UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÍTALO FERNANDO BRITO DA SILVA

APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DA QUALIDADE E METODOLOGIA *SIX SIGMA* EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DO ESTADO DE ALAGOAS

Maceió - AL
2024

ÍTALO FERNANDO BRITO DA SILVA

APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DA QUALIDADE E METODOLOGIA *SIX SIGMA* EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DO ESTADO DE ALAGOAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Albanise Enide da Silva.

Coorientadora: Profa. Dra. Vânia de Lourdes das Graças Teles.

Maceió - AL
2024

Catalogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S586a Silva, Ítalo Fernando Brito da.

Aplicação e ferramentas da qualidade e metodologia *SIX* sigma em uma estação de tratamento de efluentes do estado de Alagoas / Ítalo Fernando Brito da Silva. – 2024.

45 f. il. : figs. ; tabs. color.

Orientadora: Albanise Enide da Silva.

Co-orientadora: Vânia de Lourdes das Graças Teles.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química). Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 43-44.

Apêndices: f. 45.

1. Melhoria contínua (Prática administrativa). 2. Efluentes. 3. Gestão de qualidade. 4. Sustentabilidade. I. Título.

CDU:66.0:351.777.61(813.5)

RESUMO

Este trabalho tem como foco a aplicação das ferramentas da qualidade como metodologias para a avaliação das não conformidades e melhoria contínua de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) localizada no estado de Alagoas. O trabalho destaca a importância crescente da sustentabilidade e da gestão eficaz das ETEs no contexto atual. A DMAIC, um componente central do *Six Sigma*, foi aplicada para melhorar a estabilidade e a eficiência dos processos de tratamento de efluentes domésticos, cujas fases - Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar foram avaliadas pontualmente na otimização dos processos. Neste sentido, para a análise da estrutura da ETE e a medição dos fatores de desempenho aplicadas as ferramentas: Diagrama de Pareto, Gráfico de Controle, Matriz GUT, 5S e Folha de Verificação. Este trabalho de conclusão de curso enfatiza que a aplicação do *Six Sigma* na ETE estudada permitiu um estudo detalhado de sua operação, identificando várias oportunidades de melhoria. A utilização das ferramentas de qualidade se mostrou essencial para que as etapas do DMAIC pudessem ser avaliadas na Matriz GUT onde foram elencados as não conformidades, nesta ordem de prioridade: extravasamentos, corrosão nos equipamentos, excesso de espuma no efluente tratado, controle de odor e legalidade ambiental. Aplicando as ferramentas da qualidade dentro da Metodologia DMAIC foi possível apontar as causas raízes e seus efeitos, possibilitando a identificação ações e soluções com foco na melhoria contínua, tais como: treinamentos e desenvolvimentos com os colaboradores, manutenções preventivas e corretivas dos equipamentos, controle estatístico da eficiência do processo (DBO) e importância de adoção na rotina de operação da ETE. Quanto ao extravasamento, que apresentou maior prioridade quanto a gravidade, urgência e tendência e afeta diretamente as não conformidades supracitadas, os resultados apresentaram a necessidade de controle da estabilidade do processo em tempo real, adotando ferramentas básicas da qualidade. As soluções propostas podem ser implementadas e avaliadas usando indicadores de desempenho e métricas de qualidade. Embora a implementação do *Six Sigma* exija um investimento inicial significativo em treinamento e desenvolvimento de habilidades, os benefícios a longo prazo, como redução de custos, melhoria da qualidade e sustentabilidade ambiental, são considerados superiores aos custos iniciais. Em suma, este trabalho apresenta o *Six Sigma* como uma estratégia valiosa para as ETEs que buscam melhorar suas operações e minimizar seu impacto ambiental.

Palavras-Chave: Melhoria contínua. Efluentes. Qualidade. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This work focuses on the application of quality tools as methodologies for the evaluation of non-conformities and continuous improvement of a Wastewater Treatment Plant (WWTP) located in the state of Alagoas. The work highlights the increasing importance of sustainability and effective management of WWTPs in the current context. DMAIC, a central component of Six Sigma, was applied to improve the stability and efficiency of domestic wastewater treatment processes, whose phases - Define, Measure, Analyze, Improve and Control were punctually evaluated in the optimization of processes. In this sense, for the analysis of the WWTP structure and the measurement of performance factors, the tools were applied: Pareto Diagram, Control Chart, GUT Matrix, 5S and Verification Sheet. This final course work emphasizes that the application of Six Sigma in the studied WWTP allowed a detailed study of its operation, identifying several opportunities for improvement. The use of quality tools proved essential for the stages of DMAIC to be evaluated in the GUT Matrix where non-conformities were listed, in this order of priority: overflows, corrosion in equipment, excess foam in the treated effluent, odor control and environmental legality. Applying the quality tools within the DMAIC Methodology it was possible to point out the root causes and their effects, enabling the identification of actions and solutions focused on continuous improvement, such as: training and developments with employees, preventive and corrective maintenance of equipment, statistical control of process efficiency (BOD) and importance of adoption in the WWTP operation routine. As for the overflow, which presented greater priority in terms of gravity, urgency and tendency and directly affects the aforementioned non-conformities, the results showed the need for real-time process stability control, adopting basic quality tools. The proposed solutions can be implemented and evaluated using performance indicators and quality metrics. Although the implementation of Six Sigma requires a significant initial investment in training and skill development, the long-term benefits, such as cost reduction, quality improvement and environmental sustainability, are considered superior to initial costs. In short, this work presents Six Sigma as a valuable strategy for WWTPs seeking to improve their operations and minimize their environmental impact.

Keywords: Continuous improvement. Effluents. Quality. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Modelo Ilustrativo de uma ETE _____ 12
Figura 2: Fluxograma da ETE estudada _____ 19
Figura 3: Gradeamento grosso e fino: etapa inicial do processo de tratamento de esgotos onde os resíduos maiores e menores são retidos _____ 22
Figura 4: Caixa de retenção de areia onde permanecem os sólidos flutuantes _____ 23
Figura 5: Da caixa de areia os sólidos flutuantes seguem para os leitos de secagem _____ 23
Figura 6: Reatores UASB da ETE _____ 25
Figura 7: Caixa de passagem da ETE e de passagem dos efluentes de lavagem de fundo dos reatores _____ 26
Figura 8: Evidências de extravasamento. a) pré-tratamento b) leito de secagem c) leitos de secagem e área externa. _____ 30
Figura 9: Gráfico de Controle para a Eficiência da ETE (DBO) _____ 31
Figura 10: Presença de corrosão. a) Painel de controle da EEEB b) Estação Elevatória de Efluente Bruto _____ 32
Figura 11: Presença de espuma no sistema. a) Saída do Filtro Anaeróbio b) Poço úmido - Lançamento de Efluente Tratado _____ 33
Figura 12: Diagrama de Pareto para o local de ocorrência de extravasamentos. _____ 34
Figura 13: Causas de Incidentes. _____ 35
Figura 14: Diagrama de Pareto para as causas de Incidentes na ETE. _____ 38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
EEE	Estação Elevatória de Efluentes
DMAIC	*Define, Measure, Analyze, Improve e Control (Definir, Mensurar, Analisar, Melhorar e Controlar).*
KPI	*Key Performance Indicator (Indicador-Chave de Desempenho)*
UASB	*Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reator anaeróbio de fluxo ascendente)*
EEEB	Estação Elevatória de Efluente Bruto
EEET	Estação Elevatória de Efluente Tratado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8

2 OBJETIVOS 10

2.1 Geral 10

2.2 Específicos 10

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 11

3.1 Estação de Tratamento de Efluentes 11

3.2 Legislação Ambiental 14

3.3 Gestão de Qualidade 15

3.3.1 Ferramentas básicas 15

3.3.2 Metodologia *Six sigma* 17

4 METODOLOGIA 19

4.1 População e Amostra 20

4.2 Análise e Tratamento de Dados 20

4.3 Aplicação do Six Sigma 20

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 22

5.1 Definir (Define) 28

5.2 Medir (Measure) 29

5.3 Analisar (Analyze) 35

5.4 Melhorar (*Improve*) 35

5.4.1 Extravasamento 35

5.5 Controle (Control) 40

6 CONCLUSÃO 42

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 43

APÊNDICE A 45

1 INTRODUÇÃO

A cada dia que se passa a preocupação com questões ambientais e a necessidade de garantir a sustentabilidade dos recursos naturais se torna um tema mais relevante, sendo a operação eficiente de estações de tratamento de efluentes um tema de grande ênfase na atualidade. A devida gestão dos processos envolvidos na depuração de águas residuais é essencial para minimizar e/ou mitigar os impactos negativos no meio ambiente e, junto a isso, garantir a conformidade com as regulamentações governamentais.

Dessa forma, a aplicação de métodos estatísticos de qualidade, como o *Six Sigma*, ganha forças como uma abordagem eficaz para otimizar a operação dessas estações, alcançando padrões superiores de desempenho, redução de desperdícios, economia de recursos e aprimoramento contínuo dos processos.

O método *Six Sigma*, desenvolvido inicialmente pelo engenheiro Bill Smith enquanto trabalhava na Motorola na década de 1980, tem sido amplamente adotado em diversos setores industriais e, mais recentemente, tem ganhado espaço nas áreas ambiental e de tratamento de efluentes. Sua abordagem sistemática se baseia na coleta e análise de dados, permitindo identificar as principais fontes de variação nos processos e, consequentemente, melhorar sua estabilidade e eficiência.

Este Trabalho de Conclusão de Curso buscou demonstrar a eficácia do *Six Sigma*, um método estatístico de qualidade, na otimização de estações de tratamento de efluentes. O estudo abordou conceitos de estatística aplicada e a metodologia *Six Sigma*, detalhando suas etapas e integração com a gestão ambiental. Um exemplo prático foi explorado para ilustrar melhorias na eficiência operacional, redução de custos, aumento na qualidade do tratamento e diminuição do impacto ambiental.

É importante ressaltar que o *Six Sigma* é uma metodologia estruturada que se baseia em cinco fases, conhecidas como DMAIC: Definir, Medir, Analisar, Melhorar (Improve, em inglês) e Controlar. Cada fase tem um papel específico na otimização dos processos, com foco na melhoria contínua.

A aplicação do *Six Sigma* em estações de tratamento de efluentes pode envolver a otimização de diversos processos, como a coagulação, a floculação, a sedimentação, a filtração e a desinfecção. Cada um desses processos pode ser analisado e otimizado individualmente, contribuindo para a eficiência geral da estação de tratamento.

Além disso, o *Six Sigma* também enfatiza a importância do envolvimento e do comprometimento da liderança e de toda a equipe no processo de melhoria. A formação de

equipes multifuncionais, compostas por profissionais de diferentes áreas, é uma prática comum na implementação do *Six Sigma*, permitindo uma abordagem mais holística e eficaz na resolução de problemas.

Por fim, vale destacar que a implementação do *Six Sigma* requer um investimento significativo em treinamento e desenvolvimento de habilidades. No entanto, os benefícios a longo prazo, como a redução de custos, a melhoria da qualidade e a sustentabilidade ambiental, tendem a superar os custos iniciais. Portanto, o *Six Sigma* se apresenta como uma estratégia valiosa para as estações de tratamento de efluentes que buscam aprimorar suas operações e minimizar seu impacto ambiental.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar a operação em uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) domésticos, localizada no estado de Alagoas, eliminando gargalos do processo com aplicação das ferramentas de qualidade.

2.2 Específicos

- Analisar a estrutura da ETE e seus respectivos processos para definição de problemas;
- Mensurar os fatores de desempenho da ETE;
- Analisar os dados para adquirir conhecimento sobre relações casuais;
- Utilizar o DMAIC a fim de identificar possíveis alterações estruturais nos níveis operacionais de vários fatores simultaneamente dentro do processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Estação de Tratamento de Efluentes

Estações de tratamento de efluentes (ETE) representam um componente essencial da infraestrutura sanitária moderna, atuando na purificação da água usada, de modo a proteger a saúde humana e o meio ambiente. A ampla diversidade de efluentes - que inclui efluentes domésticos, industriais e agrícolas - requer uma gama igualmente ampla de tecnologias de tratamento (METCALF & EDDY, Inc., 2014).

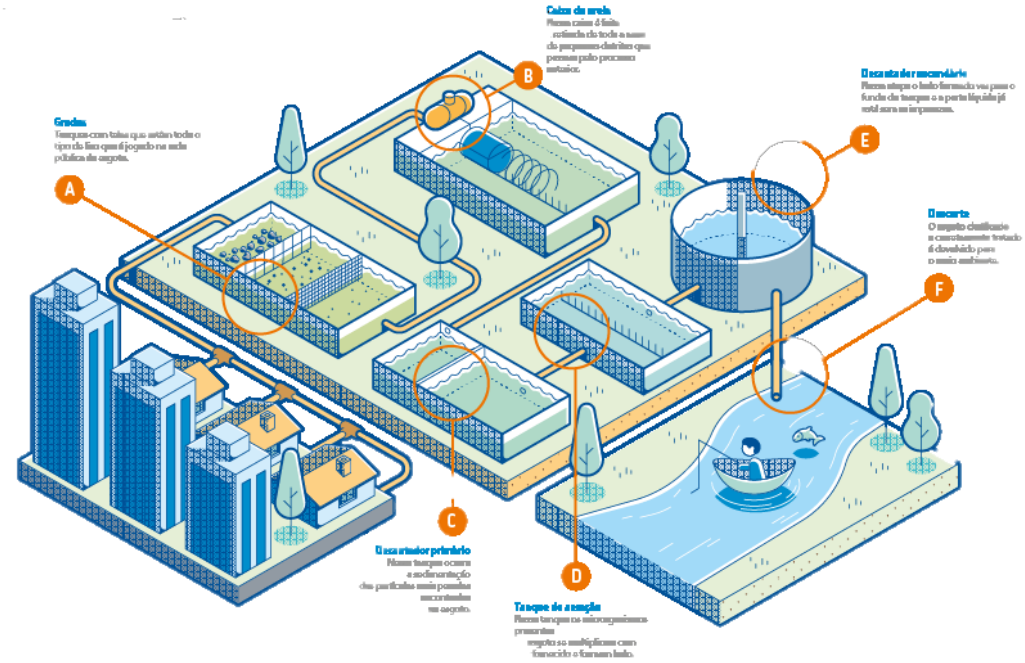
O tratamento de efluentes normalmente envolve uma combinação de processos físicos, químicos e biológicos. Os processos físicos, como a sedimentação e a flotação, são geralmente usados para remover sólidos em suspensão. Os processos químicos, como a precipitação química, podem ser usados para remover poluentes específicos, como fósforo ou metais pesados. Processos biológicos, como a digestão anaeróbica ou os processos de nitrificação/desnitrificação, utilizam micro-organismos para decompor a matéria orgânica e os nutrientes presentes no efluente (METCALF & EDDY, Inc., 2014). Com o foco de atividade bem definido, e pensando em uma estação de tratamento de efluentes com tratamento estritamente anaeróbio, esta ETE utiliza processos que ocorrem na ausência de oxigênio para tratar os efluentes. O tratamento anaeróbio é eficiente na decomposição de matéria orgânica, além de produzir biogás como subproduto, que pode ser reaproveitado como fonte de energia. As etapas do processo podem variar a depender dos parâmetros exigidos para o efluente tratado ou ainda da construção da estação, mas as etapas típicas do processo são:

- **Pré-tratamento:** Esta etapa envolve a remoção de sólidos grosseiros e areia que podem danificar a infraestrutura da estação. Geralmente é feita através de grades e caixas de areia.
- **Tratamento Primário:** Aqui, os sólidos sedimentáveis são removidos por decantação em um tanque. Esses sólidos, chamados de lodo primário, podem então ser encaminhados para o tratamento anaeróbio.
- **Tratamento Anaeróbio:** Nesta etapa, o efluente é colocado em um reator anaeróbio, onde os microrganismos decomporão a matéria orgânica na ausência de oxigênio. Isso ocorre em várias etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Durante estas etapas, os compostos orgânicos são gradualmente decompostos em ácidos orgânicos voláteis, dióxido de carbono e metano. O metano pode ser coletado e usado como uma fonte de energia renovável.

- **Pós-tratamento:** Depois do tratamento anaeróbio, pode haver necessidade de um pós-tratamento para remover nutrientes, como nitrogênio e fósforo, ou patógenos, dependendo dos 7 padrões de qualidade da água a serem atendidos. Este passo pode incluir processos como a precipitação química, filtração, desinfecção, entre outros.

A Figura 1 nos apresenta um modelo ilustrativo de uma Estação de Tratamento de Efluentes que contempla todas as etapas de tratamento mencionadas.

Figura 1: Modelo Ilustrativo de uma ETE



Fonte: Etapas do tratamento de esgoto: você sabe quais são elas? BRK Ambiental, 2024.

A seleção das tecnologias de tratamento apropriadas para um dado efluente depende de suas características específicas. Portanto, a caracterização detalhada do efluente é uma etapa crítica no processo de *design* da estação de tratamento (VON SPERLING, 2007). O *design a*dequado da estação de tratamento também requer a consideração de uma série de outros fatores, incluindo a avaliação do local, considerações econômicas e impactos ambientais potenciais (VESILIND; MORGAN; HEINE, 2010).

No contexto brasileiro, a reutilização de efluentes tratados está ganhando atenção como uma possível solução para a escassez de água. No entanto, a implementação da reutilização de efluentes enfrenta uma série de barreiras, incluindo desafios técnicos, regulatórios e sociais (FONSECA, et al., 2018).

E ainda que haja estudos e tecnologias envolta de todo o processo uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) pode enfrentar vários problemas que afetam sua eficiência e eficácia. Aqui estão alguns dos mais comuns:

Sobrecarga de efluentes: As ETEs são projetadas para lidar com uma determinada quantidade de efluentes. Um aumento súbito ou constante no volume de efluentes pode sobrecarregar a estação, prejudicando sua eficiência (BIOSAN, 2024).

Variações na qualidade do efluente: As ETEs também são projetadas considerando a composição do efluente. Variações na qualidade do efluente, como mudanças na concentração de produtos químicos ou matéria orgânica, podem afetar o processo de tratamento (NEOWATER, 2024).

Falta de manutenção e inspeção: O desgaste natural dos equipamentos pode levar a falhas e reduzir a eficiência do tratamento. A falta de manutenção e inspeção adequadas pode resultar em problemas operacionais significativos (KSE AMBIENTAL, 2024).

Problemas operacionais: Isso pode incluir falha de equipamentos, operação inadequada, erros de medição, entre outros (BIOSAN, 2024).

Problemas de controle de odores: O tratamento de efluentes pode gerar odores desagradáveis, que podem ser um problema, especialmente para ETEs localizadas perto de áreas residenciais (BIOSAN, 2024).

Problemas de lodo: O manuseio e a disposição inadequados do lodo podem levar à contaminação do solo e da água (BIOSAN, 2024).

Problemas de conformidade regulatória: As ETEs devem cumprir várias regulamentações ambientais. A falta de conformidade pode resultar em penalidades legais (BIOSAN, 2024).

Falta de treinamento do pessoal: A operação eficaz de uma ETE requer pessoal devidamente treinado. A falta de treinamento adequado pode resultar em erros operacionais. Falta de financiamento: O tratamento de efluentes é um processo caro. A falta de financiamento adequado pode impedir a manutenção adequada da estação, bem como melhorias e atualizações necessárias (BIOSAN, 2024).

Além disso, a manutenção regular da estação de tratamento é essencial para garantir seu desempenho a longo prazo. Isso inclui a limpeza regular dos tanques e equipamentos, a calibração dos instrumentos de medição e a inspeção e reparo dos sistemas mecânicos e elétricos (METCALF & EDDY, Inc., 2014).

É importante destacar que a eficiência do tratamento de efluentes depende não apenas da seleção das tecnologias de tratamento adequadas, mas também da operação e manutenção

eficazes da estação de tratamento. A operação eficaz de uma estação de tratamento de efluentes requer um monitoramento contínuo dos parâmetros do processo, como o pH, a temperatura, a concentração de oxigênio dissolvido e a concentração de sólidos em suspensão (TCHOBANOGLOUS; BURTON; STENSEL, 2003).

No que diz respeito à reutilização de efluentes tratados, é importante notar que a qualidade da água produzida deve atender aos padrões de qualidade da água estabelecidos pelas autoridades regulatórias. Além disso, a aceitação pública da reutilização de efluentes é um fator crítico para o sucesso de tais iniciativas. Portanto, é essencial implementar estratégias eficazes de comunicação e educação para informar o público sobre os benefícios e a segurança da reutilização de efluentes (JIMÉNEZ; ASPINWALL, 1997).

Além disso, gestão sustentável dos recursos hídricos requer uma abordagem integrada que leve em consideração não apenas as questões técnicas, mas também os aspectos econômicos, sociais e ambientais. Isso inclui a consideração do ciclo de vida completo das estações de tratamento de efluentes, desde o design e a construção até a operação, manutenção e eventual desativação da estação (HELLSTRÖM; JEPPSSON; KÄRRMAN, 2000).

3.2 Legislação Ambiental

A legislação ambiental brasileira é ampla e complexa, abrangendo diversas leis, normas e resoluções que regulamentam a gestão e o tratamento de efluentes. Vamos explorar alguns dos principais aspectos relacionados à Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e às resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que são aplicáveis a uma estação de tratamento de efluentes.

A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), estabelecida pela Lei nº 6.938/81, é um conjunto de diretrizes, princípios e instrumentos que visam à preservação, conservação e uso sustentável dos recursos naturais no Brasil. A PNMA tem como objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no país, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana.

A PNMA estabelece princípios como ação governamental na manutenção do equilíbrio ecológico, racionalização do uso do solo, do subsolo, da água e do ar, planejamento e fiscalização do uso dos recursos ambientais, proteção dos ecossistemas, controle e zoneamento das atividades potencial ou efetivamente poluidoras, incentivos ao estudo e à pesquisa de tecnologias orientadas para o uso racional e a proteção dos recursos ambientais,

acompanhamento do estado da qualidade ambiental, recuperação de áreas degradadas, proteção de áreas ameaçadas de degradação, e educação ambiental a todos os níveis de ensino.

As resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) são instrumentos legais que complementam e detalham a PNMA. As resoluções CONAMA Nº 357/2005, Nº 430/2011 e Nº 377/2006 são exemplos disso.

A Resolução CONAMA Nº 357/2005 dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Já a Resolução CONAMA Nº 430/2011 complementa e altera a Resolução Nº 357/2005, estabelecendo condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores. A Resolução CONAMA Nº 377/2006, por sua vez, dispõe sobre licenciamento ambiental simplificado de Sistemas de Esgotamento Sanitário.

O Marco Legal do Saneamento, Lei Federal nº 14.026 sancionada em julho de 2020, atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 11.445/2007, que trata das diretrizes nacionais para o saneamento básico. O novo marco legal prevê mecanismos para ampliar, em índices próximos a 100%, a rede de fornecimento de água potável e de coleta de esgoto pelo país até 2033. Também estabelece estímulos para a presença do setor privado.

3.3 Gestão de Qualidade

A gestão da qualidade tem sido fundamental para o sucesso organizacional, se trata de uma abordagem estratégica que se concentra na melhoria contínua dos processos, produtos e serviços de uma organização. Ela envolve a identificação e a eliminação de fontes de variação e defeitos que afetam a qualidade e a eficiência dos processos. A gestão da qualidade envolve a coordenação de todas as atividades para manter e melhorar a eficácia e adequação do desempenho organizacional. Esta abordagem se concentra na satisfação do cliente, envolvimento dos funcionários, e melhoria contínua (DALE, 2015).

3.3.1 Ferramentas básicas

As ferramentas de qualidade são técnicas utilizadas para melhorar a eficiência e a eficácia dos processos de negócios. Elas ajudam a identificar, analisar e resolver problemas de qualidade, melhorando assim a satisfação do cliente, a eficiência operacional e a lucratividade do negócio.

Algumas das ferramentas de qualidade mais comuns incluem o Diagrama de Pareto, o Gráfico de Controle, a Matriz GUT, o 5S e a Folha de Verificação. Cada uma dessas ferramentas tem uma aplicabilidade específica:

Diagrama de Pareto: De acordo com Alkiayat (2021), o Diagrama de Pareto é uma ferramenta de qualidade que ajuda a identificar as causas mais frequentes de defeitos, reclamações ou qualquer outro fator. É um gráfico de barras que representa a frequência ou o custo (tempo ou dinheiro), e é organizado com as barras mais longas à esquerda e as mais curtas à direita. Desta forma, o gráfico visualmente retrata quais situações são mais significativas. O Diagrama de Pareto é considerado uma das sete ferramentas básicas de qualidade.

Gráfico de Controle: Segundo Lucidchart (2024), o Gráfico de Controle é uma ferramenta de qualidade usada para estudar como um processo muda ao longo do tempo. Comparando os dados atuais com os limites de controle históricos, é possível tirar conclusões sobre se a variação do processo é consistente (em controle) ou é imprevisível (fora de controle, afetada por causas especiais de variação). Os gráficos de controle são usados para determinar se um processo de fabricação ou de negócios está em um estado de controle.

Matriz GUT: Segundo Braga et al. (2019), a Matriz GUT é uma ferramenta de qualidade que ajuda no processo de priorização de problemas e situações internas da empresa. Usá-la corretamente acelera a tomada de decisão ao definir, com critérios, o nível de importância de cada item. A Matriz GUT analisa três aspectos: Gravidade, Urgência e Tendência. Cada problema é pontuado de 1 a 5 em cada uma dessas características, e então essas pontuações são multiplicadas para identificar as prioridades.

5S: De acordo com Randhawa e Ahuja (2017), o 5S é uma metodologia que resulta em um local de trabalho limpo, desobstruído, seguro e bem organizado para ajudar a reduzir o desperdício e otimizar a produtividade. É projetado para ajudar a construir um ambiente de trabalho de qualidade, tanto física quanto mentalmente8. O 5S é composto por cinco práticas fundamentais: Seiri (organizar), Seiton (arrumar), Seiso (limpar), Seiketsu (normalizar) e Shitsuke (disciplinar).

Folha de Verificação: Opex Learning (2024) define a Folha de Verificação é uma ferramenta de qualidade que serve como um formato estruturado para coleta de dados. É uma ferramenta genérica de coleta e análise de dados que pode ser adaptada para uma grande variedade de propósitos. A Folha de Verificação é usada para coletar dados sobre a frequência ou os padrões de eventos, problemas, defeitos, localização de defeitos, causas de defeitos, ou questões semelhantes.

3.3.2 Metodologia *Six sigma*

O *Six Sigma* é uma metodologia específica de gestão da qualidade que utiliza ferramentas estatísticas para identificar e eliminar defeitos nos processos. O objetivo do *Six Sigma* é reduzir a variação nos processos a um nível que resulte em não mais do que 3,4 defeitos por milhão de oportunidades. Esta metodologia focada em reduzir defeitos e melhorar a qualidade por meio de uma abordagem estatística. Pyzdek e Keller (2018) são conhecidos por sua abordagem prática desta metodologia, destacando a importância de uma implementação eficaz para garantir a melhoria da qualidade. Antony e Banuelas (2002) discutem os fatores críticos para a implementação eficaz do *Six Sigma*. Onde para a implementação bem-sucedida do *Six Sigma* depende de vários fatores, incluindo o compromisso da liderança, a formação adequada, e a seleção apropriada de projetos.

A metodologia DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) é um dos pilares centrais da abordagem *Six Sigma* para a melhoria de processos. A DMAIC é um dos pilares centrais da abordagem *Six Sigma* para a melhoria de processos. Cada etapa do DMAIC tem um propósito específico e contribui para a identificação e a eliminação de defeitos e variações nos processos.

A utilização do DMAIC no *Six Sigma* permite uma melhoria contínua, pois sua abordagem sistemática e orientada por dados permite identificar e eliminar as causas de defeitos e variações nos processos. O DMAIC é um método sistemático e científico para identificar e resolver problemas. Ele oferece uma estrutura para a melhoria de processos, utilizando uma abordagem orientada por dados que ajuda a minimizar variações nos processos e a maximizar a qualidade do produto. Onde cada fase tem um papel específico na otimização dos processos:

- **Definir**: Esta fase envolve a identificação do problema e a definição dos objetivos do projeto.
- **Medir**: Aqui, são coletados os dados relevantes para o processo que está sendo analisado.
- **Analisar**: Os dados coletados são analisados para identificar as causas raiz dos problemas.
- **Melhorar**: Nesta fase, são implementadas soluções para os problemas identificados.
- **Controlar**: Por fim, são estabelecidos controles para garantir que as melhorias sejam mantidas a longo prazo.

Essas metodologias têm sido aplicadas em uma variedade de setores, desde a manufatura até os serviços, demonstrando sua versatilidade e eficácia (KUMAR et al., 2008).

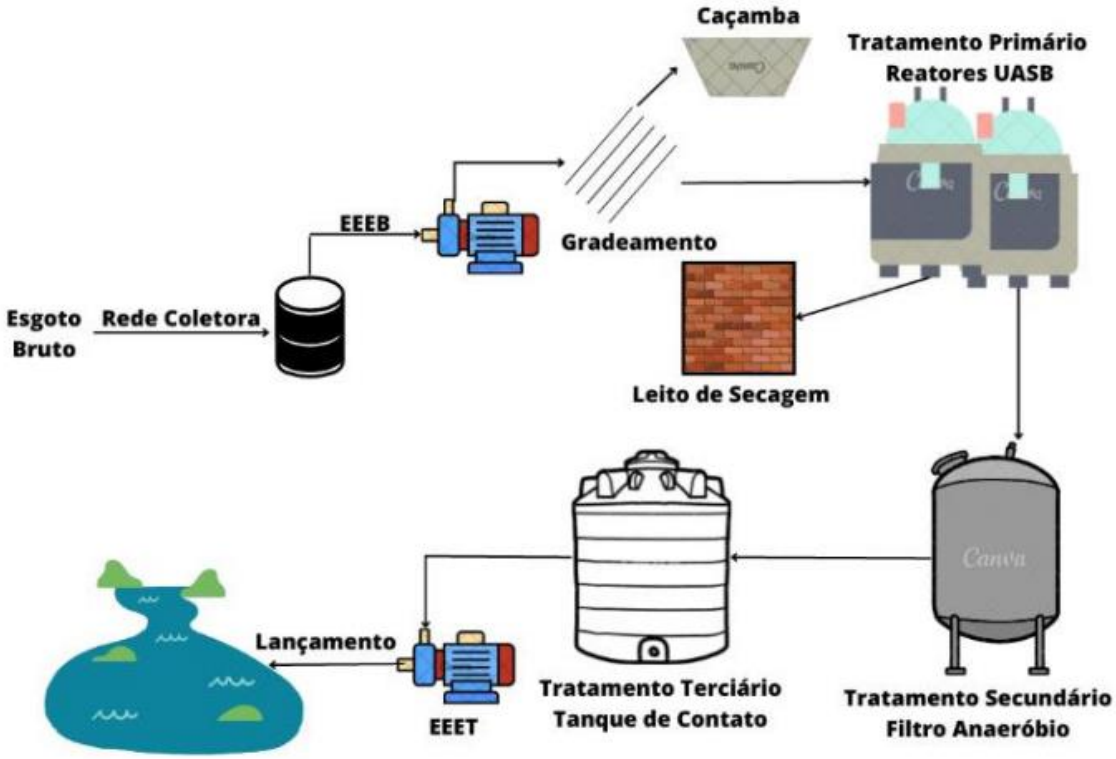
Além disso, a implementação bem-sucedida do *Six Sigma* requer o compromisso da liderança, a formação adequada dos funcionários e a seleção apropriada de projetos. A liderança deve estar comprometida com a melhoria da qualidade e deve fornecer os recursos necessários para a implementação do *Six Sigma*. Os funcionários devem ser treinados nas ferramentas e técnicas do *Six Sigma* para que possam contribuir efetivamente para a melhoria da qualidade. Por fim, os projetos devem ser selecionados com base em seu potencial para melhorar a qualidade e a eficiência dos processos (ANTONY, 2011).

4 METODOLOGIA

Como mencionando anteriormente, este trabalho teve como objetivo investigar a aplicação dos métodos estatísticos de qualidade *Six Sigma* para otimizar a operação de uma estação de tratamento de efluentes. Para alcançar tal propósito, foi conduzido um estudo de caso em uma estação de tratamento de efluentes domésticos do estado de Alagoas classificada como sendo de médio porte, que opera a uma vazão de 21l/s, onde os dados operacionais foram coletados, analisados e interpretados sob a perspectiva do *Six Sigma*.

A ETE estudada opera com tratamento preliminar composto por uma grade de limpeza manual seguida de duas caixas de areia em paralelo, constituídas por canais retangulares de limpeza manual, a jusante dos desarenadores, está implantada uma calha Parshall com largura da garganta de 6", Reatores UASB seguidos de Filtros Anaeróbios e, ao final, desinfecção por tanque de contato. Já o desaguamento do lodo ocorre por meio de quatro leitos de secagem. Como mostrado na Figura 2:

Figura 2: Fluxograma da ETE estudada



Fonte: Autor, 2023.

4.1 População e Amostra

A amostra consiste em dados operacionais coletados durante um período de 30 meses (2 anos e 6 meses). A coleta de dados foi realizada por meio de visitas à ETE, reuniões com a equipe responsável pela operação e análise constantes em registros operacionais, relatórios técnicos, planilhas e sistemas de monitoramento para obtenção dos dados necessários (DALE, 2015). Os dados incluem informações sobre o fluxo de efluentes, parâmetros de qualidade da água, tempos de processamento, incidentes ambientais e outros dados relevantes identificados durantes as observações nas visitas técnicas.

4.2 Análise e Tratamento de Dados

Os dados coletados foram analisados utilizando ferramentas básicas da qualidade no contexto do método DMAIC, de modo a permitir identificar padrões, tendências e causas-raiz das ineficiências e variações nos processos de tratamento de efluentes (GOETSCH; DAVIS, 2014).

Todos os problemas conhecidos da ETE foram abordados através de análise de prioridade com auxílio da Matriz GUT, onde através desta etapa definimos o foco do nosso estudo. Além disso foi elaborado uma folha de verificação com base na ferramenta 5S para ser uma alternativa de controle simples, de baixo custo e eficiente para otimização da operação da ETE. Para todo o tratamento de dados foi utilizado o software Excel®.

4.3 Aplicação do Six Sigma

Com base na análise dos dados disponibilizados e após reconhecimento do local, foi possível identificar oportunidades de melhoria nos processos da ETE, seguindo os primeiros passos da metodologia DMAIC. Ainda foi possível propor medidas corretivas e ações de otimização, alinhadas com os princípios do *Six Sigma*, visando reduzir desperdícios, melhorar a qualidade do tratamento e aumentar a eficiência operacional.

As medidas corretivas e de otimização sugeridas pelo *Six Sigma* serão sugeridas a liderança da estação a partir deste trabalho para possíveis implementações na ETE. A equipe responsável pela operação deverá ser devidamente instruída e capacitada para garantir a adequada execução das ações propostas, caso as indicações sejam aceitas.

Na fase de Definir, foram identificadas várias situações geradas pelos problemas analisados que estavam impactando a organização. Estas incluíam custos financeiros elevados, danos à infraestrutura, responsabilidade legal, poluição hídrica, impacto nos ecossistemas e riscos à saúde humana. Cada um desses impactos foi claramente definido e documentado para

garantir que fosse possível o entendimento da natureza e a extensão dos problemas que estavam sendo enfrentados.

Na fase de medição, foram coletados dados sobre os problemas analisados na Matriz GUT. Foi utilizado um gráfico de controle para mostrar que os dados de um parâmetro específico estavam dentro dos limites permitidos. Isso foi importante para garantir que estavam sendo trabalhados com dados precisos e confiáveis. Além disso, foram identificados alguns outros problemas e foi usado um diagrama de Pareto para mostrar a quantidade do problema principal. Isso ajudou a priorizar os esforços de melhoria.

Durante a fase de análise, foi feito um gráfico de pizza para mostrar as causas do problema principal. Isso permitiu ver claramente quais causas estavam contribuindo mais para o problema e onde deveriam ser concentrados os esforços de melhoria.

Na fase de melhoria, foi explicada toda a incidência do problema principal e foi usado um diagrama de Pareto para mostrar as razões e ocorrências do problema. Isso ajudou a entender melhor as causas raízes do problema e a desenvolver estratégias eficazes para abordá-las.

Na fase de controle, foram mencionadas possíveis formas de resolver os problemas citados e foi proposta uma folha de verificação com o uso da metodologia 5S com sistema automatizado de pontos, através do software Excel. Isso foi feito para garantir que as melhorias que foram propostas fossem implementadas e mantidas a longo prazo e que o problema não voltasse a ocorrer no futuro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma mais explicitada e para conhecimento geral, a Estação estudada é composta por:

Na Figura 3 temos o **Gradeamento Médio**, as principais características do gradeamento previsto são relacionadas a seguir:

- Tipo: grade grossa, com barras, de limpeza manual;
- Número de canais de gradeamento: 1 unidade;
- Espaçamento entre barras: 40 mm;
- Inclinação da grade: 45º;
- Largura do canal: 0,70 m.

Figura 3: Gradeamento grosso e fino: etapa inicial do processo de tratamento de esgotos onde os resíduos maiores e menores são retidos

Fonte: Autor, 2024.

Na Figura 4 nos é apresentada a **Caixa de Areia**, para a etapa de desarenação foram implantadas duas caixas de areia retangulares por gravidade, de limpeza manual, sendo que a operação deverá ser feita considerando-se uma delas como reserva.

As principais características das caixas de areia, conforme indicado nos desenhos de projeto, são:

- Tipo: caixa de areia retangular por gravidade;
- Número de caixas de areia: 2 unidades (1+1R);

- Comprimento: 5,25 m;
- Largura: 0,50 m;
- Altura útil máxima: 0,54 m;
- Rebaixo do poço de acúmulo de areia: 0,25 m.

Figura 4: Caixa de retenção de areia onde permanecem os sólidos flutuantes

Fonte: Autor, 2024.

Após passar pela caixa de areia os sólidos flutuantes seguem para os leitos de secagem, como mostrado na Figura 5.

Figura 5: Leitos de secagem

Fonte: Autor, 2024.

Os resíduos da caixa de areia e aqueles retidos na fase de gradeamento são retirados manualmente e depositados no leito de secagem, para assim serem acondicionados na caçamba estacionária. Aproximadamente são gerados 1 m3 de lodo ao mês.

Calha Parshall, para o controle da altura da lâmina d'água nas caixas de areia foi prevista uma calha Parshall instalada à jusante destas unidades, a qual também permitirá a medição da vazão afluente à estação. Conforme já mencionado, a calha Parshall instalada possui garganta com largura de 6'', a qual é indicada para veicular vazões entre 1,40 L/s e 110,40 L/s.

A capacidade máxima do Tratamento Preliminar foi definida conforme os parâmetros de projeto indicados na NBR 12.209/11. Para atendimento da taxa máxima de aplicação no desarenador, de 1.300 m^3/m^2*dia a vazão máxima que o tratamento preliminar poderá receber é de 39,5 L/s.

Estações Elevatórias de Esgoto, a jusante do tratamento preliminar, projetou-se um tanque de equalização com volume de 45,6 m3, a partir do qual os esgotos serão enviados, por meio de um sistema de recalque, para a entrada dos reatores UASB.

A estação elevatória conta com espaço para três conjuntos motobombas.

Reatores UASB, a ETE conta com um módulo composto por dois reatores retangulares UASB com volume útil de aproximadamente de 460,80 m^3.

A distribuição de vazão entre os reatores projetados será realizada por uma canaleta central, atravessando toda a extensão do módulo, na qual foram previstos vertedores triangulares direcionando os esgotos para 8 canaletas transversais, sendo 4 de cada lado da canaleta central. Em cada uma das canaletas transversais, por sua vez, foram previstos 12 vertedores triangulares, após os quais há saídas tubuladas 22 2 (total de 48 saídas, sendo uma por vertedor), cada qual responsável por promover a distribuição do esgoto no fundo do reator UASB.

Foram projetados 6 pontos de descarga de lodo, cada um prevendo a remoção de lodo em duas altitudes diferentes (fundo e a 0,15 m do fundo).

O biogás gerado nos reatores será coletado pelo sistema de captura dos gases e encaminhado ao queimador de biogás.

A capacidade máxima dos reatores foi definida conforme os parâmetros de projeto da NBR 12.209/11 e na literatura aplicável, que estabelecem:

- Tempo de detenção hidráulico ≥ 6 h para vazão média e ≥ 4 h para vazão máxima, considerando a temperatura do esgoto de 28 ºC;
- Taxa de escoamento superficial na zona de decantação - qA ≤ 1,2 m3 / m2.h, para Qmax;

- Velocidade de passagem do líquido da zona de reação para a zona de decantação: vp < 4 m/h, para Qmax., e vp < 2,5 m/h para a vazão média;
- Tempo de detenção na zona de decantação ≥ 1,5h para a vazão média e ≥ 1,0h para Qmax;
- Velocidade ascensional no reator ≤ 0,7 m/h. Com isso, para o atendimento dos parâmetros, os reatores serão capazes de veicular vazões média e máxima de 20,7 e 37,3 l/s.

Com isso, para o atendimento dos parâmetros, os reatores serão capazes de veicular vazões média e máxima de 20,7 e 37,3 l/s. Estes apresentados na Figura 6.

Figura 6: Reatores UASB da ETE

Fonte: Autor, 2024.

Dois desses reatores UASB, utilizados primariamente para estabilizar a matéria orgânica inicial vem para a caixa de distribuição para posteriormente encaminhar o lodo ao leito de secagem.

A caixa de passagem é responsável por receber os efluentes e filtrar os resíduos; auxilia na manutenção da ETE, diante da necessidade de limpeza e desobstruções. A caixa de passagem recebe o lodo descartado do fundo dos reatores. Como mostra a Figura 7.

Figura 7: Caixa de passagem da ETE e de passagem dos efluentes de lavagem de fundo dos reatores

Fonte: Autor, 2024.

Filtros anaeróbios, após passarem pelo tratamento primário nos reatores UASB, os esgotos seguirão para o módulo de filtros anaeróbios, formado por dois filtros retangulares de brita nº 4, como volume de 428,8 m3 cada unidade.

Para a distribuição de vazão ao longo dos filtros implantados, há uma canaleta central, atravessando toda a extensão do módulo. Ao longo desta extensão, existem saídas para 16 canaletas transversais, sendo 4 de cada lado da canaleta central. Em cada uma das canaletas transversais, por sua vez, existem 7 vertedores triangulares, cada qual responsável por promover o encaminhamento do esgoto a uma tubulação de distribuição do filtro anaeróbio. Os Filtros são compostos por 8 pontos de descarga lodo em cada filtro, situados junto ao fundo das unidades.

Programa de Pesquisa em Saneamento Básico - PROSAB, que estabelece:

- Tempo de detenção hidráulica entre 4 e 10 horas;
- Taxa de Aplicação Superficial de 6 a 15 m^3/m^2*d;
- Carga Orgânica Volumétrica para o volume total do filtro de 0,15 a 0,50 $kgDBO/m^3*d$;
- Carga Orgânica Volumétrica para o volume da camada suporte 0,25 a 0,75 $kgDBO/m^3*d$.

Sistema de Desinfecção, este é composto por um tanque de contato, onde o efluente passa por uma cloração final com a finalidade de eliminar microrganismos residuais para que o efluente tratado possa ser lançado no corpo hídrico reduzindo o risco de propagação de doenças infecciosas. O tempo de contato necessário depende do tipo de desinfetante utilizado e da qualidade do efluente.

Durante a investigação da estação de tratamento de efluentes (ETE) em Alagoas, foram identificados vários problemas que afetam a eficiência operacional e a qualidade do tratamento. Esses problemas incluem falhas elétricas, problemas químicos no tratamento, extravasamentos no pré-tratamento e problemas durante períodos de chuva. Foi analisado o grau de prioridade de cada problema através da Matriz GUT, no Quadro 1:

Quadro 1: Matriz GUT para aplicada na ETE para avaliação das prioridades de não-conformidades.

Descrição do problema	Gravidade	Urgência	Tendência	Prioridade Final
Extravasamento	5	4	3	12
Legalidade Ambiental	1	1	1	3
Controle de odor	2	2	1	5
Corrosão nos equipamentos	3	3	3	9
Excesso de espuma no efluente tratado	3	3	2	8

Onde:

Gravidade	
1	Não é Grave
2	Pouco Grave
3	Grave
4	Muito Grave
5	Gravíssimo

Urgência	
1	Não tem pressa
2	Pode esperar um pouco
3	Resolver o mais cedo possível
4	Resolver com alguma urgência
5	Necessita de ação imediata

Tendência	
1	Não vai piorar
2	Vai Piorar em longo prazo
3	Vai Piorar em médio prazo
4	Vai piorar em pouco tempo
5	Vai piorar rapidamente

Fonte: Autor, 2024.

Desta forma, após análise da Matriz GUT e de evidências, é possível admitir que o principal problema da ETE é a ocorrência de extravasamentos, sendo a partir de então este o foco das etapas seguintes do trabalho.

Neste contexto, a metodologia *Six Sigma* foi aplicada para analisar esse problema e desenvolver soluções potenciais. A abordagem DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar) do *Six Sigma* foi utilizada para estruturar a análise e o desenvolvimento de soluções (PYZDEK; KELLER, 2018).

5.1 Definir (Define)

A primeira etapa do DMAIC, conhecida como “Define”, é crucial para estabelecer a direção do projeto. Nesta fase, as necessidades e desejos do cliente são identificados e definidos em termos claros e mensuráveis. Isso pode incluir expectativas de qualidade, tempo de entrega, custo, entre outros aspectos que são importantes para o cliente.

No contexto de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), essas necessidades podem ser bastante específicas. Por exemplo, os incidentes ambientais podem se referir a eventos que causam danos ao meio ambiente, como derramamentos, descargas ilegais ou ainda o evento que pôde ser mais identificado, que são os extravasamentos. Os extravasamentos em estações de tratamento de esgoto podem ter consequências significativas tanto para a empresa operadora da ETE quanto para o meio ambiente. Dentre os potenciais problemas podemos citar para a empresa:

- **Custos Financeiros:** Extravasamentos resultam em desperdício de recursos. A operadora precisa lidar com o vazamento, reparos e limpeza, o que pode ser dispendioso;
- **Danos à Infraestrutura:** O extravasamento pode causar danos físicos às instalações da ETE, como tubulações, bombas e tanques. Isso requer manutenção e reparos adicionais;
- **Responsabilidade Legal:** A operadora é responsável legalmente por garantir que a ETE funcione corretamente e não cause danos ao meio ambiente ou à saúde pública. Extravasamentos podem resultar em multas ou processos judiciais.

Já no que diz respeito ao Meio Ambiente, podemos citar os problemas abaixo:

- **Poluição Hídrica:** O efluente bruto liberado durante um extravasamento contém poluentes, como matéria orgânica, nutrientes e microrganismos. Isso pode contaminar rios, lagos e aquíferos, afetando a qualidade da água e a vida aquática;
- **Impacto nos Ecossistemas:** A poluição causada pelo extravasamento pode prejudicar plantas, animais e organismos aquáticos. Isso afeta a biodiversidade e a saúde dos ecossistemas;
- **Riscos à Saúde Humana:** Se as águas contaminadas chegarem a áreas de consumo humano, podem representar riscos à saúde. Microrganismos patogênicos presentes no efluente podem causar doenças.

Em resumo, extravasamentos em ETEs são prejudiciais porque afetam a operadora, o meio ambiente e a saúde pública.

Após a identificação das necessidades e objetivos, estes são transformados em especificações do processo. Dessa forma temos metas claras e mensuráveis para a melhoria do processo. Elas podem incluir limites aceitáveis de variação, metas de desempenho ou padrões de qualidade.

5.2 Medir (Measure)

A etapa atual envolve a medição do desempenho atual do processo. Isso é realizado coletando dados operacionais, como fluxo de efluentes, parâmetros de qualidade da água, tempos de processamento e incidentes ambientais. Esses dados fornecem uma linha de base contra a qual as melhorias podem ser avaliadas (ANTONY, 2011).

Em relação aos problemas elencados na etapa de definição, podemos mostrar que:

Extravasamento: Na Figura 8 é possível constatar evidências de extravasamento, onde o efluente transbordou da caixa de areia, no pré-tratamento, e alagou os leitos de secagem.

Atualmente a estação não possui um operador fixo, mas o operador que faz a rota no local informou que houve parada das bombas da EEEB e só retornou ao normal após o acionamento manual no painel.

Além disso, o histórico da ETE no período estudado nos apresenta um quantitativo de 59 ocorrências de extravasamento.

Figura 8: Evidências de extravasamento. a) pré-tratamento b) leito de secagem c) leitos de secagem e área externa.

(a)

(b)

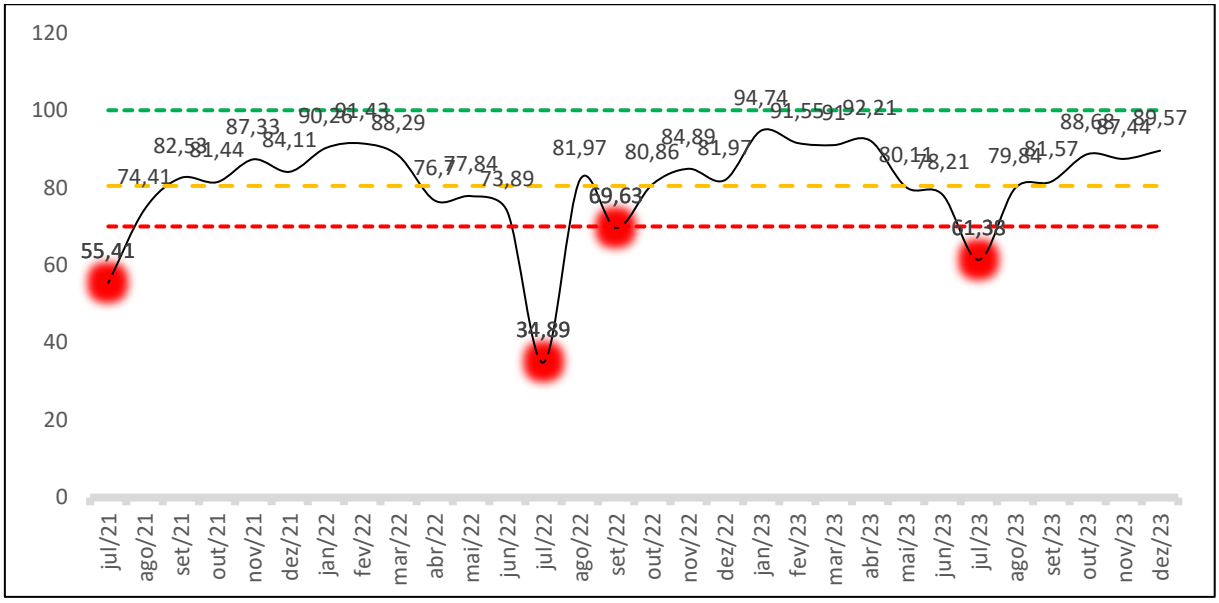
(c)

Fonte: Autor, 2024.

Legalidade Ambiental: A estação se encontra em pleno funcionamento e opera em acordo com o que é exigido em termos legais e em condicionantes presentes em sua Licença de Operação e Outorga de Lançamento de Efluentes.

Desta forma podemos pensar também no que diz respeito a eficiência da ETE, para isto foi possível avaliar os valores de entrada e saída de DBO nos meses estudados e calculando a eficiência ($\frac{(DBO_{entrada} - DBO_{saída})}{DBO_{entrada}} * 100$), mostrados no Gráfico de Controle abaixo, Figura 9:

Figura 9: Gráfico de Controle para a Eficiência da ETE (DBO)



Fonte: Autor, 2024.

Através do auxílio do Gráfico de Controle, temos a faixa mínima permitida em vermelho (70%), a faixa verde como máximo (100%) e a faixa amarela como a média dos valores analisados (80,47), podemos afirmar que apenas quatro pontos estiveram abaixo do mínimo ideal (pontos vermelhos maiores), no que se refere a eficiência da remoção de carga orgânica no tratamento da ETE, não se tratando de um problema de gravidade elevada e urgência momentânea. A demonstração da ferramenta gráfico de controle nos apresentou uma tendência que prevê uma queda na eficiência, onde se seguem 7 meses acima da média para em seguida um mês abaixo do mínimo aceitável, desta forma com a utilização dessa ferramenta em estudo contínuo é possível se programar para encontrar alternativas de mitigar possíveis eficiências abaixo do mínimo permitido.

Controle de Odor: A estação se encontra em local afastado de centros urbanos, além disso, estando presente na ETE foi possível identificar que o único ponto de odor forte é na chegada do efluente, nas demais etapas o sistema é fechado e não apresenta incômodos.

Corrosão nos Equipamentos: A corrosão em equipamentos como quadros elétricos, casas de bombas e tubulações pode ser altamente prejudicial. A corrosão pode danificar superfícies metálicas expostas.

Em tubulações e casas de bombas, a corrosão pode levar à deterioração dos metais, resultando em vazamentos que podem afetar a produção e a segurança do local. Levando a prejuízos financeiros e riscos à saúde dos funcionários.

Portanto, é essencial implementar medidas preventivas e realizar manutenções regulares para minimizar o risco de corrosão nesses equipamentos.

O painel de controle, localizado dentro da casa de bombas da EEEB apresenta avarias por corrosão na caixa metálica, como evidenciado na Figura 10:

Figura 10: Presença de corrosão. a) Painel de controle da EEEB b) Estação Elevatória de Efluente Bruto

(a)

(b)

Fonte: Autor, 2024.

Excesso de Espuma no Efluente Tratado: A presença de espuma em um efluente que passou por um processo de tratamento em uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) pode indicar várias condições. A espuma pode ser causada por diversos fatores, como a presença de detergentes, sabões, óleos ou gorduras na água residual, o excesso de ar ou oxigênio na mistura, ou o desequilíbrio da biomassa no reator biológico.

A espuma pode interferir no processo de tratamento de efluentes, especialmente no processo de sedimentação.

Além disso, a presença de espuma pode ser prejudicial quando no corpo receptor, visto que se alojando na superfície pela diferença de densidade, ela impede a penetração de luz solar, podendo prejudicar fauna e flora aquática local.

Mas que pode ser controlado através da dosagem de cloro e agitação no tanque de contato.

É possível notar o impacto visual da espuma no efluente tratado, através da Figura 11.

Figura 11: Presença de espuma no sistema. a) Saída do Filtro Anaeróbio b) Poço úmido - Lançamento de Efluente Tratado

(a)

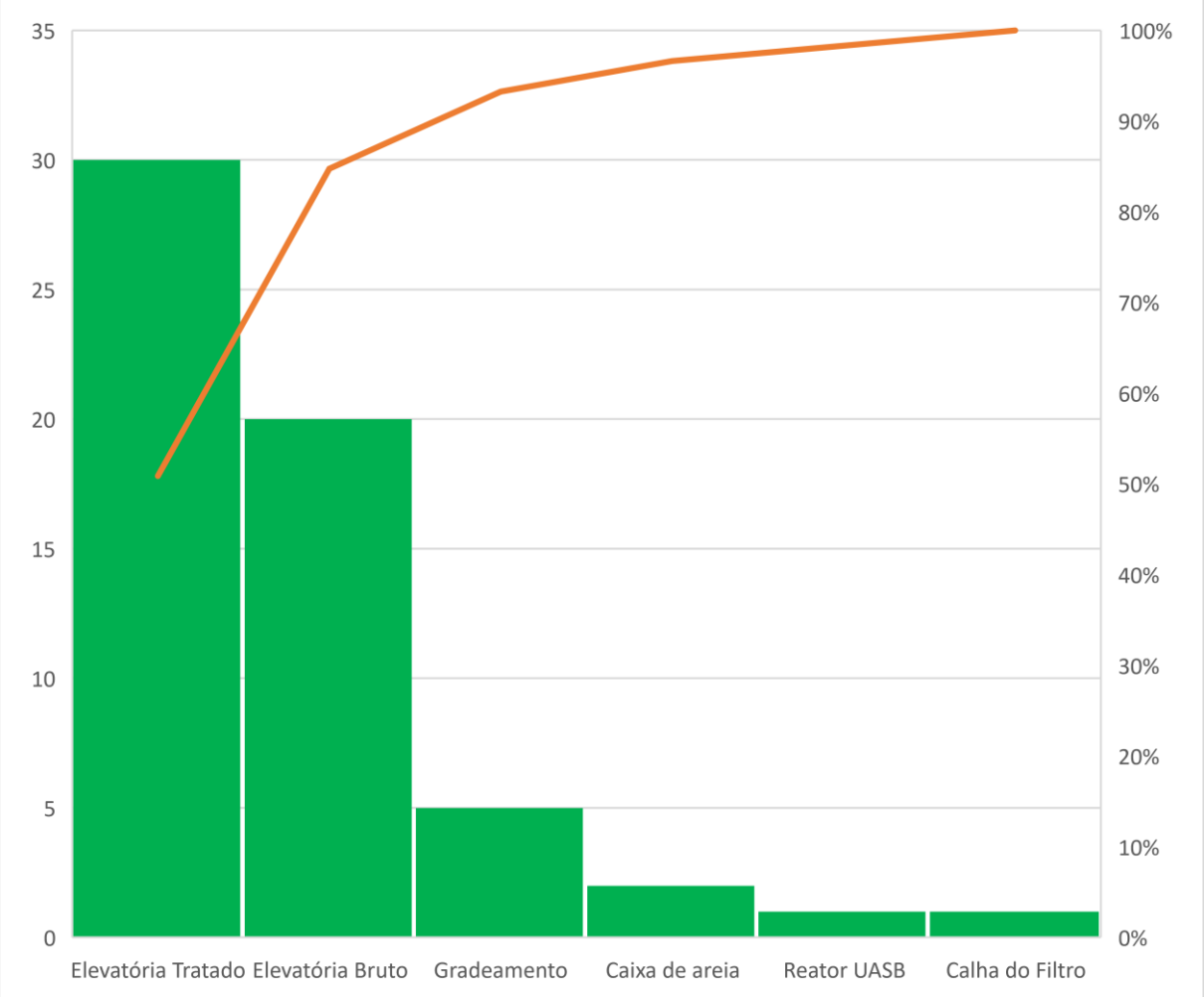
(b)

Fonte: Autor, 2024.

Foram analisados dados de incidentes ambientais relacionados a extravasamentos, não conformidades de eficiência da ETE e acompanhamento de condicionantes em legalidade ambiental relacionado a licença de operação e outorga de lançamento de efluentes. Após análise foi possível constatar baixa ocorrência nas não conformidades, de modo que a quantidade de eventos se tornou insignificante para o período analisado, além disso a ETE se encontra dentro da legalidade ambiental.

Desta forma, este trabalho focou no problema de incidentes ambientais – mais precisamente extravasamento de efluentes, logo precisamos analisar onde ocorreram os principais problemas operacionais, contabilizamos 59 incidentes de extravasamento ocorridos em toda a estação no período avaliado, como apresentado no Diagrama de Pareto abaixo, Figura 12:

Figura 12: Diagrama de Pareto para o local de ocorrência de extravasamentos.



Fonte: Autor, 2024.

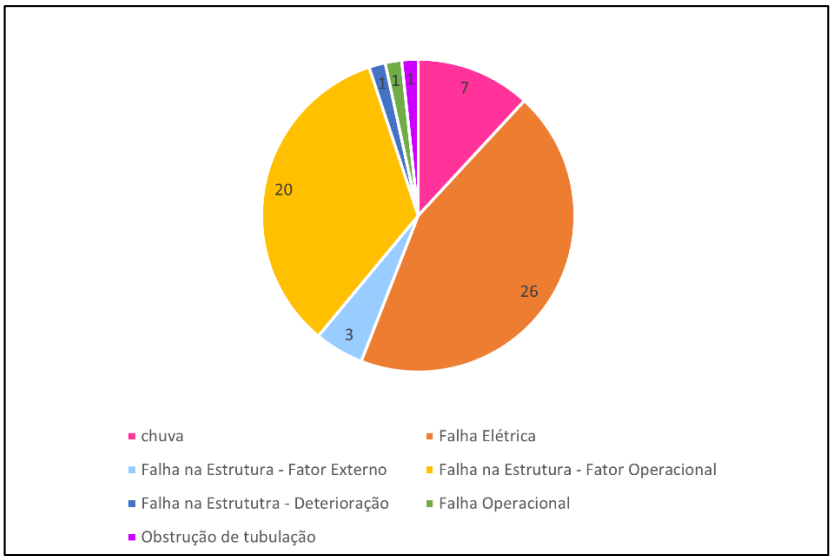
O Diagrama de Pareto evidenciou claramente que a maior quantidade de ocorrências de extravasamento ocorre no tratado (30 ocorrências), seguido pelo bruto (20 ocorrências). Isso sugere que essas duas áreas devem ser o foco principal de qualquer esforço de melhoria, pois resolver os problemas nessas áreas terá o maior impacto na redução do número total de ocorrências de extravasamento.

As áreas de gradeamento, caixa de areia, reator e calha do filtro têm menos ocorrências e, portanto, embora ainda sejam importantes, podem não ser tão críticas quanto as áreas de tratado e bruto.

5.3 Analisar (Analyze)

A terceira etapa consiste em analisar os dados coletados para identificar as causas dos problemas e as oportunidades de melhoria. Através de gráficos podemos identificar as fontes de variação e defeitos nos processos.

Figura 13: Causas de Incidentes.



Fonte: Autor, 2024.

5.4 Melhorar (*Improve*)

A quarta etapa envolve o desenvolvimento e a implementação de soluções para os problemas identificados.

5.4.1 Extravasamento

Assim como aplicamos o Diagrama de Pareto na etapa 5.2, neste ponto ele também nos auxiliará apresentando o quantitativo de incidentes relacionados aos motivos identificados pela operação local e com auxílio deste trabalho, onde estão elencados os itens no Quadro 2 apresentados na Figura 14:

Quadro 2: Razões de extravasamento x ocorrências (continua)

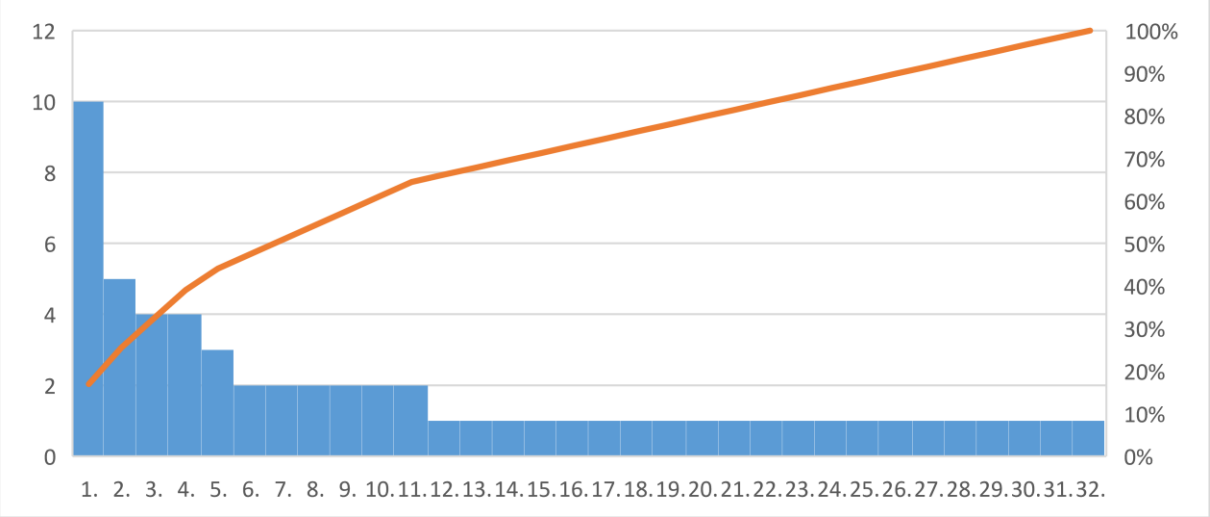
Nº	Razões	Ocorrências	Ocorrências Acumuladas	Participação Unitária (%)	Participação Acumulada (%)
1	Houve queda de energia e o painel não energizou automaticamente, não havendo funcionamento das bombas	10	10	16,9	16,9
2	Uma única bomba no tratado não suporta a demanda	5	15	8,4	25,4
3	Eletrodos de nível sujos, não acionando a bomba	4	19	6,7	32,2
4	Sobrecarga de vazão no sistema, devido às chuvas	4	23	6,7	38,9
5	Parada da bomba e não acionamento automático	3	26	5,0	44,0
6	Problema nas boias, que não acionaram as bombas	2	28	3,4	47,4
7	Parada das bombas da elevatória do bruto	2	30	3,4	50,8
8	Falha nos sensores que não ativaram a bomba de recalque	2	32	3,4	54,2
9	Alta contribuição na chegada do efluente	2	34	3,4	57,6
10	Houve uma queda de energia durante a madrugada e o retorno das bombas só é dado manualmente após reset do soft starter	2	36	3,4	61,0
11	Houve acionamento da segunda bomba, aumentando a vazão e gerando extravasamento. Visto que normalmente é operado com apenas	2	38	3,4	64,4
12	Troca da nomenclatura da botoeira	1	39	1,7	66,1
13	Bomba da elevatória de efluente tratado foi desativada pelo soft starter	1	40	1,7	67,8
14	Eletrodo da bomba com problema	1	41	1,7	69,5
15	Rompimento de tubulação	1	42	1,7	71,2
16	Problema no disjuntor do painel elétrico, não acionando as bombas	1	43	1,7	72,9
17	Não acionamento automático da bomba	1	44	1,7	74,6
18	Cabo da alimentação da bomba com avaria	1	45	1,7	76,3

Quadro 3: Razões de extravasamento x ocorrências (conclusão)

Nº	Razões	Ocorrências	Ocorrências Acumuladas	Participação Unitária	Participação Acumulada
19	Falha no sensor de nível da elevatória	1	46	1,7	78,0
20	Parada da bomba da EEET	1	47	1,7	79,7
21	Mangote que liga EEEB ao Reator UASB apresentou fissuras	1	48	1,7	81,3
22	Falha nos sensores que não ativaram a bomba de recalque	1	49	1,7	83,0
23	Bomba de recalque da EEEB não estava funcionando	1	50	1,7	84,7
24	Curto-circuito devido fio mal isolado, causando a diminuição de tensão e não acionamento da bomba	1	51	1,7	86,4
25	Diminuição da frequência do inversor da bomba, não suportando a demanda de vazão	1	52	1,7	88,1
26	Bomba de recalque estava obstruída, o que reduziu a vazão de lançamento e ocasionou o transbordo na elevatória.	1	53	1,7	89,8
27	Devido manutenções na EEET as bombas passaram um período desligadas, gerando o extravasamento.	1	54	1,7	91,5
28	Devido as comportas da caixa de areia estarem fechadas e no instante em que houve chegada de esgoto na estação, o nível do efluente subiu no canal da caixa de areia provocando um extravasamento	1	55	1,7	93,2
29	Houve rompimento de fiação elétrica próximo a ETE, gerando instabilidade em toda a rede elétrica	1	56	1,7	94,9
30	Após teste de acionamento remoto do gerador o painel não voltou a energizar, não acionando as bombas.	1	57	1,7	96,6
31	Devido ao grande volume de chuvas o sistema não aguentou e extravasou	1	58	1,7	98,3
32	Sobrecarga de vazão no sistema, devido às chuvas.	1	59	1,7	100,0

Fonte: Autor, 2024.

Figura 14: Diagrama de Pareto para as causas de Incidentes na ETE.



Fonte: Autor, 2024.

Segue abaixo o Quadro 3, com todos os problemas identificados para os incidentes ambientais acontecidos no período de estudo e sua respectiva solução, onde o número entre parênteses representa a quantidade de vezes que este evento ocorreu:

Quadro 4: Razão e Sugestão de Melhorias (continua)

Razão	Sugestão de Melhorias
Troca da nomenclatura da botoeira	Ajuste de nomenclaturas nos painéis e atenção.
Uma única bomba no tratado não suporta a demanda (5)	Avaliar a vazão média de chegada e se é necessário a utilização de duas bombas na EEEB, em caso positivo adicionar mais uma bomba na EEET, podendo ser uma bomba submersa no poço úmido.
Bomba da elevatória de efluente tratado foi desativada pelo soft starter	Programar painel elétrico para reinício automático das bombas, não havendo necessidade de atuação do soft starter.
Parada da bomba e não acionamento automático (3)	Programar painel elétrico e ativação do gerador presente na ETE para atuação imediato após falha elétrica.
Houve queda de energia e o painel não energizou automaticamente, não havendo funcionamento das bombas (10)	
Houve rompimento de fiação elétrica próximo a ETE, gerando instabilidade em toda a rede elétrica	
Após teste de acionamento remoto do gerador o painel não voltou a energizar, não acionando as bombas.	
Houve acionamento da segunda bomba, aumentando a vazão e gerando extravasamento. Visto que normalmente é operado com apenas (2)	Treinamento dos operadores.
Devido manutenções na EEET as bombas passaram um período desligadas, gerando o extravasamento.	Em manutenções programadas no sistema esgotamento que a ETE faz parte, programar para que não ocorram eventos deste tipo.

Quadro 5: Motivos e Sugestão de Melhorias (conclusão)

Razão	Sugestão de Melhorias
Eletrodo da bomba com problema	Manutenções preventivas com intuito de mitigar possíveis avarias e defeitos nos equipamentos.
Eletrodos de nível sujos, não acionando a bomba (4)	
Rompimento de tubulação	
Problema nas boias, que não acionaram as bombas (2)	
Parada das bombas da elevatória do bruto (2)	
Problema no disjuntor do painel elétrico, não acionando as bombas	
Não acionamento automático da bomba	
Cabo da alimentação da bomba com avaria	
Falha nos sensores que não ativaram a bomba de recalque (2)	
Falha no sensor de nível da elevatória	
Parada da bomba da EEET	
Mangote que liga EEEB ao Reator UASB apresentou fissuras	
Falha nos sensores que não ativaram a bomba de recalque	
Bomba de recalque da EEEB não estava funcionando	
Curto-circuito devido fio mal isolado, causando a diminuição de tensão e não acionamento da bomba	
Diminuição da frequência do inversor da bomba, não suportando a demanda de vazão	
Bomba de recalque estava obstruída, o que reduziu a vazão de lançamento e ocasionou o transbordo na elevatória.	
Devido as comportas da caixa de areia estarem fechadas e no instante em que houve chegada de esgoto na estação, o nível do efluente subiu no canal da caixa de areia provocando um extravasamento	Analisar a necessidade de fechamento das comportas e se a atual caixa de areia supre a demanda de efluente que chega.
Sobrecarga de vazão no sistema, devido às chuvas (4)	Realizar programas para identificar ligações irregulares, ou em caso de normalidade avaliar a possibilidade de adicionar mais bombas nas elevatórias e a capacidade da ETE em relação ao tratamento.
Devido ao grande volume de chuvas o sistema não aguentou e extravasou	
Sobrecarga de vazão no sistema, devido às chuvas.	
Alta contribuição na chegada do efluente (2)	
Houve uma queda de energia durante a madrugada e o retorno das bombas só é dado manualmente após reset do soft starter (2)	

Fonte: Autor, 2024.

5.5 Controle (Control)

As etapas seguintes, que correspondem a aplicação da metodologia DMAIC, neste caso o Controle juntamente da aplicação e treinamentos, não foram abordadas neste trabalho devido o tempo dedicado ao estudo, mas ficam dispostas a próximos trabalhos e a vontade da empresa proprietária e operativa da estação para aplicabilidade.

Como sugestões podemos citar:

- **Avaliação dos Resultados:** Após a implementação das melhorias, os resultados podem ser avaliados por meio de indicadores de desempenho e métricas de qualidade. Havendo então a possibilidade de realizar uma comparação entre o cenário antes e após a aplicação do *Six Sigma*, para verificar a eficácia das ações implementadas e os impactos na operação da ETE;
- **Treinamento e Desenvolvimento:** Para a implementação bem-sucedida do *Six Sigma*, é crucial que a equipe responsável pela operação da ETE receba treinamento adequado. O treinamento deve abranger não apenas as técnicas estatísticas do *Six Sigma*, mas também os princípios de gestão da qualidade e a importância da melhoria contínua. Além disso, o treinamento deve ser contínuo para garantir que a equipe esteja sempre atualizada com as melhores práticas e novas técnicas de melhoria da qualidade (ANTONY, 2011);
- **Cultura de Melhoria Contínua:** A implementação do *Six Sigma* deve ser acompanhada pela criação de uma cultura de melhoria contínua na organização. Isso significa que todos os membros da equipe devem estar comprometidos com a busca constante por melhorias nos processos e na qualidade do tratamento. A liderança deve desempenhar um papel ativo na promoção desta cultura, demonstrando seu compromisso com a qualidade e reconhecendo os esforços da equipe para melhorar a eficiência operacional (GOETSCH; DAVIS, 2014);
- **Avaliação de Impacto Ambiental:** Além da avaliação dos resultados operacionais, é importante realizar uma avaliação de impacto ambiental após a implementação das melhorias. Isso envolve a análise dos efeitos das melhorias na qualidade da água, na redução da poluição e na conservação dos recursos hídricos. A avaliação de impacto ambiental pode ajudar a demonstrar os benefícios ambientais da aplicação do *Six Sigma* na ETE e reforçar o

> compromisso da organização com a sustentabilidade (HELLSTRÖM; JEPPSSON; KÄRRMAN, 2000).

Além disto, para auxílio nas aplicações e na cultura organizacional e operacional da ETE, apresento a Folha de Verificação para aplicação da metodologia 5S na estação em padrão automatizado no software Excel, segue no link: 5S – Aplicação ETE e apresentado no Apêndice A.

6 CONCLUSÃO

A aplicação da metodologia *Six Sigma* na Estação de Tratamento de Efluentes estudada permitiu que fosse feito um estudo aprofundado sobre o funcionamento operacional da estação em todas as suas etapas e conhecer seu espaço físico, nos possibilitando identificar várias oportunidades de melhoria nos processos e desenvolver soluções eficazes para os problemas identificados.

Para garantir a implementação eficaz das soluções propostas, é crucial que a equipe responsável pela operação da ETE receba treinamento adequado. O treinamento deve abranger as técnicas estatísticas do *Six Sigma*, os princípios de gestão da qualidade e a importância da melhoria contínua. Além disso, se faz importante a realização de treinamentos contínuos para garantir que a equipe esteja sempre atualizada com as melhores práticas e novas técnicas de melhoria da qualidade.

As soluções propostas devem ser implementadas na ETE e os resultados devem ser avaliados por meio de indicadores de desempenho e métricas de qualidade. A comparação entre o cenário antes e após a aplicação do *Six Sigma* tende a mostrar a eficácia das ações que serão implementadas e os impactos positivos na operação da ETE.

Importante ressaltar que os resultados mostrarão o potencial do *Six Sigma* como uma ferramenta valiosa para a otimização da operação de estações de tratamento de efluentes, assim como para qualquer tipo de indústria e operação.

Devido ao pouco tempo disponível, não foi possível aplicar as etapas de Controle, Soluções Propostas, Treinamento e Desenvolvimento. Ficando as mesmas como sugestão para trabalhos futuros e aplicabilidade em conjunto com a empresa proprietária da estação de tratamento envolvida no estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, S. C. Six Sigma and the Quality Management Mosaic. Quality Progress, v. 35, n. 1, p. 79-82, 2002.

ALKIAYAT, M. A Practical Guide to Creating a Pareto Chart as a Quality Improvement Tool. Global Journal on Quality and Safety in Healthcare, 2021.

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DMAIC. Aplicação da metodologia DMAIC para melhoria de processo. São José dos Campos, 2023. Disponível em: abepro.org.br. Acesso em: 05/02/2024.

ANTONY, J. Six Sigma for service processes. Business Process Management Journal, v. 8, n. 4, p. 289-301, 2002.

ANTONY, J.; BANUELAS, R. Key ingredients for the effective implementation of Six Sigma program. Measuring Business Excellence, [S.l.], 2002.

BRAGA, I. C.; BRANDÃO, F. S.; RIBEIRO, F. R. C.; DIÓGENES, A. G. Aplicação da Matriz GUT na análise de manifestações patológicas em construções históricas. Revista ALCONPAT, v. 9, n. 3, p. 320-335, 2019.

DALE, B. G. Managing Quality. 5th ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2015.

DALE, B. G. Managing Quality. 6. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2015.

Etapas do tratamento de esgoto: você sabe quais são elas?. BRK Ambiental, 2024. Disponível em: https://blog.brkambiental.com.br/etapas-tratamento-de-esgoto/. Acesso em: 17/02/2024.

ESTUDO DE CASO. Aplicação da metodologia DMAIC para otimização de processos produtivos em uma empresa metalúrgica. Brasil, 2023. Disponível em: abepro.org.br. Acesso em: 31/01/2024.

FONSECA, E.; DOS SANTOS, A.; MARQUES, R.; MENESES, M. Effluent Reuse: Challenges and Perspectives in Brazil. Water Science & Technology, v. 78, n. 8, p. 1698-1706, 2018.

GOETSCH, D. L.; DAVIS, S. Quality Management for Organizational Excellence. 7. ed. Harlow: Pearson, 2014.

GOETSCH, D. L.; DAVIS, S. Quality Management for Organizational Excellence. 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2014.

HELLSTRÖM, D.; JEPPSSON, U.; KÄRRMAN, E. A framework for systems analysis of sustainable urban water management. Environmental Impact Assessment Review, v. 20, n. 3, p. 311-321, 2000.

JIMÉNEZ, B.; ASPINWALL, J. Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs. London: IWA Publishing, 1997.

JURAN, J. M.; GODFREY, A. B. (Ed.). Juran's Quality Handbook. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

KUMAR, M. et al. Six Sigma implementation: an empirical analysis of critical success factors. European Journal of Business and Management, v. 1, n. 2, p. 26-33, 2008.

METCALF & EDDY, Inc. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

OPEX LEARNING. Check Sheet Example - 7 Quality Tools.

PANDE, P. S.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies are Honing Their Performance. New York: McGraw-Hill, 2000.

PROSAB. Desenvolvimento da Aplicação dos Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo. Brasil, 1999. Disponível em: https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/ric/article/view/29258. Acesso em: 30/01/2024.

PYZDEK, T.; KELLER, P. The Six Sigma Handbook. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018

RANDHAWA, J. S.; AHUJA, I. S. A study on the Ishikawa's original basic tools of quality control in South American companies: results from a pilot survey and directions for further research. The TQM Journal, 2021.

TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL, H.D. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

VESILIND, P. A.; MORGAN, S. M.; HEINE, L. G. Wastewater Treatment Plant Design. London: IWA Publishing, 2010.

VON SPERLING, M. Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal. London: IWA Publishing, 2007.

WERKEMA, C. Métodos PDCA e DMAIC e Suas Ferramentas Analíticas. 1ª edição. GEN Atlas, 17 de outubro de 2012.

APÊNDICE A

1S	Senso de Utilização		
#	Check Item	Descrição	Pontuação
1	Materiais ou partes	A ETE ou o processo de operação inclue materiais ou partes desnecessárias?	4
2	Máquinas ou Equipamentos	Existe alguma máquina ou equipamento não utilizado?	3
3	Materiais, Ferramentas	Existem materiais, ferramentas ou itens similares em volta?	1
4	Controle Visual	É obvio quais os itens que foram marcados como "desnecessários"?	5
5	Padrões Escritos	estabelecer o 5S deixou para trás algum padrão inútil?	
		Total Utilizado	3

Legenda:
(0) Várias correções devem ser feitas.
(1) Algumas correções devem ser feitas.
(2) Aceitável com pequenos comentários.
(3) Sem comentários de correção.
(4) Acima dos requisitos solicitados.

0 Muito Ruim
1 Ruim
2 Regular
3 Bom
4 Muito Bom
5 Excelente

2S	Senso de Organização		
#	Check Item	Descrição	Pontuação
6	Indicadores de Localização	Todos os objetos ou itens estão acondicionados de forma/local adequados?	
7	Itens Indicadores	Todos os objetos ou itens estão acondicionados de forma/local adequados?	
8	Quantidade de Indicadores	Existe gabaritos, ferramentas ou itens similares em volta?	
9	Demarcação de Passarelas e áreas de estoque em processo	É obvio quais os itens que foram marcados como "desncessários"?	
10	Padrões Escritos	Os arquivos e documentos estão organizados?	
		Total Utilizado	0

3S	Senso de Limpeza		
#	Check Item	Descrição	Pontuação
11	Materiais ou partes	A área da ETE está limpa e sem resíduos, água e óleo?	
12	Máquinas ou Equipamentos	Qual o estado das instalações elétricas / Hidráulicas / Civil?	
13	Materiais, Ferramentas	Existe materiais, ferramentas ou itens similares em volta?	
14	Controle Visual	Qual a condição das lixeiras (limpeza / coleta seletiva)?	
15	Padrões Escritos	Existe check list de limpeza para a área?	
		Total Utilizado	0

4S	Senso de Padronização		
#	Check Item	Descrição	Pontuação
16	Memorandos de Melhoria	Há um memorando com formatos bem estabelecidos?	
17	Idéias de Melhoria	É possível fornecer sugestões de melhoria?	
18	Procedimentos Importantes	Os procedimentos críticos são bem estabelecidos?	
19	Plano de Melhoria	Existe plano de melhoria?	
20	O primeiro 3Ss	Os 3Ss anteriores estão sendo seguidos?	
		Total Utilizado	0

5S	Senso de Disciplina		
#	Check Item	Descrição	Pontuação
21	Treinamento	Ocorrem treinamentos com os operadores?	
22	Ferramentas e Partes	Há procedimentos para o uso correto de ferramentas e das áreas?	
23	Controle operacional	Os processos operacionais são bem definidos?	
24	Procedimentos	Os procedimentos são documentados e padronizados?	
25	Placas de Atividade	Existem placas instaladas (informativas/de sinalização)?	
		Total Utilizado	0