção no fornecimento contínuo de água tratada, seja por falha mecânica, estrutural ou operacional, pode resultar em prejuízos significativos, desde a redução da eficiência produtiva até a interrupção total das operações. Além disso, essas falhas podem gerar problemas ambientais severos, como o descarte inadequado de efluentes não tratados, comprometendo ecossistemas locais e gerando passivos ambientais (SOUZA; LIMA, 2020).

As deficiências na gestão de consumo e nos passivos de manutenção das Estações de Tratamento de Água (ETAs) evidenciam oportunidades de melhoria que, se abordadas estrategicamente, podem otimizar o uso da água, reduzir desperdícios e aumentar a eficiência dos processos. Segundo Santos (2016), falhas nos reservatórios de água tratada são recorrentes em plantas industriais devido à falta de inspeções adequadas e políticas de manutenção preditiva, especialmente em ambientes operacionais agressivos como as indústrias de celulose e papel.

Além das causas estruturais, como desgaste natural dos materiais, corrosão ou vazamentos, é preciso considerar os impactos das condições operacionais. O uso

intensivo de água e a variabilidade na sua qualidade podem pressionar sistemas de bombeamento e controle. Falhas nesses sistemas resultam em quedas abruptas nos níveis de água armazenada, comprometendo a produção. Ferreira e Almeida (2021) destacam que sistemas de automação e monitoramento, como sensores de nível, são fundamentais para a detecção precoce de anomalias e a adoção de ações corretivas rápidas.

Neste contexto, adotar uma abordagem analítica com metodologia Lean possibilita uma visão estruturada das causas raízes dos problemas, facilitando a identificação de ações mitigadoras que visam a recuperação da estabilidade nos níveis de água tratada nos reservatórios. Dessa forma, o estudo não apenas responde a uma necessidade operacional urgente, mas também promove práticas sustentáveis, alinhando-se aos objetivos de conservação de recursos hídricos e à responsabilidade ambiental da organização.

Outro aspecto importante é a conformidade com normas técnicas, como a ABNT NBR 12217 (2017), que estabelece diretrizes para o projeto, dimensionamento e manutenção dos sistemas de abastecimento de água. O descumprimento dessas normas pode ocasionar vazamentos, rupturas e outros problemas operacionais graves. Além disso, fatores externos, como eventos climáticos extremos (secas prolongadas ou chuvas intensas), podem afetar diretamente os níveis de água em reservatórios industriais (MACHADO et al., 2022), tornando ainda mais necessária a incorporação de estratégias de resiliência no planejamento do abastecimento.

Portanto, a análise de falhas em sistemas de reservatórios de água tratada em plantas de celulose e papel não é apenas uma questão técnica, mas também estratégica, ambiental e econômica. Identificar a causa raiz das falhas e implementar soluções efetivas é fundamental para garantir a continuidade das operações e reduzir riscos de interrupções. Além disso, o estudo busca contribuir com uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos, consolidando a competitividade da planta e o compromisso com a responsabilidade ambiental (MENDES et al., 2019).

2. OBJETIVOS

O trabalho visa investigar a causa da queda nos níveis dos reservatórios de Água Fresca de Processo (WFC), essencial para a operação da fábrica, abordando o aumento do consumo e as mudanças nas características da água captada. Aplicando metodologias Lean, busca-se identificar causas raízes e propor ações mitigadoras que estabilizem os níveis dos reservatórios, otimizem a gestão hídrica e assegurem a sustentabilidade dos processos industriais.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar e mapear os principais fatores estruturais, operacionais e ambientais que contribuem para a queda abrupta no nível dos reservatórios de água tratada na planta industrial.
- Analisar os registros históricos de operação e manutenção dos sistemas de abastecimento e tratamento de água, buscando correlacionar as ocorrências de falhas com variáveis operacionais e ambientais.
- Avaliar a eficiência dos sistemas de monitoramento e controle existentes, como sensores de nível e dispositivos de automação, identificando possíveis limitações e oportunidades de melhoria.
- Aplicar ferramentas de análise de causa raiz, como o Diagrama de Ishikawa, Análise da Árvore de Falha, Plano de Ação e o 5 Porquês, para determinar os fatores críticos responsáveis pelas falhas no abastecimento.
- Propor soluções técnicas e estratégicas baseadas em metodologias de manutenção preditiva e Lean, visando a estabilidade no fornecimento de água tratada.
- Desenvolver um plano de ação para mitigação e prevenção das quedas abruptas no nível dos reservatórios, com recomendações práticas para implementação e monitoramento contínuo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. GESTÃO HÍDRICA

A gestão de consumo e tratamento de água, além de atender às necessidades de produção e sustentabilidade de uma empresa, também agrega valor, pois a disponibilidade de água de qualidade é essencial para operações mais eficientes. Nesse contexto, gerenciar o consumo de água de com menos desperdícios, é fundamental para uma cadeia de produção cada vez mais sustentável (CARSON, 1962; DOCKHORN, 2019; XENOS, 2014).

A preocupação com a sustentabilidade e a otimização do consumo de água em operações industriais tem raízes históricas que remontam ao início da Revolução Industrial, no século XVIII. Com o aumento da produção industrial, a demanda por recursos naturais, incluindo a água, cresceu exponencialmente. No entanto, foi apenas no século XX que a conscientização sobre a necessidade de práticas mais sustentáveis começou a ganhar força, impulsionada por movimentos ambientais e pela crescente escassez de recursos hídricos em várias regiões do mundo (CARSON, 1962).

Os problemas relacionados à gestão hídrica são inúmeros e abrangem todos os setores industriais, incluindo o setor de papel e celulose. Diante disso, torna-se importante a aplicação de técnicas Lean buscando sempre a melhor eficiência nos quesitos disponibilidade, desempenho e qualidade dos recursos hídricos (LIKER, 2004).

A incessante busca pela melhoria dos métodos e técnicas na gestão hídrica e a utilização e exigência de máxima eficiência dos recursos são cruciais para um bom desempenho de produção (BEZERRA, 2019). A degradação e o desperdício natural ocorrem nos processos industriais, sendo manifestados negativamente de diversas maneiras, como perda de eficiência, paradas de produção, perda de qualidade nos produtos e impactos ambientais. A simples necessidade de manter os processos nas condições originais de projeto não reduz a reincidência de falhas, pois não irá contribuir no avanço de produção (XENOS, 2014).

Os principais métodos de gestão hídrica são definidos pela NBR 5462 (1994) como a gestão corretiva, preditiva e preventiva. Um novo modelo de gestão denominado de Gestão 4.0 agrega conceitos mais modernos utilizando tecnologias de controle e automação aplicados nos processos industriais (DOCKHORN, 2019).

A correta aplicação desses métodos de gestão leva ao aprimoramento da produção com menor custo. O método mais adequado para o processo depende de como ocorreu a falha, o tipo e o grau de consequência para o processo, sempre levando em consideração o custo da prevenção. Existem situações, como no caso de falhas ocorridas devido a condições climáticas, que se tornam em uma falha de caráter não previsível (XENOS, 2014).

De acordo com Kardec e Nascif (2013), a gestão preventiva é definida como uma “ação de manutenção planejada e programada para evitar falhas ou baixo rendimento do processo”, sendo efetuada antes da ocorrência de qualquer falha. Lucatelli (2002) destaca que este tipo de gestão é essencial para indústrias que buscam um planejamento de gestão bem estruturado e eficiente.

Para Moro e Auras (2007), a gestão preventiva pode ser dividida em dois modos, sendo sistemática ou condicional. A sistemática envolve a realização de manutenções periódicas e programadas, independentemente do estado atual dos processos. Já o modo condicional são manutenções realizadas com base em monitoramentos e diagnósticos que indicam a necessidade de intervenção antes que ocorra uma falha ou pane do sistema.

De acordo com Ohno (1988), a gestão deve estar sempre à procura de melhorias constantes, com o intuito de aproveitamento máximo dos recursos. E ainda, que os operadores dos processos devem ser treinados para manterem a eficiência no uso da água nas indústrias.

3.2. INTRODUÇÃO AO SISTEMA TOYOTA E METODOLOGIA LEAN

O Sistema Toyota de Produção (STP) é um modelo de gestão que revolucionou a indústria automobilística e se tornou um padrão global para a eficiência operacional.

Desenvolvido pela Toyota nas décadas de 1940 e 1950, o STP é fundamentado na filosofia de eliminação de desperdícios e na maximização do valor para o cliente. Essa abordagem não apenas transformou a produção da Toyota, mas também influenciou diversas indústrias ao redor do mundo, estabelecendo as bases para a metodologia Lean (WOMACK e JONES, 2003).

Hoje muitas empresas utilizam das ferramentas Lean em suas operações, que começou a ser conhecida no final do século XX, com a popularização do Sistema Toyota de Produção (STP), que visava a eliminação de desperdícios e a maximização do valor agregado ao cliente. Ao longo das últimas décadas, a filosofia Lean foi se consolidando devido à necessidade de processos mais eficientes e sustentáveis, sendo desenvolvidas técnicas de organização, planejamento, gerenciamento e controle nas empresas (WOMACK e JONES, 2003).

A metodologia Lean, que se originou do Sistema Toyota de Produção, busca otimizar processos, reduzir custos e aumentar a eficiência. Um dos princípios centrais do Lean é a identificação e eliminação de atividades que não agregam valor, conhecidas como desperdícios. Ferramentas como just-in-time e kaizen são fundamentais nesse contexto. O just-in-time permite que a produção ocorra de acordo com a demanda, minimizando estoques e reduzindo custos. O kaizen, por sua vez, promove uma cultura de melhoria contínua, incentivando todos os colaboradores a contribuírem para a eficiência dos processos (WOMACK; JONES, 2003).

Outro conceito também importante, advém da integração do Lean e do Six Sigma, que resulta no conceito de Lean Six Sigma, que combina a eliminação de desperdícios do Lean com a análise estatística do Six Sigma. Essa sinergia proporciona uma estrutura robusta para a melhoria contínua, permitindo que as organizações não apenas aumentem a eficiência, mas também melhorem a qualidade de seus produtos e serviços. O Lean Six Sigma é aplicável em diversas indústrias, desde a manufatura até serviços e saúde, promovendo uma gestão mais eficiente e centrada no cliente (PANDYA, 2018).

Ainda sobre o Sistema Toyota de Produção, um dos aspectos mais notáveis é sua ênfase na cultura organizacional. A Toyota acredita que a melhoria contínua deve ser

parte da cultura da empresa, envolvendo todos os colaboradores, desde a alta gestão até os operários. Essa abordagem participativa não apenas melhora os processos, mas também aumenta o engajamento e a satisfação dos funcionários. A Toyota implementa práticas como o Sistema Toyota de Produção (TPS), que incentiva a autonomia dos trabalhadores e a resolução de problemas em equipe (LIKER, 2004).

Além disso, a combinação dessas metodologias tem se mostrado eficaz em otimização de produção, bem como no levantamento de informações para análise do presente estudo caso. Organizações que já haviam adotado práticas Lean e Six Sigma conseguiram se adaptar mais rapidamente às mudanças nas demandas e nas operações, demonstrando a resiliência proporcionada por essas abordagens além da criação e estabelecimento de normas operacionais como ações estruturantes por meio do uso das ferramentas da metodologia Lean para mitigar e/ou eliminar as causas dos problemas levantados neste estudo (HINES; FROST, 2020).

3.3. DIAGRAMA DE ISHIKAWA

O Diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito ou diagrama de espinha de peixe, é uma ferramenta de qualidade desenvolvida pelo professor Kaoru Ishikawa na década de 1960. Ele é utilizado para identificar, explorar e ilustrar todas as possíveis causas de um problema específico, ajudando na análise sistemática de seus fatores contribuintes (ISHIKAWA, 1986). O diagrama organiza causas potenciais em categorias, facilitando a visualização e o entendimento das origens do problema, o que torna sua aplicação valiosa para o processo de melhoria contínua e na resolução de problemas em várias áreas, como a manufatura, a saúde e o setor de serviços (LEITE et al., 2021). De acordo com Campos (2019), o Diagrama de Ishikawa é baseado na premissa de que todo problema possui causas e que, identificando e controlando essas causas, é possível mitigar ou resolver o problema em questão. Esse método estruturado de análise possibilita uma avaliação mais aprofundada das causas e subcausas do problema, permitindo uma abordagem sistemática para a resolução dos mesmos (BARBOSA; FONSECA, 2020).

O Diagrama de Ishikawa também tem se mostrado útil na análise de problemas complexos onde múltiplas causas interagem, como nas áreas de engenharia de

produção e na gestão de qualidade total (TQM) (FEIGENBAUM, 1991). Nesses casos, a ferramenta permite que gestores e equipes identifiquem fatores críticos de qualidade e desenvolvam ações corretivas mais direcionadas. Conforme argumentado por Dias et al. (2022), a flexibilidade do Diagrama de Ishikawa permite sua adaptação a diferentes tipos de problemas e setores, sendo um recurso universal para o diagnóstico e solução de problemas organizacionais. Recentemente, estudos têm demonstrado a eficácia do Diagrama de Ishikawa em sistemas de gestão ambiental e sustentabilidade (OLIVEIRA; MENEZES, 2021). Na gestão de recursos hídricos, por exemplo, o diagrama pode ser utilizado para identificar fatores que afetam a eficiência no uso da água em processos industriais, permitindo que as empresas desenvolvam estratégias para minimizar o consumo e reduzir impactos ambientais (SANTOS et al., 2023).

3.4. ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS - FTA

A Análise da Árvore de Falhas (FTA, do inglês Fault Tree Analysis) é uma técnica de dedução de cima para baixo que identifica as possíveis causas de falhas. Utilizando lógica booleana (operações E e OU), a FTA combina eventos para encontrar as falhas básicas que levam à falha principal (NASA, 2000; SAKURADA, 2001).

Os objetivos da FTA incluem a identificação de modos de falha através da análise completa do ambiente de produção, a definição de planos de manutenção baseados em confiabilidade, a análise detalhada de falhas e uma melhor compreensão do sistema (YAMANE e SOUZA, 2007). A ferramenta FTA é especialmente útil em sistemas complexos, onde múltiplas causas potenciais de falhas podem interagir. Ela é aplicada após a ocorrência de uma falha para entender suas causas e implementar ações corretivas (YAMANE e SOUZA, 2007).

A Análise da Árvore de Falhas (FTA) tem sido aplicada na indústria de papel e celulose para identificar e mitigar falhas em equipamentos essenciais. Em um estudo realizado em uma fábrica de celulose no Espírito Santo, a FTA foi usada para analisar quebras no eixo de uma bomba de recirculação de pasta. A análise identificou obstruções na tubulação como causa das falhas, resultando em ações corretivas para melhorar a confiabilidade e otimizar o consumo de água (SANTOS, 2018).

3.5. PLANO DE AÇÃO - FCA

A metodologia de aplicação de plano de ação - FCA (fato, causa e ação) é descrita como uma forma de realizar diagnóstico de problemas, prevenir riscos e gerar melhorias nos processos. O fato representa o problema, a causa são os motivos e a ação é a atitude desenvolvida para corrigir o problema. Essa metodologia pode ser utilizada como ação corretiva ou preventiva nos processos, com o objetivo de identificar a raiz dos problemas e criar ações para solução (MARSHALL et al., 2012).

Segundo Marshall et al. (2012), o plano de ação orienta as ações que deverão ser implementadas para a correção de uma falha, servindo de referência às tomadas de decisão de um projeto. Para Werkema (1995), o planejamento de um plano de ação deve ser elaborado através de reuniões com a equipe envolvida e deve incluir um check-list das atividades a serem desenvolvidas.

Por exemplo, a Klabin utiliza do FCA para promover o desenvolvimento sustentável e melhorar seus processos industriais. A empresa implementou o programa "Goiana em Ação", que adota a metodologia FCA para identificar e solucionar desafios operacionais, envolvendo a eficiência e a sustentabilidade em suas operações (KLABIN, 2018).

3.6. 5 POR QUÊS

A análise dos 5 Porquês é uma técnica simples e eficaz para identificar a causa raiz de um problema. Conforme descrito por Ohno (1988), a técnica envolve perguntar "por quê?" cinco vezes, ou quantas vezes forem necessárias, até que a causa fundamental do problema seja identificada. Essa abordagem ajuda a ir além dos sintomas superficiais e a descobrir as causas subjacentes que precisam ser abordadas (OHNO, 1988). A análise dos 5 Porquês é amplamente utilizada em conjunto com outras ferramentas de qualidade para resolver problemas complexos e melhorar processos. Além disso, essa técnica é valorizada por sua simplicidade e eficácia, permitindo que equipes de diferentes níveis hierárquicos contribuam para a solução de problemas (PEREIRA; SILVA, 2019) (LIKER, 2004).

Um exemplo de sua aplicação pode ser observado em um estudo realizado por Yamane e Souza (2007), onde a técnica foi empregada para investigar falhas no sistema de produção de papel e encontrar soluções eficientes para melhorar a confiabilidade do processo. Através da análise repetitiva das causas, a metodologia permitiu identificar falhas sistêmicas e operacionais, resultando em melhorias significativas na eficiência da produção e redução de custos.

4. METODOLOGIA

A análise da falha por conta da queda do nível dos reservatórios de água (WFC) foi conduzida utilizando uma abordagem estruturada baseada em métodos de gestão de falhas e técnicas de manutenção preditiva onde foram analisadas as ocorrências das datas 22/09 a 29/09 (evento 1) e 08/10 a 15/10 (evento 2). O processo foi realizado em etapas sequenciais para garantir que todos os fatores causais fossem identificados e adequadamente avaliados.

Foi realizada a extração de informações históricas relacionadas aos eventos de baixa nos níveis dos reservatórios WFC nas ETAs "A" e "B". Os dados incluíram registros de consumo de água pela planta, variações de consumo em relação a demanda operacional e aos padrões de comportamento das bombas de alimentação e sistemas de tratamento sendo observados no intervalo de 3h em 3h no total de 14 dias contabilizando os dois eventos.

Foram monitorados junto à equipe técnica, no período anterior ao evento, as condições operacionais do sistema de tratamento de água, incluindo a qualidade da água captada e o desempenho dos equipamentos das ETAs. Foram registradas interrupções e ocorrências nos dias 26/09 e 11/10, destacando os impactos diretos nas áreas de branqueamento e digestores B e C ocasionando uma perda de produção estimada de 466,47 toneladas de celulose.

O método de análise de causa raiz foi aplicado para identificar fatores primários e secundários que contribuíram para a queda de nível dos reservatórios. Utilizamos ferramentas como o Diagrama de Ishikawa (espinha de peixe) e análise dos "5 Por

quês" e demais citadas dentro da metodologia Lean para explorar deficiências operacionais, falhas de manutenção e mudanças nas características da água captada.

Para validar essas informações, foi utilizado o SDCCD (Sistema Digital de Controle Distribuído), que permitiu o monitoramento em tempo real das variáveis operacionais do processo. Através do SDCCD, foi possível coletar dados precisos sobre o desempenho dos equipamentos e as condições de operação das ETAs e também do consumo segregados por áreas indústrias da fábrica. Esses dados foram então exportados e analisados utilizando o software Minitab, que é uma ferramenta robusta para análise estatística. No Minitab, foram aplicadas técnicas avançadas de análise de dados, como controle estatístico de processos e análise de regressão, para identificar padrões e tendências que pudessem estar relacionados às falhas observadas utilizando de amostragens de três em três horas durante os quatorze dias em que ocorreram os eventos. Essa abordagem combinada permitiu uma análise detalhada e precisa, garantindo que todas as possíveis causas fossem investigadas e validadas.

Foi realizado um levantamento das atividades de manutenção preventiva e corretiva previamente executadas nos sistemas relacionados ao reservatório de água tratada, bem como das áreas consumidoras. Avaliou-se a eficácia das intervenções e a existência de passivos que pudessem impactar o funcionamento dos reservatórios.

A análise incluiu o mapeamento do consumo de água em diferentes setores da planta industrial, verificando picos de utilização não planejados e seu impacto nos níveis dos reservatórios. Para isso, foram comparados os dados com os limites operacionais estabelecidos. Foi examinado o estado atual dos componentes das ETAs "A" e "B", incluindo válvulas, bombas e sensores de nível. Eventuais desgastes ou avarias que comprometessem o desempenho dos sistemas foram identificados e catalogados.

Com base nos resultados da análise, foram elaboradas recomendações específicas para mitigação de riscos futuros, incluindo:

- Reestruturação das estratégias de manutenção preventiva.

- Monitoramento contínuo da qualidade da água captada.
- Implementação de alertas automáticos para variações de níveis críticos nos reservatórios.

A validação da análise foi realizada em reuniões com os responsáveis pela operação e manutenção, onde foram discutidos os achados e sugeridas ações práticas. Esta abordagem metodológica permitiu identificar e abordar as causas principais e secundárias da falha, promovendo um plano estruturado para evitar a recorrência do problema e minimizar impactos na produção. Além disso, foram estabelecidas medidas preventivas para garantir a continuidade operacional. Essas reuniões também facilitaram a troca de conhecimentos entre as equipes, aprimorando a colaboração e a eficiência no tratamento das questões identificadas. O feedback contínuo dessas sessões ajudou a refinar as estratégias e a implementar soluções mais eficazes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CONTEXTO DA OCORRÊNCIA

A análise dos acontecimentos apontou que a falha nos reservatórios WFC das ETAs "A" e "B" resultou em impactos diretos nos processos produtivos, principalmente nos branqueamentos e digestores da planta industrial. A perda teórica estimada em 466,47 TSA (tonelada de celulose seca ao ar) evidencia a magnitude do problema, indicando a necessidade de uma avaliação detalhada sobre as causas e possíveis soluções para evitar a recorrência onde já se sabe que, de acordo com Smook, seja por ineficiências ou falhas operacionais, resultam em custos elevados devido à perda de produto final, maior consumo de energia e químicos, além de afetar a competitividade no mercado global (SMOOK, 2002).

Os registros das paradas, ocorridas em 26/09 e 11/10, foram analisados considerando o contexto operacional e as condições dos equipamentos envolvidos. A interrupção nos branqueamentos A, L3, L4 e L5, além da redução nos digestores B e C de

aproximadamente 4900 ton/h, sugere que o consumo excessivo de WFC pela fábrica, associado à mudança na qualidade da água captada e à falta de manutenção eficiente nas ETAs, foram fatores determinantes.

Os dados levantados indicaram que o aumento da demanda por água de 1300 m³/h, não acompanhado de ajustes nos sistemas de captação e tratamento, gerou um desbalanceamento significativo nos níveis dos reservatórios. A análise da última análise de falha (AF 35621-0002) confirmou que a falha é recorrente, reforçando a hipótese de que há passivos operacionais e de gestão que precisam ser tratados. A equipe técnica, identificou que a ausência de um monitoramento adequado e a demora na implementação de medidas corretivas contribuíram para a gravidade dos eventos.

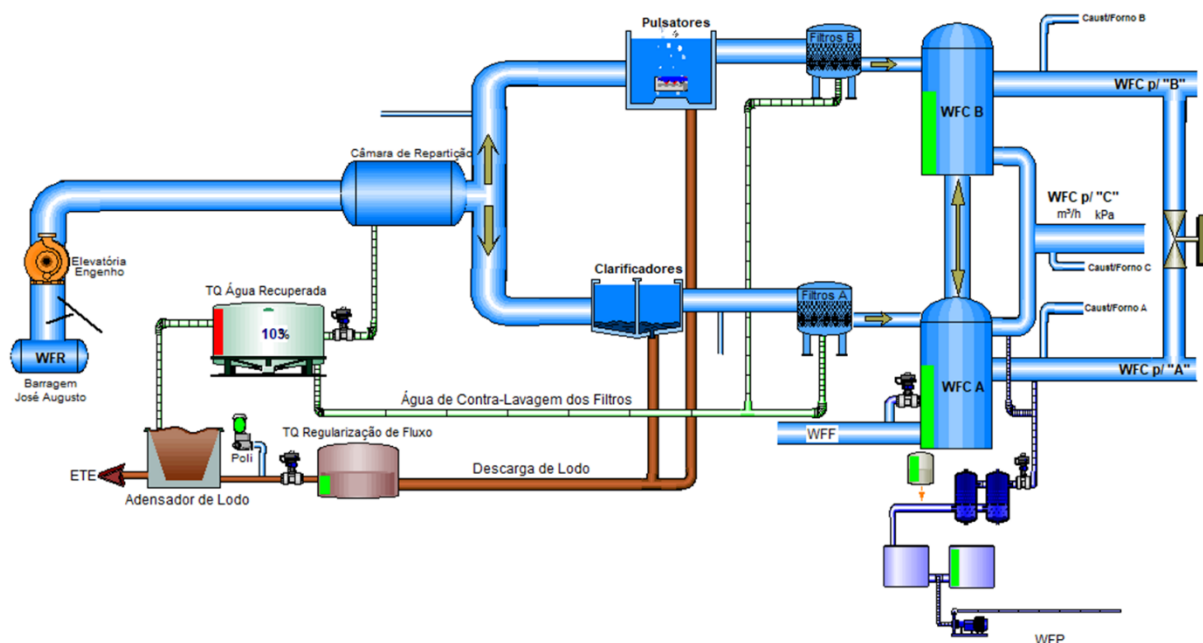
Outro ponto relevante foi a avaliação in loco das condições dos equipamentos das ETAs, onde se constatou desgaste em componentes essenciais, como bombas e sensores, o que comprometeu a eficiência no controle de nível dos reservatórios. Além disso, o planejamento inadequado da manutenção preventiva e a ausência de sistemas de alerta eficientes foram aspectos destacados como agravantes do problema. O impacto econômico da falha, embora não quantificado diretamente, foi evidente na redução da capacidade produtiva e no aumento de custos operacionais.

As análises também apontaram para a importância de uma gestão integrada dos recursos hídricos, envolvendo estratégias para otimizar o consumo e melhorar a qualidade da água captada. A proposta de ações corretivas inclui a implementação de sistemas de monitoramento em tempo real, a revisão das práticas de manutenção preventiva e a capacitação da equipe para lidar com situações críticas. Com base nas discussões realizadas, foi possível elaborar um plano de ação que prioriza a mitigação de riscos e a recuperação da confiabilidade dos sistemas, garantindo maior estabilidade operacional para a planta industrial.

O diagrama apresentado na figura 1 ilustra o sistema de tratamento e distribuição de água na planta industrial, destacando o funcionamento das ETAs e o fluxo hidráulico entre os reservatórios WFC A e B. A análise detalhada do esquema permite compreender como os diferentes componentes do sistema estão interligados e como

fatores críticos, como falhas em equipamentos ou variações no consumo, podem impactar significativamente a operação. A presença de pulsadores e clarificadores é essencial para garantir a qualidade da água distribuída, enquanto os filtros A e B desempenham um papel fundamental na remoção de partículas e impurezas.

Figura 1 - Sistema de tratamento e distribuição de água na planta industrial.



Fonte: Suzano (2024).

A análise aponta que a baixa nos níveis dos reservatórios está diretamente relacionada ao consumo excessivo de água pela planta, à insuficiência de manutenção preventiva e à possível obstrução ou falha nos componentes, como válvulas e bombas. Além disso, a dependência do nível de água da Barragem José Augusto, captada por meio da elevatória Engenho, mostra como mudanças nas condições da fonte de captação podem gerar impactos em cadeia no sistema já que o tanque de regularização de fluxo e o tanque de água recuperada são componentes importantes para mitigar flutuações momentâneas.

A análise do sistema sugere ainda que ajustes na operação das ETAs A e B, aliados a uma revisão da estratégia de manutenção e do controle de qualidade da água captada, são necessários para estabilizar os níveis dos reservatórios e garantir a continuidade da produção. A integração entre os sistemas de tratamento e armazenamento precisa ser revisada, com ênfase no monitoramento contínuo e na

implementação de mecanismos automáticos para alertar sobre níveis críticos nos reservatórios.

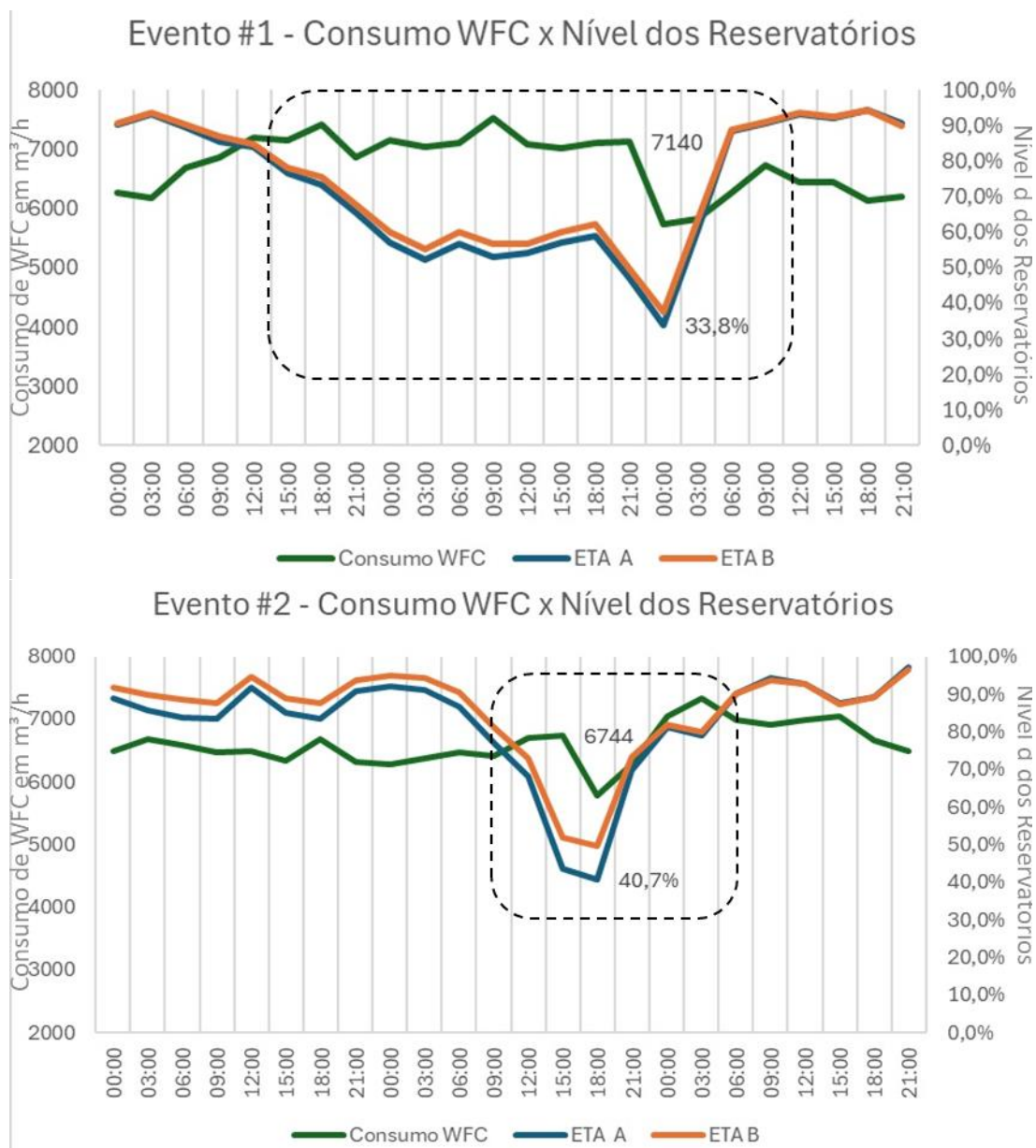
5.2. TIMELINE DAS OCORRÊNCIAS

Em 24/09, às 19h30, foi registrado um aumento significativo de 1300 m³/h no consumo de WFC, resultado de ajustes na operação da fábrica C, com impacto imediato nos níveis monitorados. Esse aumento na demanda indicou que o sistema estava operando próximo ou acima de sua capacidade projetada, evidenciando a necessidade de ajustes operacionais mais dinâmicos.

No dia seguinte, em 25/09, às 07h30, observou-se o início da queda dos níveis dos reservatórios WFC A e B de 90,4% para 54,7% até o dia 26/09, marcando o momento em que os sistemas de compensação falharam em atender à demanda. Durante o período de 26/09, entre 02h e 22h, o consumo médio de WFC da fábrica permaneceu estável em 7150 m³/h, enquanto os níveis dos reservatórios se mantiveram em torno de 55%.

A timeline apresentada para o evento de 26/09/2021 destaca de maneira clara os momentos críticos que levaram à redução dos níveis dos reservatórios WFC A e B e suas consequências operacionais, conforme observado na figura 2.

Figura 2 - Timeline da ocorrência.



Fonte: Autores (2024).

Esse dado reforça que, embora a estabilidade de consumo tenha sido alcançada, os reservatórios já operavam em um nível crítico (abaixo de 60%), comprometendo a capacidade de atender a picos inesperados ou variações adicionais.

Na noite de 26/09 – evento 1, por volta das 22h, os níveis dos reservatórios atingiram 33,8%, um ponto alarmante que resultou na interrupção dos branqueamentos A, 3, 4 e 5. Esse evento não apenas impactou diretamente a produção, mas também destacou fragilidades significativas na gestão de recursos hídricos e na capacidade de resposta do sistema. A continuidade da queda até 27/09 às 01h30 sugere que as

ações corretivas tomadas não foram suficientes para estabilizar a operação em tempo hábil. A análise desse evento evidencia a interdependência entre o consumo da planta, a capacidade dos reservatórios e a eficiência dos sistemas de tratamento de água.

Em 11/10/2021 – evento 2, por volta das 08h30, os níveis dos reservatórios começaram a cair de maneira acelerada, atingindo valores críticos no final da tarde. Essa queda coincide com um aumento no consumo (representado por picos nas linhas correspondentes), evidenciando um desbalanceamento entre a oferta e a demanda de WFC.

Outro aspecto importante é a recuperação parcial dos níveis observada após as quedas (figura 2), o que sugere que as ações corretivas aplicadas foram insuficientes para estabilizar o sistema de forma duradoura. Além disso, os registros históricos desses equipamentos indicam que o sistema opera frequentemente em limites críticos, sem uma margem de segurança adequada para absorver picos de demanda ou variações nas condições de operação.

5.3. CONSTRUÇÃO DO PENSAMENTO CRÍTICO PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

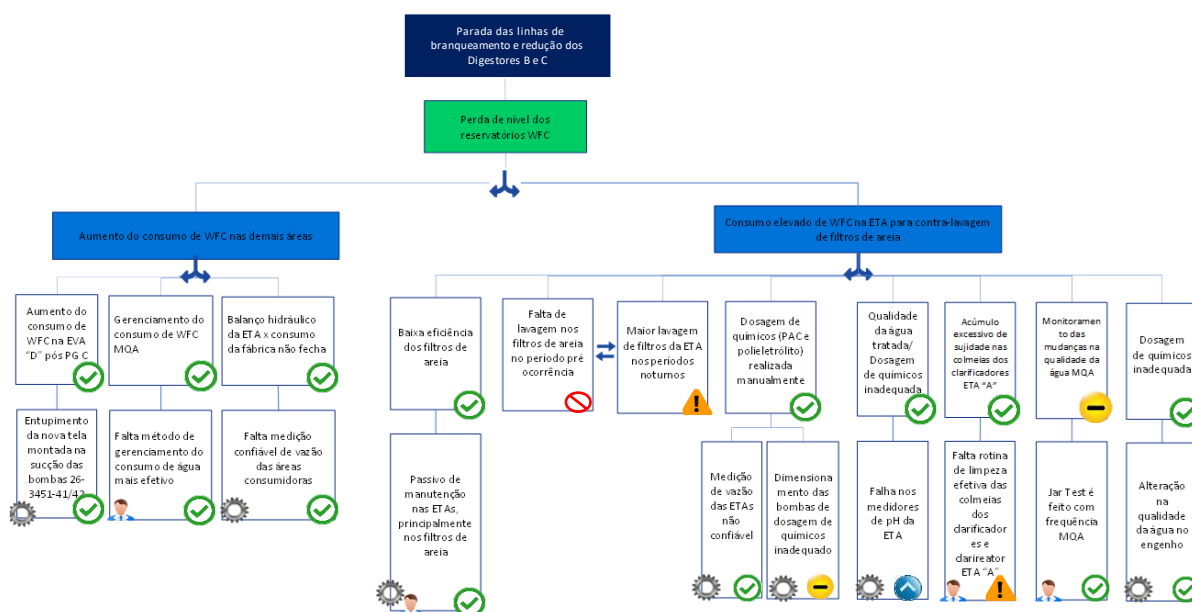
As falhas destacadas reforçam a necessidade de uma revisão completa na gestão e operação do sistema, com foco na implementação de redundâncias, aumento da capacidade de armazenamento e modernização do monitoramento em tempo real. A avaliação visual in loco também aponta para a necessidade de intervenções preventivas nos componentes principais, como bombas e válvulas, para melhorar a eficiência geral e reduzir o risco de novas interrupções. A integração de ferramentas preditivas e o ajuste de parâmetros operacionais são essenciais para evitar recorrências e garantir a continuidade da produção.

A falta de flexibilidade no gerenciamento de demanda e a ausência de alarmes mais proativos para níveis críticos contribuíram para o agravamento do problema. Este caso reforça a necessidade de implementar estratégias mais robustas de monitoramento em tempo real, ajustes preventivos nos sistemas de distribuição e um planejamento

mais detalhado para atender a variações sazonais e operacionais. A capacidade de reagir rapidamente a eventos críticos como este será fundamental para evitar paralisações futuras e garantir a continuidade da produção industrial.

A árvore de falhas apresentada (FTA) detalha os fatores causais que levaram à parada das linhas de branqueamento e à redução dos digestores B e C, centrando-se na perda de nível dos reservatórios WFC. O diagrama está organizado em dois ramos principais: o aumento no consumo de WFC e os problemas relacionados ao consumo elevado de água para contra lavagem dos filtros nas ETAs.

Figura 3 - FTA árvore de falhas.



Fonte: Resultado da pesquisa (2022).

O primeiro ramo evidência como o aumento do consumo de WFC, além dos limites normais, impactou negativamente os níveis dos reservatórios. Entre os fatores listados estão o aumento do consumo devido a ajustes operacionais no forno de cal e a gestão inadequada do consumo de WFC. Este último aspecto se desdobra em questões como falhas na redistribuição de fluxo e ausência de controle adequado sobre os consumos setoriais. Outro ponto destacado é a falha de medição, que compromete a detecção precoce de tendências críticas. Esses fatores, combinados, resultaram em um desequilíbrio operacional que sobrecarregou os sistemas de tratamento e armazenamento.

O segundo ramo aborda os problemas associados à contra lavagem dos filtros, incluindo o volume excessivo de água utilizado neste processo. Questões como mau dimensionamento dos filtros, falhas no sistema de controle e variações na qualidade da água captada são evidenciadas como causas primárias. A ocorrência de passivos de manutenção e a ausência de uma estratégia preventiva robusta para as ETAs também foram destacadas como contribuições significativas para a queda nos níveis dos reservatórios.

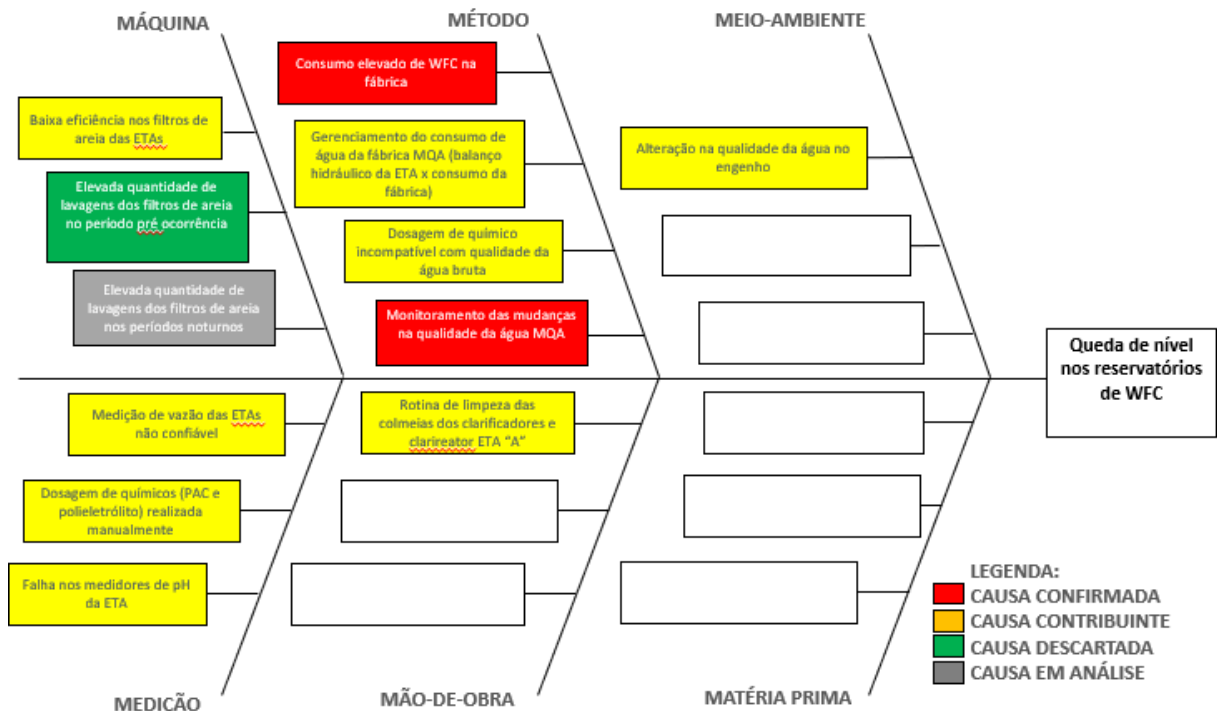
A análise da FTA sugere que as causas das falhas são multifatoriais e interdependentes, abrangendo desde questões estruturais, como dimensionamento inadequado de equipamentos, até aspectos gerenciais, como a ausência de sistemas eficientes de monitoramento e controle de consumo. As consequências operacionais dessas falhas incluem não apenas interrupções na produção, mas também um aumento nos custos de manutenção corretiva e impactos potenciais na qualidade do produto.

A discussão dessa árvore de falhas reforça a necessidade de uma abordagem integrada para resolver os problemas identificados. A implementação de sistemas avançados de monitoramento, o treinamento da equipe operacional, a revisão dos procedimentos de manutenção e a reestruturação dos processos de redistribuição de consumo são medidas que podem ser tomadas para mitigar os riscos.

Adicionalmente, o dimensionamento correto dos filtros e o aprimoramento do planejamento preventivo das ETAs são essenciais para garantir a estabilidade e a eficiência do sistema. Essa análise destaca a importância de uma gestão proativa, baseada em dados, para evitar a recorrência de eventos similares e assegurar a continuidade das operações.

O diagrama de causa e efeito apresentado identifica e organiza os fatores que contribuíram para a queda de nível nos reservatórios WFC. A análise é estruturada em cinco categorias principais: máquina, método, mão de obra, medição, e meio ambiente, permitindo uma visão holística das causas envolvidas.

Figura 4 - Diagrama de causa x efeito.



Fonte: Autores - Resultado da pesquisa (2023).

Na categoria **máquina**, foram destacadas deficiências nos filtros de areia das ETAs, principalmente devido à baixa eficiência e à elevada quantidade de lavagens realizadas em períodos pós-ocorrências. Essas condições agravaram a instabilidade no sistema, exigindo maior utilização de recursos hídricos para compensação, o que contribuiu para a queda dos níveis dos reservatórios. Além disso, a falha dos medidores nas ETAs e a dosagem inadequada de químicos (PAC e polieletrólitos) foram identificadas como problemas críticos, comprometendo a eficiência do tratamento da água e a confiabilidade do sistema.

Na dimensão **método**, o consumo elevado de WFC na planta industrial foi confirmado como um dos principais fatores que desencadearam o evento. A falta de um gerenciamento eficiente do consumo de água, que incluía um balanço adequado entre a produção da ETA e a demanda da planta, foi considerada uma causa contribuinte. Também foi identificada a ausência de monitoramento das mudanças na qualidade da água captada, que teria permitido ajustes preventivos antes que o problema se agravasse.

Em **mão de obra**, foi evidenciada a rotina de limpeza inadequada nas colmeias dos clarificadores e do clarifloculador da ETA "A". Esse aspecto contribuiu para a redução da eficiência dos equipamentos e, conseqüentemente, para a incapacidade do sistema de atender à demanda. A necessidade de maior capacitação da equipe operacional e a implementação de práticas mais robustas de manutenção preventiva são medidas sugeridas para mitigar falhas futuras.

Na dimensão **medição**, foram identificados problemas significativos, como a medição de vazão nas ETAs não confiável e o uso de dosagens de químicos sem o devido ajuste automático, o que gerou inconsistências nos processos de tratamento e controle. Isso enfatiza a necessidade de modernizar os equipamentos de medição e implementar tecnologias de automação para maior precisão e previsibilidade.

Finalmente, em **meio ambiente**, foi destacada a alteração na qualidade da água captada no engenho, que contribuiu para a instabilidade do sistema. Essa causa está diretamente relacionada às variações sazonais e à falta de controle sobre a fonte de captação, que exigiu ajustes inesperados nos processos das ETAs.

O diagrama demonstra que a queda de nível dos reservatórios WFC é um problema multifatorial, resultado de interações complexas entre falhas operacionais, deficiências estruturais e condições ambientais adversas. A solução exige uma abordagem integrada, incluindo a modernização de equipamentos, a capacitação da equipe, a implementação de sistemas de monitoramento em tempo real e a adoção de estratégias de manutenção preventiva mais eficazes. Essas medidas são cruciais para garantir a estabilidade do sistema e evitar interrupções futuras na operação da planta industrial.

A análise das causas associadas à queda de nível dos reservatórios WFC detalha um conjunto de fatores inter-relacionados, evidenciando a complexidade do problema. O aumento do consumo de WFC nas diferentes áreas da planta foi identificado como uma das principais causas, especialmente em situações onde o gerenciamento de consumo e a redistribuição de fluxo não eram efetivos. Isso foi agravado por fatores estruturais, como o entupimento de telas montadas na sucção das bombas e a ausência de dimensionamento adequado para o cenário operacional.

As falhas no plano preventivo de manutenção também se destacaram como uma contribuição significativa. A baixa eficiência dos filtros de areia nas ETAs e a falta de rotinas de limpeza consistentes dos clarificadores e colmeias comprometeram a qualidade do processo de tratamento de água. Essas deficiências demonstram um passivo de manutenção acumulado que, combinado com a ausência de monitoramento adequado, impediu a identificação e a solução antecipada dos problemas. Além disso, a má qualidade das medições nos instrumentos, como os medidores de pH, foi apontada como um agravante, criando incertezas operacionais que dificultaram a resposta imediata.

Outro fator crítico foi o consumo elevado de água para contralavagem dos filtros de areia. A frequência inadequada de contralavagens e a falta de lavagens preventivas antes das ocorrências criaram condições desfavoráveis para o desempenho dos filtros, sobrecarregando o sistema e resultando em uma queda nos níveis dos reservatórios. A dosagem inadequada de químicos, como PAC e polieletrólitos, também desempenhou um papel importante, influenciando diretamente a eficiência do tratamento de água e a capacidade do sistema de lidar com variações de qualidade na água captada.

A alteração na qualidade da água na captação representou outro desafio significativo. Em situações de variações sazonais ou eventos pontuais, a dosagem de químicos deveria ter sido ajustada de forma mais eficaz para manter os parâmetros de qualidade ideais. No entanto, a ausência de um protocolo definido para testes como o Jar Test impediu a identificação e a correção antecipada de desvios, deixando o sistema vulnerável.

A justificativa para cada causa destaca a necessidade de ações corretivas e preventivas direcionadas. Entre as medidas sugeridas, estão o fortalecimento das rotinas de manutenção preventiva, o aprimoramento das práticas de medição e controle, e a modernização dos sistemas de monitoramento. Além disso, a capacitação da equipe operacional e a definição de protocolos robustos para eventos críticos são essenciais para garantir a resiliência do sistema e evitar a recorrência de falhas semelhantes.

O plano de ação apresentado na Tabela 1 detalha as medidas propostas para mitigar as causas identificadas na análise de falhas relacionadas à queda de nível nos reservatórios de WFC. A estrutura do plano é organizada em etapas que buscam abordar as causas raiz, causas contribuintes e hipóteses, assegurando que cada ação esteja claramente vinculada a uma responsabilidade específica, um prazo e um status atualizado.

Tabela 1 - Plano de Ação

POR QUÊ? (qual a CAUSA que será bloqueada)	O QUE FAZER? (qual a ação, seja direto)	ONDE? (quando houver abrangência)
Plano preventivo de manutenção dos filtros de areia defasado	Recuperação da condição dos sifões dos filtros de 6 a 19	Sifões dos filtros de 6 a 19
Plano preventivo de manutenção dos filtros de areia defasado	Sanar vazamento na linha de retrolavagem dos filtros da ETA "B"	Número do local de instalação das linhas (006/.../019)
Plano preventivo de manutenção dos filtros de areia defasado	Substituir válvulas de dreno dos filtros 15 e 16 da ETA "B", que estão dando passagem	Número do local de instalação das linhas (006/.../019)
Plano preventivo de manutenção dos filtros de areia defasado	Substituir válvulas de dreno da linha do torniquete, que estão dando passagem	Torniquete hidráulico de lavagem superficial
Falta de medição confiável de vazão das áreas consumidoras	Coordenar trabalho ordenado para calibração das medições das áreas	Áreas consumidoras já mapeadas
Falta de medição confiável de vazão das áreas consumidoras	Mapeamento das fontes consumidoras de modo a reduzir consumos não medidos	Áreas consumidoras já mapeadas
Medição de vazão das ETAs não confiável	Revisitar plano de calibração dos FTs do engenho, ETAs A e B, além da saída de WFC	Número do instrumento de medição no local indicado
Dimensionamento das bombas de dosagem de químicos inadequado	Rever cálculo dimensional das bombas de dosagem de químicos	Número de local de instalação das bombas
Dimensionamento das bombas de dosagem de químicos inadequado	Substituir válvula de sucção da bomba de PAC para a ETA A que está travada	Número de local de instalação da válvula
Falha nos medidores de pH da ETA	Rever plano de manutenção dos pHmetros	Número de local de instalação dos pHmetros
Falta método de gerenciamento do consumo de água mais efetivo	Revisar de consumo de água das áreas	Áreas consumidoras de WFC
Falta método de gerenciamento do consumo de água mais efetivo	Remodelar a tela de gerenciamento de consumo de água	Áreas consumidoras de WFC
Falta método de gerenciamento do consumo de água mais efetivo	Revisitar diretrizes para consumo de água na fábrica/Definir gatilhos com relação ao nível do reservatório	Áreas consumidoras de WFC
Passivo de manutenção nas ETAs, principalmente nos filtros de areia	Revisar os planos de manutenção dos filtros da ETA "A"	Filtros de areia da ETA "A"
Passivo de manutenção nas ETAs, principalmente nos filtros de areia	Revisar os planos de manutenção dos filtros da ETA "B"	Filtros de areia da ETA "B"
Passivo de manutenção nas ETAs, principalmente nos filtros de areia	Recuperar filtros de areia 08	Filtros de areia 08
Passivo de manutenção nas ETAs, principalmente nos filtros de areia	Recuperar filtros de areia 17	Filtros de areias 17
Redução da área de filtração do parque de filtros ETA "B"	Recuperar filtro de areia 19	Filtro de areia 19 (LI)
Plano preventivo de manutenção dos filtros de areia defasado	Recuperação da condição dos sifões dos filtros de 6 a 19	Sifões dos filtros de 6 a 19
Plano preventivo de manutenção dos filtros de areia defasado	Sanar vazamento na linha de retrolavagem dos filtros da ETA "B"	Número do local de instalação das linhas (006/.../019)
Falha nos medidores de pH da ETA	Intensificar check da medição dos pHmetros com medição laboratório - operação	Número do instrumento de medição no local indicado
Falta de rotina de limpeza efetiva das colmeias dos clarificadores e clarificador da ETA "A"	Criar diretrizes de limpeza das colmeias dos clareadores	Número de local de instalação das colmeias
Falta de rotina de limpeza efetiva das colmeias dos clarificadores e clarificador da ETA "A"	Fabricar e instalar guarda corpo para que seja realizadas limpeza operacional segura	Número de local de instalação das colmeias
Jar test é feito com frequência MQA e flata reciclagem da equipe	Atualização de procedimentação de Jar Tes na ETA E reciclagem da equipe quanto ao processo	ETA

Para as causas relacionadas à falta de um método de gerenciamento eficaz do consumo de água, as ações propostas incluem revisar os limites de consumo e remodelar a tela de gerenciamento nas áreas consumidoras. Estas medidas visam garantir que a distribuição e o consumo de WFC estejam alinhados às demandas da planta, reduzindo os impactos de consumo excessivo em períodos críticos. Apesar de algumas dessas ações já estarem concluídas, o acompanhamento contínuo é necessário para avaliar a eficácia e implementar ajustes.

Nas questões relacionadas aos passivos de manutenção, como nos filtros das ETAs, a recuperação e a substituição de componentes foram apontadas como prioridades. Por exemplo, o plano destaca a recuperação de filtros específicos e a criação de planos de manutenção mais robustos. Essas iniciativas são fundamentais para restaurar a eficiência do sistema e garantir que ele funcione dentro dos parâmetros operacionais estabelecidos.

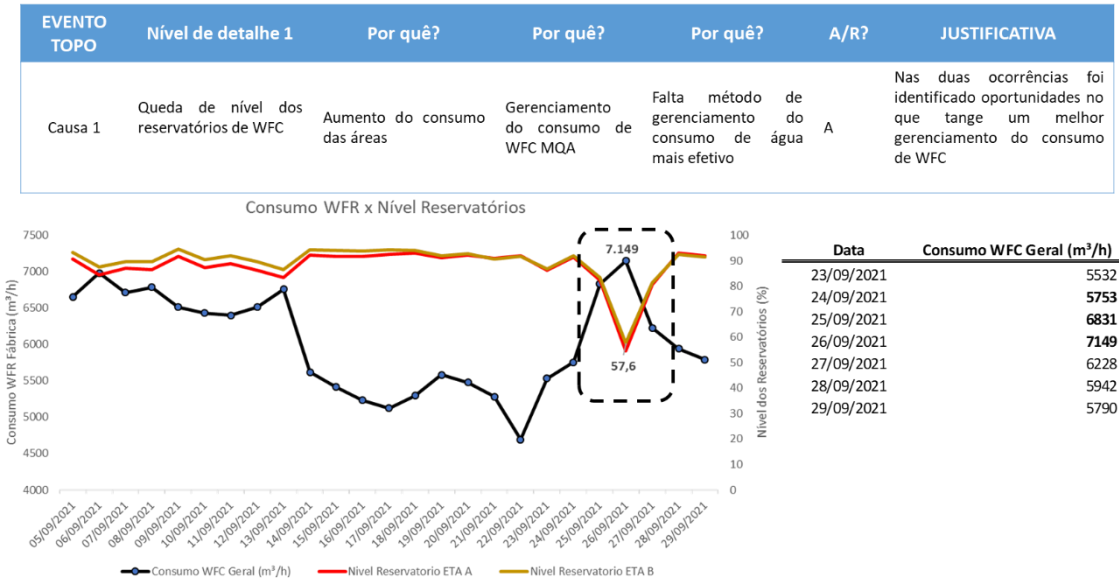
No entanto, a maioria dessas ações permanece em aberto, evidenciando a necessidade de maior agilidade no cumprimento dos prazos. Problemas associados à medição e calibração de instrumentos, como os medidores de vazão e de pH, também receberam atenção significativa. A revisão dos planos de calibração, a atualização de equipamentos e a intensificação de verificações periódicas foram listadas como medidas essenciais para melhorar a precisão e a confiabilidade dos dados operacionais. Estas ações são críticas para antecipar falhas e evitar decisões baseadas em informações imprecisas.

Por fim, o plano aborda questões operacionais, como a falta de rotinas de limpeza eficazes e a necessidade de atualização de procedimentos de Jar Test. A criação de diretrizes claras e a reciclagem de equipes são propostas para garantir que os operadores estejam preparados para lidar com variações na qualidade da água e para manter os equipamentos em condições ideais. Embora algumas ações já tenham prazos estabelecidos, a implementação completa depende do alinhamento entre os responsáveis e o fornecimento de recursos adequados.

Em geral, o plano de ação demonstra um esforço significativo para resolver as causas identificadas na análise de falhas. No entanto, a execução efetiva dessas ações exige um acompanhamento rigoroso, comunicação clara entre as equipes responsáveis e priorização das medidas mais críticas. O sucesso na implementação desse plano não apenas estabilizará o sistema, mas também criará uma base mais robusta para evitar recorrências e melhorar a eficiência operacional da planta.

A análise apresentada para a causa 1 destaca a relação entre o aumento do consumo de WFC e a queda significativa nos níveis dos reservatórios das ETAs. Observa-se que, durante o período em que o consumo médio da fábrica ultrapassou 7.000 m³/h, os níveis dos reservatórios sofreram uma redução acentuada, chegando a 57,6% em momentos críticos. Esse comportamento foi amplificado pelos picos de consumo, que alcançaram até 8.000 m³/h em dias como 25 e 26 de setembro de 2021.

Figura 5 - Causa 1.



Fonte: Autores - Resultado da pesquisa (2024).

A principal causa identificada é a falta de um método de gerenciamento eficaz para o consumo de água, que pudesse prever e ajustar o uso conforme as demandas operacionais. Essa deficiência gerencial resultou na incapacidade de equilibrar o

fornecimento de WFC com a demanda da planta, agravando a pressão sobre os sistemas de armazenamento.

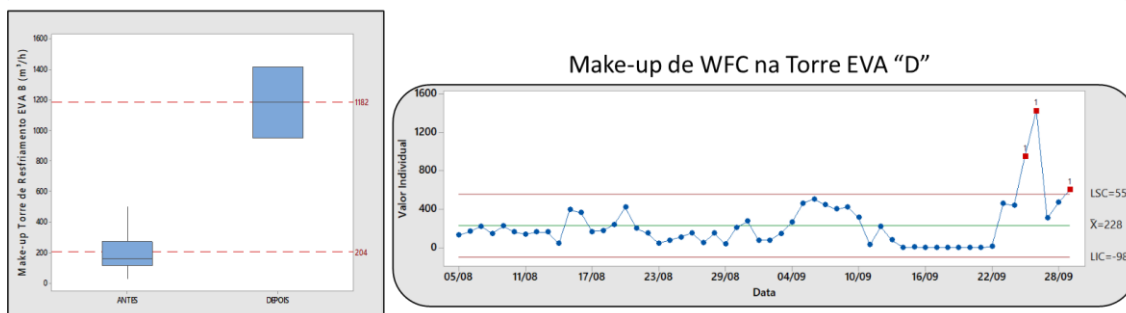
A análise evidencia uma limitação significativa no gerenciamento do consumo de água na planta industrial. Apesar da existência de uma tela de monitoramento, a baixa aderência à ferramenta compromete sua eficácia. Além disso, aproximadamente 40% do consumo de WFC não está mapeado, dificultando a tomada de decisões operacionais e a implementação de estratégias para equilibrar o consumo e os níveis dos reservatórios. A ausência de um procedimento operacional padrão para definir limites claros de consumo por área e correlacioná-los aos níveis de reservatórios agrava ainda mais o problema.

A justificativa reforça a necessidade de melhorias no gerenciamento do consumo de WFC, incluindo a implementação de sistemas de monitoramento em tempo real e estratégias proativas para evitar picos de demanda não controlados. Medidas como ajustes operacionais e redistribuição do consumo são essenciais para garantir a estabilidade do sistema e evitar novas quedas críticas nos níveis dos reservatórios.

A análise do evento relacionado à substituição da tela na sucção das bombas na Torre de Resfriamento da Evaporação "D" evidencia um erro de dimensionamento crítico. O mesh utilizado foi inadequado, com aberturas muito pequenas, o que resultou em entupimentos frequentes e perda de eficiência no desempenho das bombas. Como consequência direta, houve um aumento significativo no consumo de WFC para compensar as perdas de água e evitar o transbordo da torre, conforme mostrado nos gráficos de make-up de WFC.

Figura 6 – Causa 2.

EVENTO TOPO	Nível de detalhe 1	Por quê?	Por quê?	Por quê?	A/R?	JUSTIFICATIVA
Causa 2	Queda de nível dos reservatórios de WFC	Aumento do consumo de WFC na EVA "D"	Entupimento da nova montada na sucção das bombas 26-3451-41/42		A	Dimensionamento inadequado da tela montada na PG



Fonte: Autores (2023).

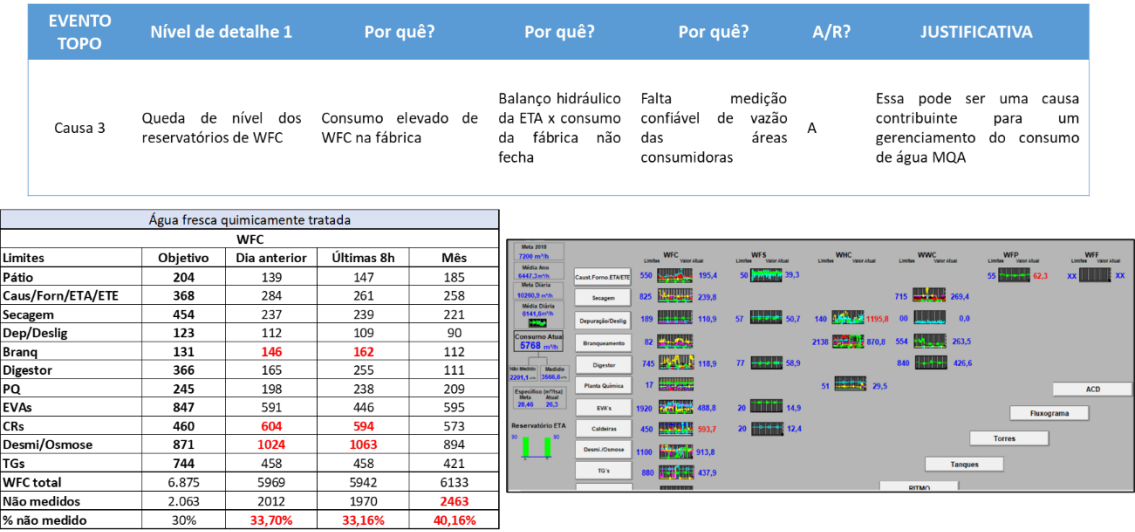
Os dados demonstram que, após a instalação da nova tela, os valores de make-up ultrapassaram consistentemente os limites superiores de controle (LSC=555). Essa situação não apenas aumentou o consumo, mas também impactou negativamente a estabilidade operacional do sistema, contribuindo para a queda de nível nos reservatórios de WFC.

A justificativa para essa ocorrência reforça a necessidade de um dimensionamento mais cuidadoso durante a implementação de mudanças nos sistemas. Um planejamento adequado, com avaliação criteriosa das especificações técnicas dos componentes, é essencial para evitar falhas operacionais e seus impactos subsequentes. Como medida corretiva, é imprescindível substituir a tela por uma que seja compatível com as demandas do sistema e realizar um acompanhamento rigoroso para garantir a eficiência e estabilidade do processo.

A análise da causa 3 aponta que aproximadamente 40% do consumo de WFC na fábrica não está mapeado, o que representa um desafio significativo para a gestão eficiente dos recursos hídricos. Essa lacuna no monitoramento compromete o balanço hidráulico entre a captação de água pela ETA e o consumo nas áreas consumidoras, dificultando a identificação de padrões de uso e possíveis desperdícios.

A ausência de medições confiáveis nas áreas consumidoras contribui para incertezas sobre a real demanda de água e pode levar a decisões operacionais menos precisas. Além disso, o impacto do consumo não medido é exacerbado pelo aumento da demanda em setores como os branqueamentos e os digestores, que já apresentam valores superiores ao objetivo planejado.

Figura 7 - Causa 3.



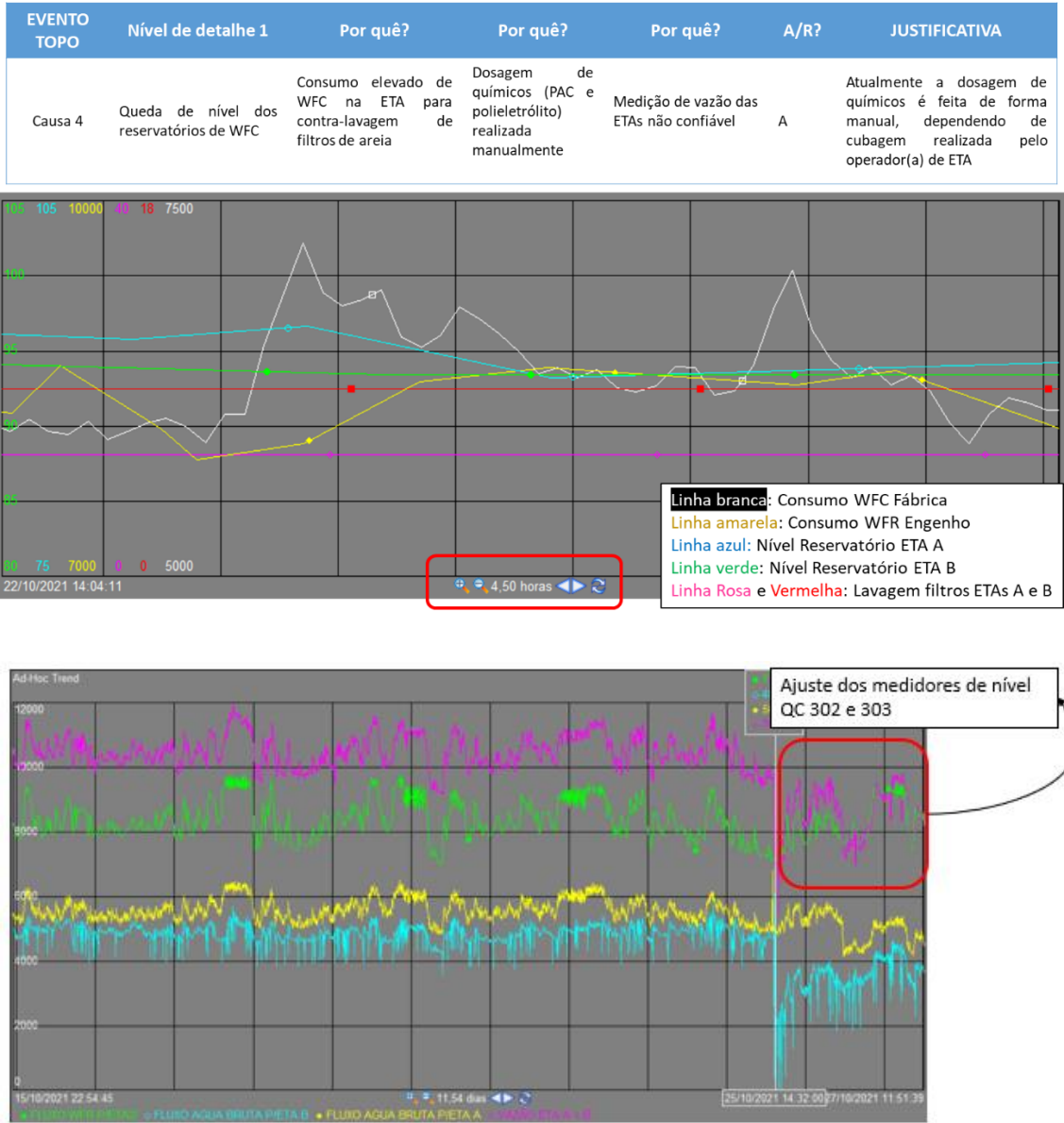
Fonte: Autores (2023).

Para superar essa deficiência, é essencial implementar sistemas de medição mais precisos e abrangentes, garantindo que todas as áreas consumidoras sejam monitoradas em tempo real. Essa ação permitirá um gerenciamento mais efetivo do consumo de água, além de possibilitar ajustes operacionais rápidos e reduzir o impacto no balanço hídrico da ETA. A priorização dessas melhorias é fundamental para assegurar a estabilidade e eficiência do sistema de tratamento e distribuição de WFC.

A causa 4 aborda o consumo elevado de WFC nas ETAs devido à contralavagem dos filtros de areia, destacando a dosagem manual de químicos (PAC e polieletrólito) como um fator crítico. A falta de precisão na medição de vazão das ETAs compromete o controle da dosagem, resultando em ajustes inadequados e ineficiências no processo de tratamento. A dependência de medições manuais aumenta a margem de

erro e reduz a confiabilidade do sistema, impactando diretamente os níveis dos reservatórios.

Figura 8 - Causa 4



Fonte: Autores (2023).

Os gráficos apresentados reforçam a necessidade de ajustes nos medidores de nível (como QC 302 e 303) para melhorar a precisão e prever variações. As inconsistências nos dados de consumo e nos níveis dos reservatórios destacam a urgência de implementar sistemas automatizados para dosagem de químicos e medição de vazão. Tais ações são fundamentais para estabilizar os processos de contralavagem e otimizar o uso de recursos.

A justificativa aponta que a dosagem manual e as medições imprecisas são obstáculos para a eficiência operacional das ETAs. A modernização dos sistemas de controle e a automação da dosagem de químicos permitirão maior precisão e previsibilidade, reduzindo o impacto sobre os reservatórios e garantindo a continuidade das operações industriais.

A causa 5 aponta a falta de uma frequência bem definida para a realização de testes de jarros (Jar Test) na ETA, sendo atualmente executados apenas sob demanda, como evidenciado nas análises realizadas durante as ocorrências de 26/09 e 10/10. Essa falta de regularidade nas análises compromete o monitoramento contínuo das mudanças na qualidade da água (MQA), dificultando a identificação e a resposta antecipada a alterações nas características físico-químicas da água captada, especialmente em momentos críticos, como durante períodos de chuvas intensas.

Figura 9 - Causa 5.

EVENTO TOPO	Nível de detalhe 1	Por quê?	Por quê?	Por quê?	A/R?	JUSTIFICATIVA
Causa 5	Queda de nível dos reservatórios de WFC	Consumo elevado de WFC na ETA para contra lavagem de filtros de areia	Monitoramento das mudanças na qualidade da água MQA	Teste de jarros é feito com frequência MQA	A	Atualmente, não temos uma frequência bem definida de Jar Test pela operação

JAR-TEST	
Data : 30/09/2021	Turno: 16x00
Executante: 	
Teste : Variando PAC	

JAR-TEST	
Data : 20/10/2021	Turno: 16x00
Executante: 	
Teste : Variando PAC	

Jar-Test realizados sob demanda. Últimas análises realizadas devido ocorrências dos dias 26/09 e 10/10

Fonte: Suzano (2021).

A ausência de uma rotina estabelecida para o Jar Test também expõe a necessidade de reciclagem da equipe responsável, já que um treinamento adequado poderia melhorar o controle do processo e garantir ajustes mais precisos na dosagem de químicos, como PAC e polieletrólito. A justificativa reforça a importância de integrar os testes como parte de um plano operacional preventivo, permitindo maior previsibilidade no tratamento da água.

Implementar uma periodicidade fixa para os Jar Tests, alinhada a um programa de capacitação contínuo, pode aumentar a eficiência do sistema de tratamento e reduzir o consumo excessivo de WFC em contralavagens. Essa abordagem preventiva trará maior estabilidade operacional, especialmente em cenários de variação brusca da qualidade da água captada.

A análise da causa 6 evidencia dificuldades operacionais relacionadas à dosagem de químicos, como PAC e polieletrólito, utilizados na contralavagem dos filtros de areia. A dosagem manual, somada ao dimensionamento inadequado das bombas de dosagem, compromete a precisão e a eficiência do processo. Especificamente, a válvula de sucção da bomba 860 de PAC na ETA A apresenta um problema crítico: está travada, não conseguindo abrir ou fechar totalmente, o que falsifica o cálculo de cubagem e impacta diretamente o controle da dosagem.

Figura 10 - Causa 6.

EVENTO TOPO	Nível de detalhe 1	Por quê?	Por quê?	Por quê?	A/R?	JUSTIFICATIVA
Causa 6	Queda de nível dos reservatórios de WFC	Consumo elevado de WFC na ETA para contra-lavagem dos filtros de areia	Dosagem de químicos (PAC e polieletrólito) realizada manualmente	Dimensionamento das bombas de dosagem de químicos inadequado	A	Para baixas dosagens de PAC, a bomba não consegue operar de forma contínua



Fonte: Autores (2024).

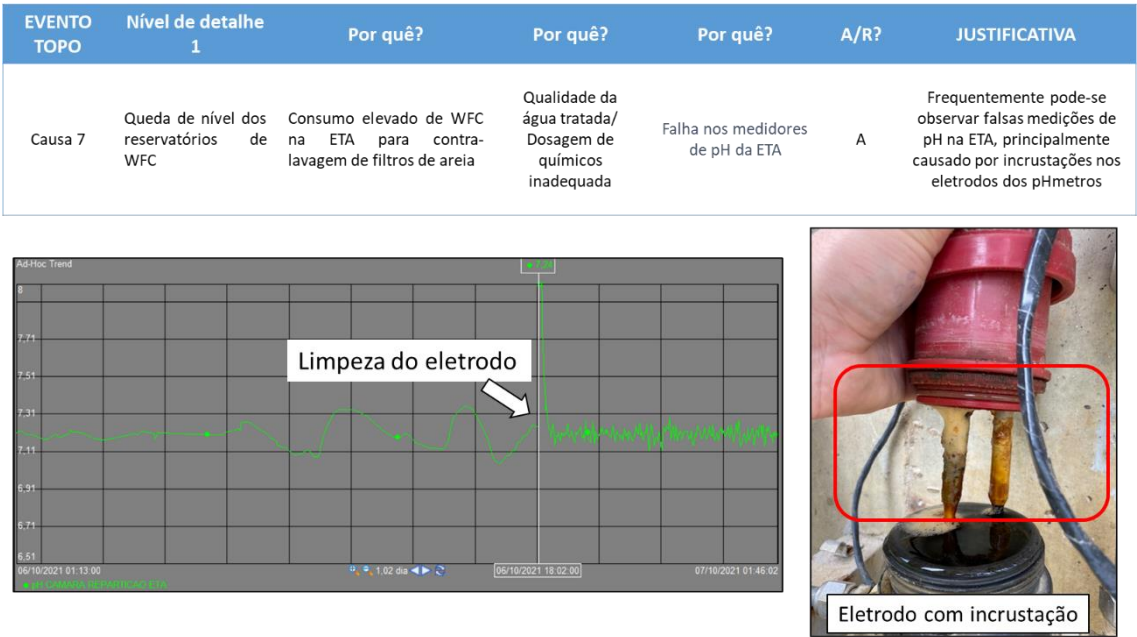
Esses fatores resultam em desafios para operar com baixas concentrações de PAC, afetando a qualidade do tratamento e contribuindo para o consumo elevado de WFC. A falta de automatização nesse processo aumenta a vulnerabilidade a erros e reduz

a capacidade de ajuste rápido diante de mudanças operacionais ou de qualidade da água captada.

A justificativa reforça a necessidade de substituir ou reparar os componentes defeituosos e implementar um sistema automatizado de dosagem contínua para melhorar a precisão e a eficiência do processo. Além disso, a revisão do dimensionamento das bombas e a capacitação da equipe operacional são essenciais para garantir que os equipamentos funcionem dentro dos parâmetros projetados, minimizando os impactos negativos sobre os níveis dos reservatórios e a operação geral das ETAs.

A causa 7 destaca a necessidade frequente de limpeza nos eletrodos dos pHmetros da ETA, evidenciando uma falha crítica no controle de qualidade da água tratada. O pH, sendo um parâmetro essencial para o controle do processo, sofre com leituras imprecisas devido à incrustação nos eletrodos. Essa condição compromete a dosagem adequada de químicos, como PAC e polieletrólito, resultando em ineficiências no tratamento de água e contribuindo para o consumo elevado de WFC durante as contra lavagens.

Figura 11 - Causa 7.



Fonte: Autores (2023).

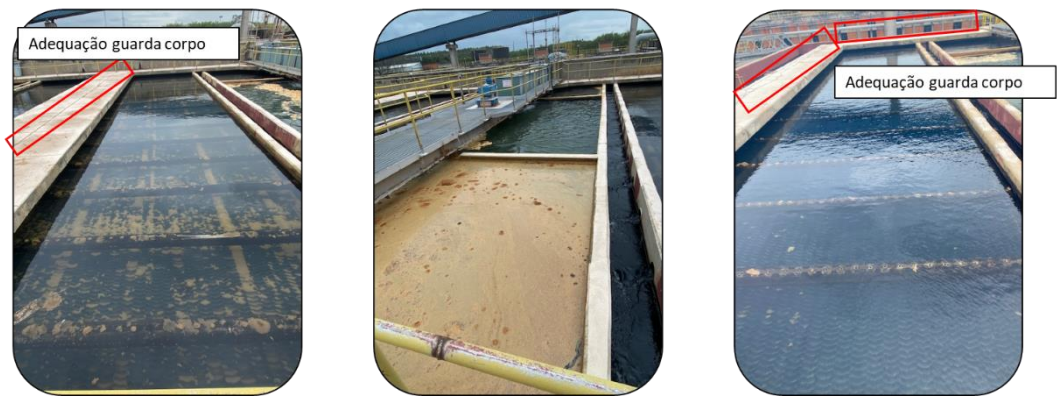
O gráfico apresentado reforça a variabilidade das medições de pH, indicando que o problema impacta diretamente a estabilidade dos processos operacionais. A justificativa aponta que o plano de manutenção preventiva dos pHmetros é insuficiente para mitigar as recorrentes falhas, sugerindo a necessidade de revisões para incluir procedimentos mais robustos de limpeza e calibração.

Para solucionar o problema, é essencial implementar um programa de manutenção preventiva mais eficaz, que inclua a substituição de eletrodos desgastados, a adoção de tecnologias mais resistentes à incrustação e o treinamento da equipe operacional para monitorar e corrigir desvios de forma proativa. Tais medidas garantirão medições mais confiáveis, permitindo ajustes precisos na dosagem de químicos e contribuindo para a eficiência do sistema de tratamento de água.

A causa 8 destaca o impacto do acúmulo excessivo de sujeiras nas colmeias dos clarificadores e do clarifloculador da ETA "A", ocasionado pela falta de uma rotina de limpeza efetiva. Esse acúmulo compromete a eficiência do sistema de clarificação, resultando em aumento do consumo de WFC para contralavagem dos filtros de areia, agravando os níveis dos reservatórios.

Figura 12 - Causa 8.

EVENTO TOPO	Nível de detalhe 1	Por quê?	Por quê?	Por quê?	A/R?	JUSTIFICATIVA
Causa 8	Queda de nível dos reservatórios de WFC	Consumo elevado de WFC na ETA para contra lavagem de filtros de areia	Acúmulo excessivo de sujeira nas colmeias dos clarificadores ETA "A"	Falta rotina de limpeza efetiva das colmeias dos clarificadores e clarificador ETA "A"	A	Falta procedimentação e condições mais seguras para efetuar a limpeza das colmeias



Fonte: Autores (2024).

A ausência de procedimento claro e de condições seguras para a limpeza das colmeias foi identificada como uma das principais barreiras para a resolução do problema. As imagens evidenciam a necessidade de adequação, como a instalação de guarda-corpo, para garantir a segurança das equipes durante as atividades de manutenção e permitir uma limpeza mais frequente e eficaz.

A justificativa reforça que melhorias na estrutura física e na elaboração de procedimentos operacionais são essenciais para mitigar os impactos dessa causa. A implementação de rotinas de limpeza preventivas, associadas à capacitação da equipe e ao uso de equipamentos adequados, contribuirá para aumentar a eficiência dos clarificadores, reduzindo o consumo de água e estabilizando os níveis dos reservatórios de WFC.

A análise da causa 9 destaca problemas críticos relacionados às pendências de manutenção nos filtros de areia da ETA "A", que resultam em elevado consumo de WFC para contralavagem, especialmente em momentos de alta demanda. Entre as falhas identificadas estão bicos de torniquete obstruídos, válvulas de alimentação de filtro com passagem indevida e deficiência na limpeza das tubulações. Essas condições comprometem a eficiência dos filtros, aumentando a frequência de lavagens e, conseqüentemente, o consumo de água tratada.

Figura 13 - Causa 9.

EVENTO TOPO	Nível de detalhe 1	Por quê?	Por quê?	Por quê?	A/R?	JUSTIFICATIVA
Causa 9	Queda de nível dos reservatórios de WFC	Consumo elevado de WFC na ETA para contra-lavagem de filtros de areia (principalmente no momento da ocorrência)	Baixa eficiência dos filtros de areia	Plano preventivo de manutenção dos filtros de areia defasado. Existem diversas pendências de manutenção	A	Identificado vários pontos de fragilidade nos filtros de areia, principalmente da ETA B



Fonte: Autores (2023).

A inoperância de três filtros de areia na ETA B (filtros 08, 17 e 19), devido a atividades de manutenção e engenharia, representa uma redução significativa de 20% na área total de filtração. Essa situação impacta diretamente a eficiência do sistema, sobrecarregando os filtros restantes e resultando em um aumento no número de retrolavagens necessárias para manter a operação. Além disso, condições inadequadas de componentes como sifões, obturadores e flutuadores agravam a perda de capacidade operacional.

Essa redução na capacidade de filtração não apenas eleva o consumo de WFC para retrolavagens, mas também compromete a estabilidade do sistema e aumenta o risco de falhas em momentos de alta demanda. A priorização da manutenção dos filtros inoperantes e a revisão de procedimentos preventivos são essenciais para restaurar a capacidade total de filtração e minimizar impactos no consumo de água e na operação geral da ETA.

A justificativa reforça que essas pendências são resultado de um plano preventivo de manutenção defasado, com fragilidades em diversos pontos do sistema. A falta de

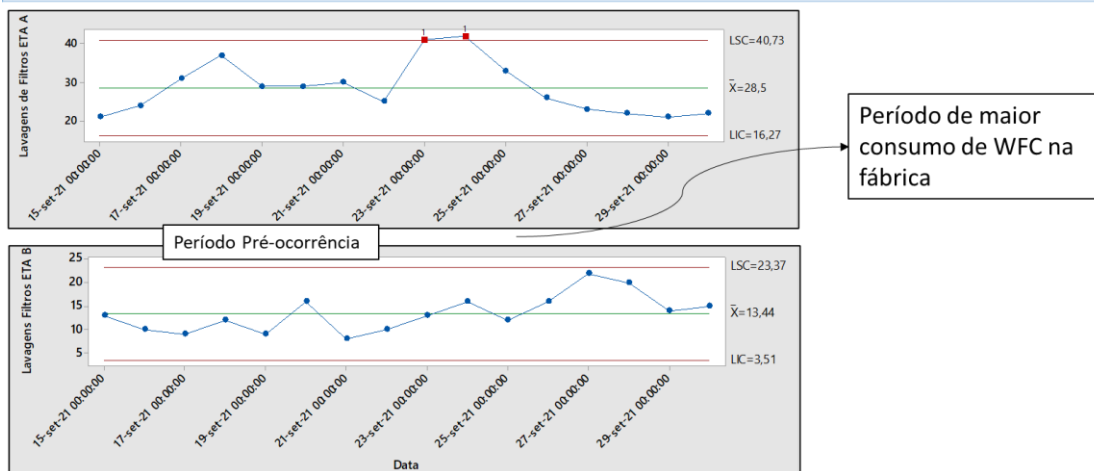
ações corretivas oportunas agrava o impacto operacional, comprometendo o equilíbrio entre consumo e reposição de água nos reservatórios. Para mitigar o problema, é essencial priorizar a revisão do plano de manutenção, incluindo a substituição de componentes defeituosos e a limpeza adequada dos filtros. Além disso, melhorias no monitoramento e na operação dos filtros podem reduzir o consumo excessivo e aumentar a confiabilidade do sistema.

A análise da causa 10 destaca o consumo elevado de WFC para contralavagem dos filtros de areia na ETA como um fator crítico que contribuiu para a queda nos níveis dos reservatórios. O gráfico evidencia que, durante o período pré-ocorrência, houve uma falta de lavagens regulares nos filtros, resultando em acúmulo de material particulado e comprometendo a eficiência dos mesmos. Essa falta de manutenção preventiva aumentou a demanda por água tratada durante a ocorrência, agravando ainda mais o consumo no momento crítico.

Embora a justificativa indique que não foi identificada uma causalidade direta entre a ausência de lavagens prévias e a queda dos níveis, é evidente que a falta de regularidade nas contralavagens criou condições desfavoráveis para a operação eficiente da ETA. O período de maior consumo de WFC na fábrica, registrado durante o evento, exacerbou o impacto dessa deficiência, resultando na incapacidade de atender às demandas do sistema.

Figura 14 - Causa 10.

EVEN TOPO	Nível de detalhe 1	Por quê?	Por quê?	Por quê?	A/R?	JUSTIFICATIVA
Causa 10	Queda de nível dos reservatórios de WFC	Consumo elevado de WFC na ETA para contra-lavagem de filtros de areia (principalmente no momento da ocorrência)	Falta de lavagem nos filtros de areia no período pré ocorrência		R	Não foi identificado causalidade entre lavagens de filtros de areia antes da ocorrência e a queda de dos níveis de WFC



Fonte: Autores (2023).

A causa 11 destaca que o consumo elevado de WFC na ETA para contralavagem dos filtros de areia foi agravado por uma dosagem inadequada de químicos, como o PAC, em função de alterações na qualidade da água captada no engenho. O gráfico e os resultados do Jar Test realizados evidenciam que, durante o segundo evento analisado, a dosagem de PAC estava subestimada, o que comprometeu a eficiência no tratamento da água e gerou maior demanda por contralavagem.

Figura 15 - Causa 11.

EVENTO TOPO	Nível de detalhe 1	Por quê?	Por quê?	Por quê?	A/R?	JUSTIFICATIVA
Causa 11	Queda de nível dos reservatórios de WFC	Consumo elevado de WFC na ETA para contra lavagem de filtros de areia	Dosagem de químicos inadequada	Alteração na qualidade da água no engenho	A	No segundo evento foi evidenciado através de Jar Test que a dosagem de PAC estava subestimada

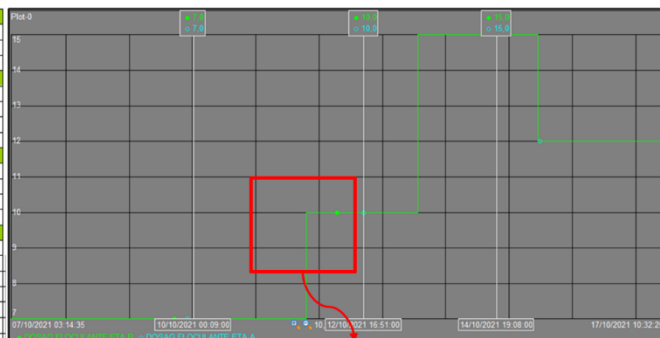
JAR-TEST						
Data : 11/10/2021				Turno: 16x00		
Executante: B						
Teste : Variando PAC						
Dados da WFR da Camara de Repartição						
pH inicial	7,21					
Turbidez	4,11					
Cor	50,71					
Alcalinidade	8,7					
Instruções						
1ª Etapa -	2 minuto – agitação rápida					
2ª Etapa	15 minutos – agitação lenta					
3ª Etapa	30 minutos – decantação					
4ª Etapa	Efetuar análises					
Jarro	1	2	3	4	5	6
PAC (ppm)	8	10	12	14	16	18
Pdli (ppm)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
pH inicial	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
Cor final	40	25	15	10	10	10
Turbidez final	2,59	2,98	3,8	1,52	1,41	1,57
pH final	7,12	7,0	6,83	6,72	6,55	6,38

Jarros 1, 2 e 3 apresentaram flocos bem formados porém pequenos, com decantação prejudicada.

Jarros 4, 5 e 6 apresentaram flocos também bem formados de tamanho maior e com boa decantação

Jarro 5 foi o que apresentou melhor decantação para o tempo de 30 minutos.

Jarros 1, 2 e 3 apresentaram flocos bem formados porém pequenos, com decantação prejudicada.
Jarros 4, 5 e 6 apresentaram flocos também bem formados de tamanho maior e com boa decantação
Jarro 5 foi o que apresentou melhor decantação para o tempo de 30 minutos.



Nesse ponto, a dosagem de PAC marcava 10 ppm.
Dosagem inferior a ideal.

Fonte: Suzano (2021).

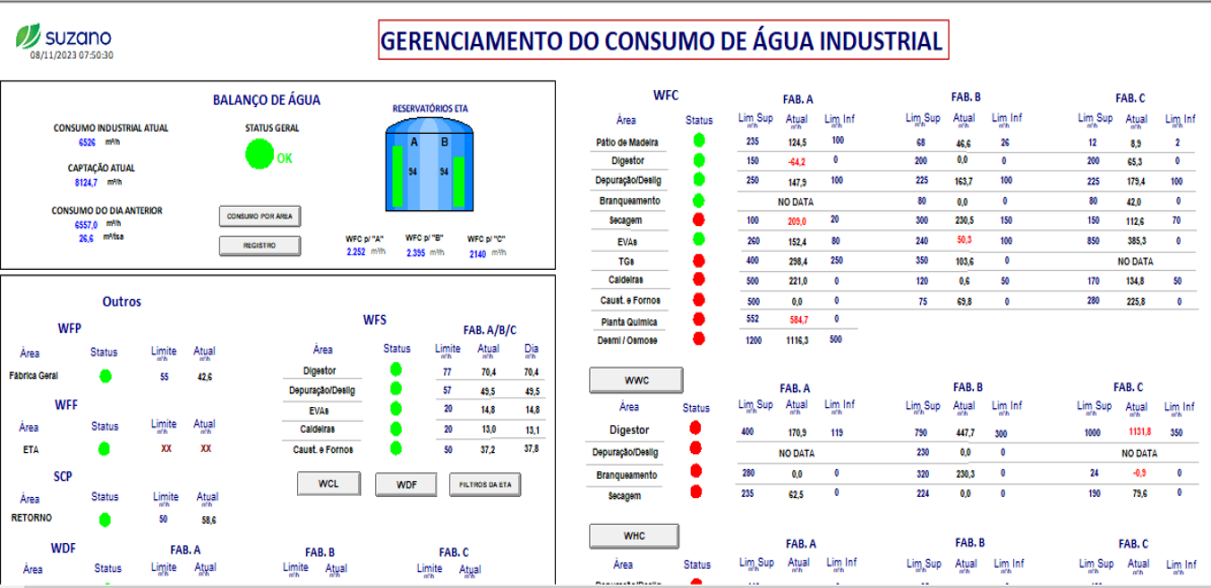
Os dados apresentados no Jar Test mostram que a subdosagem resultou em flocos menores e sedimentação insuficiente, prejudicando a remoção de impurezas e sobrecarregando o sistema de filtração. Esse problema foi associado à falta de ajustes adequados às condições variáveis da água captada, reforçando a necessidade de um monitoramento contínuo da qualidade da água e de protocolos operacionais que respondam rapidamente às mudanças.

A justificativa enfatiza que a implementação de um programa mais robusto de Jar Tests, com frequência definida e ajustes automáticos na dosagem de químicos, é essencial para melhorar a eficiência do sistema e reduzir o consumo de WFC. Além disso, o treinamento da equipe para interpretar os resultados dos testes e ajustar as operações de forma proativa contribuirá para a estabilidade dos processos e a mitigação de problemas futuros.

Então, a partir dos problemas levantados pelas análises realizadas, algumas ações começaram a surgir como correção. Uma dessas ações realizadas foi decorrente da causa 2 - Falta método de gerenciamento do consumo de água mais efetivo. Onde a ausência de monitoramento detalhado e contínuo do consumo em diferentes áreas da fábrica ocasionou um retardo no tempo de ação afim de reduzir o consumo no local correto. Portanto, foram revisitadas as diretrizes para consumo de água na fábrica

com intuito de definir gatilhos com relação ao nível do reservatório e então, foi possível remodelar a tela de gerenciamento de modo que fosse, de fato, utilizada pela área industriais. Isso permitiu que pudesse ser gerenciado não só o consumo de água da fábrica mas que pudesse se ter um balanço desse consumo em tempo real, além da informação em relação ao nível dos reservatórios (Figura 17).

Figura 16 - Tela de Gerenciamento atualizada



Fonte: Resultado da pesquisa (2023).

Com a implementação da nova tela de gerenciamento, observamos uma expressiva diminuição desse indicador (Tabela 2). As áreas foram orientadas ao novo limite de consumo estabelecido, resultando em uma redução média de mais de 400 m³/h por dia. Além disso, a taxa de consumidores não medidos caiu de 40% para cerca de 27%, representando uma redução de mais de 10% nesse indicador. Esses resultados demonstram a eficácia das ações corretivas implementadas e a melhoria no gerenciamento do consumo de água. A nova tela permitiu um monitoramento mais preciso e eficiente, facilitando a identificação de áreas com consumo excessivo e possibilitando intervenções rápidas e eficazes. Com isso, atuamos também na causa 6 - Falta de medição confiável de vazão das áreas consumidoras e ainda conseguimos não apenas reduzir o consumo total de água, mas também aumentar a conscientização sobre a importância do uso sustentável dos recursos hídricos na fábrica.

Tabela 2 - Gestão do Consumo de Água

Indicadores água	WFC (m³/h)		
	Limite	Dia anterior	Mês
Pátio	255	232	226
Digestor	289	0	8
Dep/Desli	145	167	161
Branqueamento	103	244	236
PQ	179	241	220
Secagem	650	624	619
EVAs	640	583	859
CRs	525	465	461
Desmi/Osmose	1060	1093	1093
TGs	460	451	456
Caus/Forn/ETA/ETE	450	801	575
Chentrade	300	47	49
Consumo Total	6886	6640	6816
Não medido	2066	1694	1853
% não medido	30%	26%	27%

Fonte: Autores - Resultado da pesquisa (2024).

Também foram revisitados os planos de calibração dos FTs (instrumentos que medem a vazão) do engenho, ETAs A e B, além da saída de WFC. Esses planos foram incrementados com certificação ISO e houve uma redução no tempo entre as calibrações dos instrumentos. Além disso, a procedimentação dessa ação foi atualizada para garantir maior precisão e eficiência. A certificação ISO assegura que os processos atendam aos padrões internacionais de qualidade, enquanto a diminuição do intervalo entre calibrações melhora a confiabilidade das medições, contribuindo para um controle mais rigoroso e eficaz do consumo de água.

Trabalhando em cima da causa 12, que tratada sobre o monitoramento contínuo da qualidade da água, foi desenvolvido um painel que indica o teor de cloreto em pontos críticos levantados pela equipe técnica bem com a sua variação no tempo comparando com a vazão de captação e da água já tratada (Figura 18). Esses dados nos ajudam na tomada de decisão quanto a otimização da captação deixando o sistema mais estável quanto as variações da qualidade da água além de mitigar o risco de concentração de íons de cloreto que traz malefícios como o aumento de corrosão das linhas metálicas que conectam as áreas e fazem o transporte da água tratada de processo.

Figura 17 - Monitoramento da Qualidade da Água Bruta (WFR).



Fonte: Resultado da pesquisa (2024).

E, esse monitoramento só foi possível devido a instalação de sensores nessas áreas que conectados ao sistema operacional através da Starlink, já algumas dessas áreas eram mais remotas e de difícil acesso a equipe operacional, que trouxe esses dados em tempo real, permitindo assim, uma análise mais robusta facilitando nas tomadas de decisões sobre as manobras operacionais mais adequadas para a situação.

6. CONCLUSÃO

A análise detalhada das causas e efeitos relacionados à queda de nível nos reservatórios de WFC revela uma combinação de fatores operacionais, estruturais e gerenciais que impactaram significativamente a eficiência do sistema e a estabilidade dos processos industriais. Entre os principais pontos identificados, destacam-se o aumento do consumo de WFC devido à contra lavagem excessiva de filtros, a ausência de rotinas eficazes de manutenção preventiva, falhas nos equipamentos de medição, inadequações na dosagem de químicos e a falta de um gerenciamento estruturado do consumo de água.

Os gráficos e dados analisados evidenciaram que a ineficiência nos filtros de areia das ETAs, agravada pela obstrução de componentes e pela ausência de procedimentos regulares de limpeza, gerou um aumento desnecessário no consumo de água. O dimensionamento inadequado de equipamentos e a dependência de dosagens manuais de químicos como PAC e polieletrólito contribuíram para perdas significativas de eficiência no tratamento de água. Além disso, a falta de um sistema de monitoramento em tempo real e de medições precisas dificultou a identificação e a resolução antecipada de problemas, aumentando a vulnerabilidade do sistema a alterações na qualidade da água captada mas que puderam ser corrigidas pela implementação de um novo painel contendo as informações mais relevantes para o processo, além de uma visão geral de todos os pontos consumidores industriais.

Outro ponto crítico foi a ausência de um programa regular e bem estruturado de Jar Tests, que deixou a operação suscetível a dosagens subestimadas de químicos em momentos de variação das características da água captada, especialmente durante eventos climáticos adversos. Isso resultou em falhas no tratamento e sobrecarga dos processos de filtração.

A solução para esses problemas passa pela implementação de um plano integrado de ações corretivas e preventivas. Esse plano deve incluir a modernização dos equipamentos de medição e dosagem, a automação de processos críticos, a capacitação contínua da equipe e a definição de rotinas regulares de manutenção e monitoramento. A introdução de sistemas avançados de controle e monitoramento

implementadas está permitindo maior previsibilidade e precisão nas operações, reduzindo o impacto de variações no consumo e melhorando quanto a eficiência do sistema.

Conclui-se que, para evitar recorrências e garantir a estabilidade dos níveis dos reservatórios de WFC, é indispensável adotar uma abordagem proativa e integrada. Essa estratégia não apenas resolverá os problemas existentes, mas também fortalecerá a resiliência operacional, promovendo maior confiabilidade e sustentabilidade nas operações industriais.

O estudo caracteriza-se como pesquisa-ação, em que o pesquisador utiliza a observação e a intervenção no processo analisado, contribuindo diretamente com ações para solucionar problemas. Dessa forma, o trabalho demonstrou que, para otimizar indicadores no setor de consumo e apontar oportunidades de melhoria, a filosofia Lean é viável. Identificando os prováveis problemas na gestão hídrica da empresa, foi possível aplicar ferramentas como o Diagrama de Ishikawa, FTA (Análise de Árvore de Falhas), FCA (Plano de Ação) e 5 PORQUÊS, resultando na identificação dos pontos possíveis de serem otimizados para redução no impacto da queda de nível do reservatório de água fresca.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5462:

Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994. 37p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12217: Projeto de sistemas de abastecimento de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BARBOSA, M.; FONSECA, J. **Qualidade Total: Ferramentas e Métodos**. Revista de Engenharia de Produção, v. 18, n. 3, 2020.

BEZERRA JÚNIOR, Luis Fernando Ker. **Estudo do Sistema de Tratamentos de Falhas para auxiliar na análise e detecção de falhas das perfuratrizes de uma empresa do setor de mineração**. 2019. 91f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

CARSON, R. **Silent Spring**. Boston: Houghton Mifflin, 1962.

CASTRO, A. M.; SILVA, L. P.; MENEZES, F. R. **Gestão de recursos hídricos em indústrias de grande porte**. Revista Brasileira de Engenharia Ambiental, v. 12, n. 2, p. 25-40, 2018.

DIAS, M. et al. **Ferramentas de Qualidade: Aplicação em Indústrias**. Revista de Administração Industrial, v. 29, n. 1, 2022.

DIAS, R. M.; SOUZA, V. L.; OLIVEIRA, P. J. **Consumo de água na produção de papel: estudo de caso em indústrias de celulose**. Engenharia de Processos Industriais, v. 9, n. 1, p. 101-115, 2017.

DOCKHORN, T. **Water Management in Industry: Principles and Practices**. Cham: Springer, 2019.

FEIGENBAUM, A. **Total Quality Control**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

FERREIRA, R. T.; ALMEIDA, C. A. **Automação e monitoramento de sistemas hídricos industriais**. Revista de Engenharia Aplicada, v. 7, n. 4, p. 32-47, 2021. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2007, 32p.

GARCIA, F.; OLIVEIRA, P. **Práticas de Qualidade e Melhoria Contínua**. Revista de Gestão Industrial, v. 7, n. 3, 2019.

HINES, P.; FROST, D. **Towards a New Model of Lean: The Lean Transformation Framework**. International Journal of Lean Six Sigma. 2020.

ISHIKAWA, K. **What is Total Quality Control? The Japanese Way**. New Jersey: Prentice Hall, 1986.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção - Função Estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2013. 440p.

LEITE, R. et al. **Ferramentas de Gestão da Qualidade**. Revista Brasileira de Qualidade, v. 22, n. 1, 2021.

LIKER, J. K. **The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer**. McGraw-Hill, 2004.

LOPES, G. A.; MARTINS, F. H.; BARROS, D. S. **Sustentabilidade e gestão de recursos hídricos nas indústrias de celulose**. Gestão e Sustentabilidade Industrial, v. 15, n. 3, p. 58-73, 2019.

LOYOLA, V. V; XAVIER, T. P. **Análise de Modo e Efeitos de Falha: Um Estudo Bibliométrico na Base Web of Science**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, 2020.

MACHADO, J. P.; MENDES, R. B.; SOUSA, P. C. **Influência de fatores climáticos no abastecimento de água industrial**. Revista de Gestão Ambiental, v. 10, n. 5, p. 89-105, 2022.

MENDES, L. F.; SILVA, A. R.; COSTA, E. S. **Monitoramento preditivo de falhas em sistemas de água industrial**. Engenharia de Manutenção, v. 5, n. 3, p. 77-90, 2019.

MONTGOMERY, D. **Introduction to Statistical Quality Control**. 8. ed. New York: Wiley, 2018.

MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. **Introdução à Gestão da Manutenção**.

MOTOROLA. **Six Sigma: A Business Strategy for the 21st Century**. Motorola, 1986.

OHNO, T. **Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production**. Portland: Productivity Press, 1988.

OLIVEIRA, L.; MENEZES, C. **Sustentabilidade e Gestão Hídrica**. Revista de Recursos Naturais. 2021.

PANDYA, S. **Lean Six Sigma: A Practical Guide to Continuous Improvement**. 2018.

SANTOS, L. O; SANTOS, M. F. S; CASTRO, J. P. P; SOUZA, W. S; CARDOSO, J. P. **Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA): Uma Avaliação das Publicações em Periódicos Nacionais e Internacionais**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, 2016.

SANTOS, M. F. **Manutenção preditiva em reservatórios industriais: estudo de caso**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 8, n. 1, p. 55-70, 2016.

SANTOS, R. A. **Estudo de caso: Análise de falhas em sistema de recirculação de pasta branqueada**. Instituto Federal do Espírito Santo, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/3962>. Acesso em: 17 jun. 2024.

SOUZA, F. J.; LIMA, T. P. **Impactos ambientais e gestão de efluentes em indústrias de papel e celulose**. Revista de Ciências Ambientais, v. 13, n. 2, p. 45-61, 2020.

SMOOK, G. A. **Handbook for Pulp and Paper Technologists**. 3rd ed. TAPPI Press.

XENOS, D. **Sustainable Water Management in Industry: Frameworks and Applications**. Hoboken: Wiley, 2014.

ZARPELAM, J. B; SILVA, M. P. **Aplicação de Matriz GUT na Priorização de Tarefas no Setor Financeiro de uma Empresa de Bebidas**. Revista de Gestão e Projetos, 2020.

YAMANE, T.; SOUZA, J. R. A. **Análise de falhas em sistemas de produção de papel e celulose**. Revista Brasileira de Engenharia de Produção, v. 8, n. 2, p. 112-123, 2007.