

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM **PROCESSOS QUÍMICOS**

EVE GONÇALVES REIS BRUNO

LUCAS DANIEL DE LIMA

MARLON CRISTHIAN MARTINS

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DA QUALIDADE NA
MITIGAÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO DE UM SISTEMA
DE TORRE DE RESFRIAMENTO**

CAMPINAS/SP
2025

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM **PROCESSOS QUÍMICOS**

EVE GONÇALVES REIS BRUNO

LUCAS DANIEL DE LIMA

MARLON CRISTHIAN MARTINS

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DA QUALIDADE NA
MITIGAÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO DE UM SISTEMA
DE TORRE DE RESFRIAMENTO**

Trabalho de Graduação apresentado por Eve Gonçalves Reis Bruno, Lucas Daniel de Lima e Marlon Cristhian Martins, como pré-requisito para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Processos Químicos, da Faculdade de Tecnologia de Campinas, elaborado sob orientação da Prof. Ma. Mônica Frigeri

CAMPINAS/SP
2025

FICHA CATALOGRÁFICA
CEETEPS - FATEC Campinas - Biblioteca

B898a

BRUNO, Eve Gonçalves Reis Bruno

Aplicação de ferramentas da qualidade na mitigação da taxa de corrosão de um sistema de torre de resfriamento. Eve Gonçalves Reis Bruno, Lucas Daniel de Lima e Marlon Cristhian Martins. Campinas, 2025.

32 p.; 30 cm.

Trabalho de Graduação do Curso de Processos Químicos
Faculdade de Tecnologia de Campinas.

Orientador: Profa. Me. Mônica Frigeri.

1. Corrosão. 2. Ferramentas da qualidade. 3. Melhoria contínua. 4. Qualidade. 5. Torre de resfriamento. I. Autor. II. Faculdade de Tecnologia de Campinas. III. Título.

CDD 620.162

Catálogo-na-fonte: Bibliotecária: Aparecida Stradiotto Mendes – CRB8/6553

TG PQ 25.2

EVE GONCALVES REIS BRUNO

LUCAS DANIEL DE LIMA

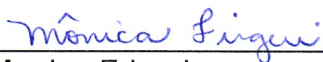
MARLON CRISTHIAN MARTINS

Aplicação de ferramentas da qualidade na mitigação da taxa de corrosão de um sistema de torre de resfriamento

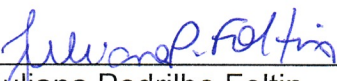
Trabalho de Graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Processos Químicos, pelo CEETEPS / Faculdade de Tecnologia – Fatec Campinas.

Campinas, 02 de dezembro de 2025.

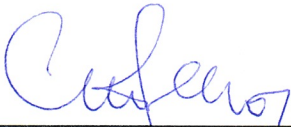
BANCA EXAMINADORA



Monica Frigeri
Fatec Campinas



Juliana Pedrilho Foltin
Fatec Campinas



Mara Regina Ferreira Miranda
Fatec Campinas

RESUMO

Este Trabalho de Graduação teve como objetivo aplicar metodologias da qualidade para mitigação da taxa de corrosão em torres de resfriamento, estruturas críticas no processo produtivo de diversas indústrias. A corrosão, caracterizada pela degradação de materiais metálicos em razão de reações químicas e eletroquímicas com o meio, compromete a integridade estrutural e operacional de sistemas, impactando diretamente na segurança, na eficiência e nos custos industriais. Neste cenário, o emprego de ferramentas da qualidade como o Diagrama de Ishikawa, *Brainstorming* e Análise de Pareto, mostrou-se eficaz na identificação das causas raiz, análise de falhas e proposta de melhorias contínuas. O estudo também explorou fatores que influenciam a corrosão - como pH, ciclo de concentração, turbidez e cloro livre - e descreveu os principais tipos de corrosão observados em sistemas de resfriamento, como corrosão galvânica, por pite, sob tensão e intergranular. Com base nos resultados obtidos através das ferramentas da qualidade, foi possível mitigar a taxa de corrosão do sistema de torre de resfriamento, a proposta desse trabalho baseou-se em uma abordagem qualitativa com suporte quantitativo para promover a confiabilidade, sustentabilidade e competitividade industrial.

Palavras-chave: corrosão; ferramentas da qualidade; melhoria contínua; qualidade; torre de resfriamento.

ABSTRACT

This Graduation Project aimed to apply quality methodologies to mitigate the corrosion rate in cooling towers, which are critical structures in the production processes of various industries. Corrosion, characterized by the degradation of metallic materials due to chemical and electrochemical reactions with the environment, compromised the structural and operational integrity of systems, directly impacting safety, efficiency, and industrial costs. In this context, the use of quality tools such as the Ishikawa Diagram, Brainstorming, PDCA Cycle and Pareto Analysis proved to be effective in identifying root causes, analyzing failures, and proposing continuous improvement actions. The study also explored factors influencing corrosion—such as pH, temperature, flow rate, and dissolved salts—and described the main types of corrosion observed in cooling systems, including galvanic, pitting, stress, and intergranular corrosion. Based on the results obtained through the application of quality tools, the mitigation of the corrosion rate in the cooling tower system was achieved. The proposal of this study was grounded on a qualitative approach supported by quantitative data to promote industrial reliability, sustainability, and competitiveness.

Keywords: corrosion; quality tools; continuous improvement; quality; cooling tower.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corrosão galvânica em juntas parafusadas em estrutura metálica.....	12
Figura 2 - Corrosão por pite em substrato metálica.	12
Figura 3 - Identificação de trincas por corrosão sob tensão via ensaio de líquido penetrante.	13
Figura 4 - Micrografia de corrosão intergranular em aço inoxidável.....	13
Figura 5 - Corrosão filiforme em superfície metálica pintada.	14
Figura 6 - Diagrama de Ishikawa.	17
Figura 7 - Ciclo PDCA.	17
Figura 8 - Identificação dos pontos de captação para água de reposição do sistema.	20
Figura 9 - Identificação doas etapas dos processos de tratamento de água para reposição do sistema de resfriamento.	21
Figura 10 - Ilustração de uma torre de resfriamento de fluxo conta corrente.	22
Figura 11 - Diagrama de Ishikawa com hipóteses para a corrosão na torre de resfriamento..	24

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico de Pareto com fatores associados à corrosão.	25
Gráfico 2 - Relação entre desvio de pH e taxa de corrosão.	26
Gráfico 3 - Relação entre desvio de cloro livre e taxa de corrosão.	26
Gráfico 4 - Relação entre desvio de ciclo de concentração e taxa de corrosão.	27
Gráfico 5 - Relação entre desvio de turbidez e taxa de corrosão.	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	7
1.2	JUSTIFICATIVA/PROBLEMÁTICA.....	7
1.3	OBJETIVOS.....	8
1.3.1	Objetivo geral.....	8
1.3.2	Objetivos específicos.....	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1	FUNDAMENTOS DA CORROSÃO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS.....	10
2.2	TIPOS DE CORROSÃO EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO.....	11
2.3	FATORES QUE INFLUENCIAM A CORROSÃO.....	14
2.4	QUALIDADE, MELHORIA CONTÍNUA E GESTÃO DE PROCESSOS.....	15
2.5	FERRAMENTAS DA QUALIDADE APLICADAS AO CONTROLE DA CORROSÃO.....	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1	DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA.....	19
3.2	OBJETO DE ESTUDO.....	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
5	CONCLUSÃO.....	29
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A indústria moderna enfrenta o desafio constante de maximizar a eficiência operacional e, simultaneamente, minimizar riscos, custos e impactos ambientais. Nesse cenário, a manutenção da integridade dos equipamentos industriais assume papel estratégico, especialmente em sistemas que operam sob condições extremas ou contínuas, como é o caso das torres de resfriamento. Estas estruturas desempenham uma função essencial nos processos de troca térmica, sendo largamente utilizadas em setores como o químico, petroquímico, alimentício, siderúrgico e de geração de energia (Kurita, s.d).

No entanto, a operação contínua em ambientes úmidos, com presença de oxigênio dissolvido, sais, microrganismos e variações térmicas, torna as torres de resfriamento altamente suscetíveis à corrosão. A corrosão é um processo eletroquímico espontâneo que resulta na degradação progressiva dos metais, levando a perdas materiais, falhas operacionais e riscos à segurança dos processos. Gentil (1996, p. 1) define a corrosão como o retorno do metal ao seu estado original de estabilidade, geralmente óxidos ou sais, em uma reação que, apesar de natural, impõe sérios prejuízos à indústria.

Além dos danos materiais, a corrosão em sistemas de resfriamento pode comprometer a eficiência energética, elevar os custos de manutenção corretiva e provocar interrupções não programadas no processo produtivo. Segundo Iannuzi e Frankel (2022) destaca que os prejuízos econômicos decorrentes da corrosão podem alcançar até 3 a 4% do Produto Interno Bruto (PIB) de um país, sendo, portanto, um problema não apenas técnico, mas estratégico.

1.2 JUSTIFICATIVA/PROBLEMÁTICA

Diante da relevância técnica e econômica do controle da corrosão, este trabalho justifica-se pela necessidade de adotar uma abordagem sistemática e preventiva no combate a esse fenômeno em sistemas de torre de resfriamento. A motivação central surgiu de uma situação real vivenciada por um dos integrantes do grupo, que atua em uma empresa do setor industrial responsável por operar e manter sistemas de resfriamento.

O sistema analisado apresentava índices elevados de corrosão, os quais, além de comprometerem a durabilidade dos componentes, estavam gerando custos operacionais

crecentes com reposição de peças, uso excessivo de produtos químicos e perdas de eficiência térmica. A ausência de um método estruturado para análise e resolução do problema agravava o cenário, pois as decisões eram tomadas com base na experiência prática, sem respaldo em dados objetivos ou ferramentas sistemáticas.

Assim, este estudo visa preencher essa lacuna ao propor a aplicação de ferramentas da qualidade no diagnóstico e mitigação da taxa de corrosão. Tais ferramentas, consagradas na literatura da gestão de processos, oferecem meios para identificar causas raízes, planejar intervenções e avaliar os efeitos das ações implantadas, promovendo uma gestão mais eficiente e baseada em evidências (Barbosa *et al.*, 2011, p. 3), (Monteiro, 2022, p. 19).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

A pesquisa teve como objetivo principal aplicar as ferramentas da qualidade na identificação, análise e mitigação da taxa de corrosão em um sistema de torre de resfriamento industrial, além de promover melhorias contínuas na confiabilidade e eficiência do processo.

1.3.2 Objetivos específicos

O trabalho teve como objetivos específicos os seguintes:

- Levantar os principais fatores físico-químicos e operacionais que contribuem para o avanço da corrosão em torres de resfriamento;
- Realizar a coleta de dados de campo que permitam avaliar o comportamento da corrosão no sistema estudado;
- Empregar ferramentas da qualidade como *Brainstorming*, Diagrama de Ishikawa, Análise de Pareto na análise do problema;
- Fornecer bases técnicas que permitam a continuidade e aprofundamento de pesquisas futuras sobre corrosão em sistemas de resfriamento.

Este trabalho está limitado à análise de um sistema de torre de resfriamento, operado por uma empresa da área industrial. As informações obtidas referem-se às condições

observadas ao longo do período de coleta de dados dos meses de janeiro a agosto de 2025, não sendo objetivo deste estudo generalizar os resultados para todos os sistemas similares. No entanto, os métodos e ferramentas aplicadas possuem aplicabilidade ampla e podem ser adaptados a outras realidades industriais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo reúne os fundamentos teóricos essenciais para a compreensão do fenômeno da corrosão e do uso de ferramentas da qualidade em ambientes industriais, com foco em sistemas de resfriamento. Apresenta-se, inicialmente, a caracterização da corrosão como processo químico e eletroquímico, seus impactos operacionais, econômicos e ambientais, bem como os setores mais afetados. Em seguida, são abordadas as principais formas de corrosão e os fatores que influenciam sua ocorrência, como pH, temperatura, velocidade do fluxo e composição da água. Na segunda parte do capítulo, discute-se os conceitos de qualidade, melhoria contínua e gestão por processos, estabelecendo conexões entre essas práticas e o controle técnico da corrosão. Por fim, apresentam-se as ferramentas da qualidade mais citadas na literatura como apoio à identificação de causas, priorização de riscos e estruturação de ações corretivas e preventivas, que servirão de base metodológica para este trabalho.

2.1 FUNDAMENTOS DA CORROSÃO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

A corrosão é um processo natural e inevitável que ocorre quando um metal, em contato com o meio ambiente, sofre uma reação química ou eletroquímica que o transforma em sua forma mais estável, geralmente óxidos, hidróxidos ou sais. Segundo Gentil (1996, p. 1), trata-se de um retorno à forma original em que o metal se encontrava na natureza e embora seja um fenômeno espontâneo, representa um dos maiores desafios enfrentados pela indústria moderna, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico.

Em ambientes industriais, a corrosão ocorre com maior intensidade devido às condições agressivas a que os materiais metálicos estão expostos. Temperaturas elevadas, umidade, presença de sais, ácidos, gases como oxigênio e dióxido de carbono, além de micro-organismos, que favorecem reações corrosivas aceleradas. Indústrias que utilizam grandes volumes de água ou operam sob regimes térmicos intensos estão entre as mais afetadas, pois é comum o uso de caldeiras, trocadores de calor, tubulações e torres de resfriamento metálicas, que estão constantemente expostas a fluidos corrosivos ou condições operacionais agressivas (Silva; Carvalho, s.d).

Por exemplo, nas refinarias de petróleo, a presença de compostos sulfurados em altas temperaturas contribui para a corrosão severa de unidades de processamento. Já em usinas

termelétricas, a água de alimentação da caldeira e os sistemas de condensação e resfriamento constituem pontos críticos para a degradação metálica. Na indústria de papel e celulose, a presença de efluentes com alto teor de cloretos e pH variável favorece a corrosão localizada e intergranular de tubulações e tanques.

A corrosão gera consequências significativas para os processos industriais, como perda de eficiência térmica, falhas estruturais, aumento do consumo energético, elevação dos custos de manutenção e, em casos extremos, acidentes operacionais, tornando sua prevenção e controle uma prioridade estratégica. Sistemas de resfriamento, por exemplo, requerem monitoramento contínuo da qualidade da água, uso adequado de inibidores de corrosão e manutenção preventiva rigorosa para evitar prejuízos materiais e paradas não programadas (Silva; Carvalho, s.d).

Embora as consequências técnicas e econômicas sejam o foco principal na maioria das análises, estudos recentes também apontam impactos ambientais associados à corrosão. Segundo Iannuzzi e Frankel (2022), a substituição de estruturas corroídas, especialmente de aço carbono, demanda significativa produção de aço novo, processo altamente intensivo em carbono. Os autores estimam que até 9% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) podem estar associadas à reposição de aço corroído. Dessa forma, o combate à corrosão também assume um papel ambiental relevante, contribuindo para a redução da pegada de carbono de indústrias.

Portanto, compreender os fundamentos da corrosão, suas causas e mecanismos, e os contextos industriais mais suscetíveis ao seu avanço, é essencial para garantir a confiabilidade operacional, a eficiência econômica e a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

2.2 TIPOS DE CORROSÃO EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO

A corrosão manifesta-se sob diferentes formas, e entender essas tipologias é essencial para a escolha das estratégias de mitigação. A seguir, são descritas as principais formas de corrosão em sistemas de resfriamento.

A corrosão galvânica ocorre quando dois metais diferentes estão em contato em presença de um eletrólito, como a água, então o metal menos nobre atua como ânodo e sofre corrosão acelerada. Este fenômeno é comum em conexões entre ligas diferentes, como aço e cobre (Gasparoni; Rodrigues, 2020).

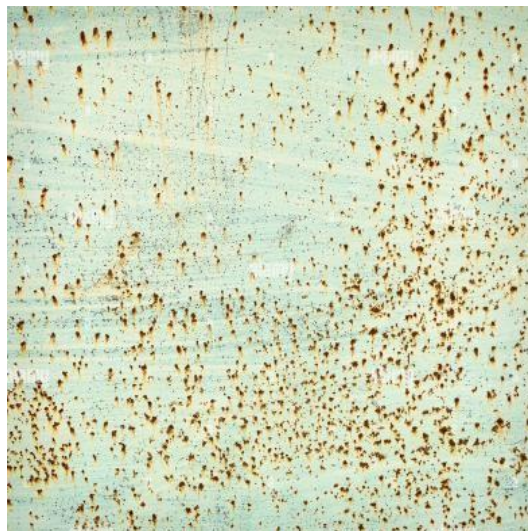
Figura 1 - Corrosão galvânica em juntas parafusadas em estrutura metálica.



Fonte: INSPENET (2024).

A corrosão por pite (ou corrosão por *pitting*) caracteriza-se pela formação de cavidades profundas e localizadas, de difícil detecção visual, portanto, é extremamente prejudicial, pois compromete a espessura do metal em pontos específicos. A presença de íons cloreto é um fator determinante para o desenvolvimento desse tipo de ataque (Gentil, 1996, p. 39).

Figura 2 - Corrosão por pite em substrato metálica.



Fonte: RADZKOU (2009).

A corrosão sob tensão (SCC – *Stress Corrosion Cracking*) resulta da ação combinada de tensões mecânicas e ambiente corrosivo. Pode ocorrer em materiais submetidos a esforços

internos ou externos, como soldas mal executadas ou tubos sujeitos a pressões elevadas (Gentil, 1996, p. 41).

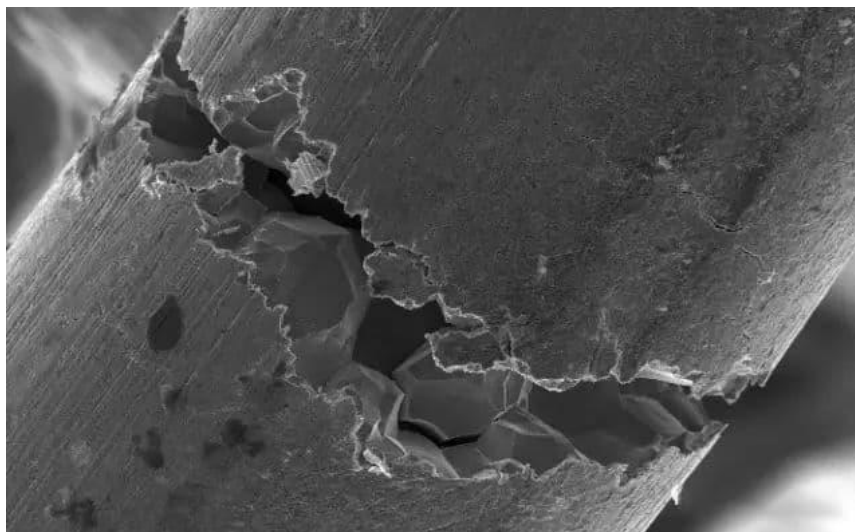
Figura 3 - Identificação de trincas por corrosão sob tensão via ensaio de líquido penetrante.



Fonte: WARREN FORENSICS (2021).

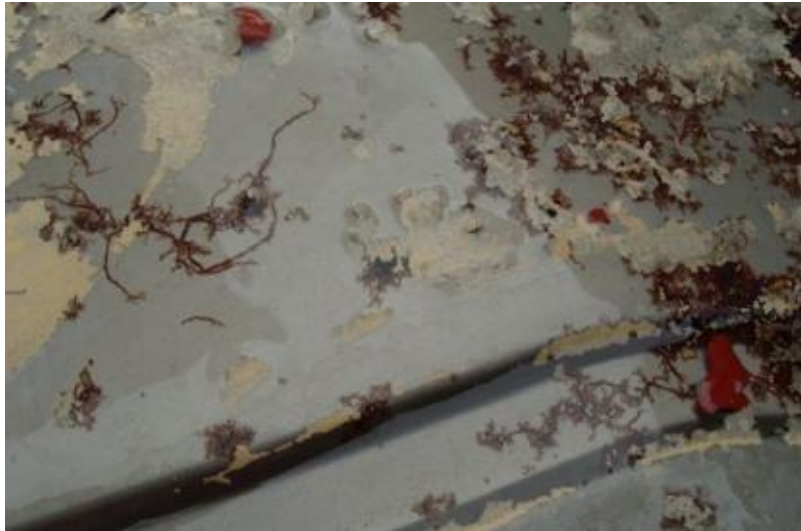
Também podem ser citadas a corrosão intergranular, que afeta os contornos de grãos metálicos após tratamentos térmicos inadequados, e a corrosão filiforme, que se desenvolve sob películas protetoras, como pinturas, e forma trilhas que se propagam horizontalmente sob a camada (Gentil, 1996, p. 39).

Figura 4 - Micrografia de corrosão intergranular em aço inoxidável.



Fonte: COMPRACO (2024).

Figura 5 - Corrosão filiforme em superfície metálica pintada.



Fonte: RIJEZA (2020).

A correta identificação do tipo de corrosão é crucial para se adotarem intervenções mais adequadas, seja por mudanças operacionais, uso de inibidores químicos ou substituição de materiais.

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CORROSÃO

Diversos fatores operacionais e ambientais podem acelerar ou retardar a corrosão em sistemas de resfriamento. Um dos mais relevantes é o pH da água, pois valores muito ácidos ou básicos podem comprometer a camada passiva de proteção natural dos metais, por isso, o intervalo ideal de pH para minimizar a corrosão geralmente está entre 7,5 e 8,5 (Silva; Carvalho, s.d).

A temperatura também tem influência significativa, quanto mais elevada, maior a taxa de reação química e menor a solubilidade do oxigênio, o que intensifica a agressividade do meio. Segundo Silva e Carvalho (s.d), cada aumento de 10 °C na temperatura pode dobrar a taxa de corrosão.

A velocidade do fluxo de água nas tubulações afeta a abrasividade e o transporte de sólidos. Velocidades muito baixas favorecem o acúmulo de biofilmes e incrustações, já velocidades muito elevadas podem causar corrosão por erosão.

Além disso, a presença de íons dissolvidos, como cloretos, sulfatos e bicarbonatos, aumenta a condutividade elétrica da água e favorece reações eletroquímicas. O oxigênio dissolvido atua como agente oxidante, participando diretamente das reações catódicas da

corrosão.

A qualidade da água de reposição (*make-up*), as condições operacionais do sistema e o tipo de tecnologia de tratamento aplicada (inibidores, dispersantes ou biocidas) são variáveis que devem ser controladas para prolongar a vida útil dos equipamentos (Silva; Carvalho, s.d).

2.4 QUALIDADE, MELHORIA CONTÍNUA E GESTÃO DE PROCESSOS

Qualidade, em seu sentido mais amplo, pode ser definida como o grau em que um produto, processo ou serviço satisfaz os requisitos estabelecidos e as expectativas dos clientes, internos ou externos. No contexto industrial, qualidade está diretamente associada à padronização, desempenho, confiabilidade e segurança operacional.

A melhoria contínua é um princípio central da gestão da qualidade, trata-se de um processo cíclico e sistemático de aperfeiçoamento de atividades, produtos ou serviços, com base na análise de dados, correção de falhas, prevenção de desvios e busca constante por eficiência. A melhoria contínua não ocorre de forma aleatória, mas estruturada, sendo aplicada por meio de métodos como o ciclo PDCA, análise de causas, monitoramento de indicadores e gestão da informação (Barbosa *et al.*, 2011, p. 5).

A gestão por processos, por sua vez, é a abordagem que organiza as atividades da empresa com foco no fluxo de valor, desde a entrada de insumos até a entrega de resultados ao cliente. Essa visão possibilita o controle das interfaces entre departamentos, a identificação de gargalos e a padronização de procedimentos. Em sistemas complexos, como os de tratamento de água e controle da corrosão, a gestão por processos é essencial para garantir previsibilidade, rastreabilidade e ações corretivas bem direcionadas (Veolia, 2024, p. 2).

Segundo Barbosa *et al.* (2011, p. 3), a aplicação de ferramentas da qualidade representa um avanço significativo na identificação de falhas e no redesenho de processos produtivos, contribuindo diretamente para a redução de desperdícios, aumento da produtividade e controle de variabilidades operacionais.

O Manual de Tratamento de Água Industrial da Veolia apresenta um modelo de gestão da qualidade aplicada ao tratamento de água industrial, baseado no controle de variáveis e na capacidade do sistema de manter-se dentro dos parâmetros desejados, destacando a importância do monitoramento contínuo e do uso de dados confiáveis para a manutenção da estabilidade do processo, bem como a necessidade de ajustes constantes com base na avaliação crítica de desempenho (Veolia, 2024, p. 2)

Desse modo, a qualidade, quando entendida como um processo sistêmico,

multidisciplinar e contínuo, contribui não apenas para a eficiência técnica dos processos industriais, mas também para a construção de uma cultura organizacional voltada à excelência.

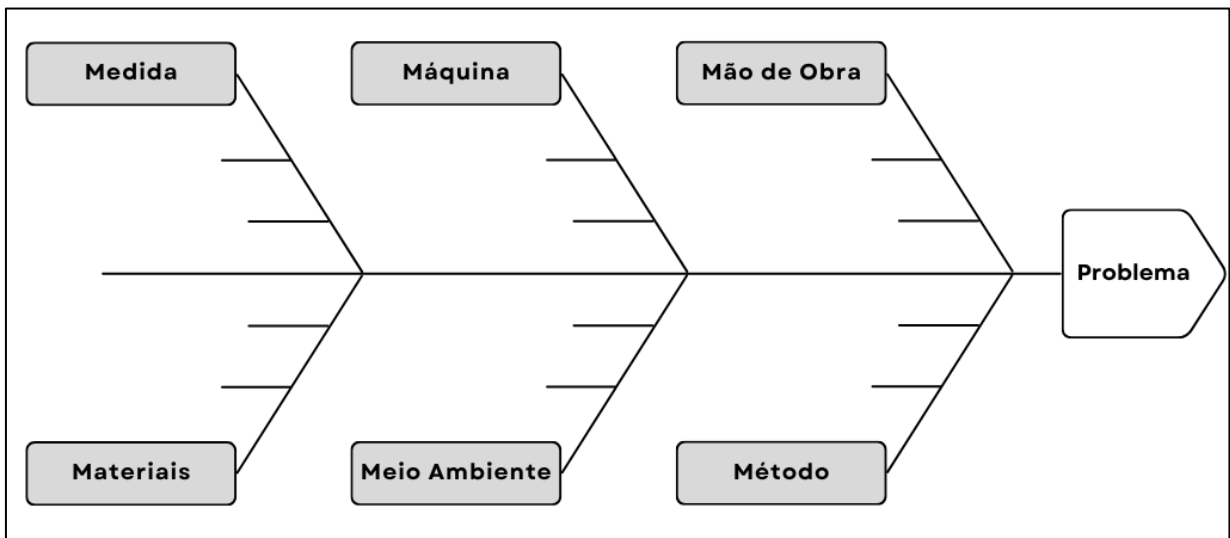
2.5 FERRAMENTAS DA QUALIDADE APLICADAS AO CONTROLE DA CORROSÃO

A gestão da qualidade no ambiente industrial conta com um conjunto de ferramentas analíticas que auxiliam na identificação de causas de problemas, na organização de informações, na priorização de ações e no controle de processos. Tais ferramentas têm aplicação consolidada em setores como manufatura, saúde, meio ambiente e, mais recentemente, também em áreas técnicas específicas como o controle da corrosão. Segundo Barbosa *et al.* (2011, p. 3), essas ferramentas são fundamentais para promover decisões baseadas em dados, ampliar a visão sistêmica e apoiar estratégias de melhoria contínua.

Uma das ferramentas mais elementares é o *Brainstorming*, criado por Alex Osborn na década de 1940, cuja proposta é estimular a geração de ideias de maneira livre e coletiva. De acordo com o SEBRAE (s.d, p. 5), essa técnica visa capturar o maior número possível de hipóteses ou soluções a partir do conhecimento e experiência dos participantes, sem julgamentos ou filtros iniciais. Em contextos industriais, o *Brainstorming* é frequentemente utilizado como etapa preliminar para levantamento de possíveis causas de falhas em processos, como o surgimento de corrosão em sistemas de água.

As ideias obtidas por meio do *Brainstorming* podem ser posteriormente organizadas utilizando o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como Diagrama de Causa e Efeito. Desenvolvido por Kaoru Ishikawa na década de 1960, o diagrama permite agrupar causas potenciais de um problema em categorias comuns, como Método, Máquina, Material, Mão de Obra, Meio Ambiente e Medição. Segundo Monteiro (2022, p. 25), o Diagrama de Ishikawa é uma ferramenta poderosa para análise qualitativa de causas e para a comunicação visual dos fatores que influenciam os resultados de um processo.

Figura 6 - Diagrama de Ishikawa.



Fonte: OS AUTORES (2025).

Outra ferramenta amplamente reconhecida na literatura da qualidade é o Ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), sua função é estruturar o processo de melhoria contínua por meio de quatro etapas cíclicas: planejar, executar, verificar e agir. Segundo Barbosa *et al.* (2011, p. 5) o PDCA é essencial para padronizar intervenções em sistemas técnicos, promover ajustes baseados em evidências e assegurar a manutenção dos resultados obtidos, ou seja, é uma metodologia que permite o controle sistemático de processos complexos, como os envolvidos na prevenção da corrosão.

Figura 7 - Ciclo PDCA.



Fonte: BLOG DO APRENDIZ (2012).

Para análise de riscos potenciais, utiliza-se a FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), uma ferramenta estruturada que antecipa possíveis modos de falha em um sistema, avaliando sua severidade (S), ocorrência (O) e detectabilidade (D). A multiplicação desses fatores resulta no RPN (*Risk Priority Number*), um índice que ajuda a classificar e priorizar os riscos com maior potencial de impacto. O FMEA é indispensável em contextos em que a confiabilidade dos equipamentos é crítica, como em instalações sujeitas à corrosão acelerada por variáveis físico-químicas do processo (Institute for Healthcare Improvement, 2017a, p. 1)

O Gráfico de Dispersão é outra ferramenta estatística importante na análise da qualidade, ele permite investigar a relação entre duas variáveis, revelando correlações ou tendências que podem apontar causas ocultas de um problema. Conforme o Institute for Healthcare Improvement (2017b, p. 1), esse gráfico é eficaz para verificar, por exemplo, se há relação entre concentração de cloretos e aumento da taxa de corrosão, facilitando decisões baseadas em dados observacionais.

Por fim, a Análise de Pareto é utilizada para destacar os fatores mais relevantes em um conjunto de causas, seguindo o princípio 80/20, ou seja, aproximadamente 80% dos problemas decorrem de 20% das causas. Essa ferramenta permite focar esforços nos elementos mais críticos do processo, otimizando recursos e tempo. Sua aplicação no controle da corrosão é estratégica, pois permite selecionar quais variáveis operacionais ou condições ambientais merecem maior atenção no plano de ação (Veolia, 2024, p. 5).

Assim, as ferramentas da qualidade, quando bem compreendidas e aplicadas, constituem uma base metodológica robusta para o diagnóstico e tratamento de problemas industriais complexos. Sua integração ao contexto do controle da corrosão representa uma abordagem moderna e eficaz para mitigar falhas, garantir segurança e manter a integridade dos ativos físicos nas organizações.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA

A metodologia adotada nesta pesquisa é de natureza aplicada e abordagem qualitativa com suporte quantitativo, caracterizando-se como um estudo de caso exploratório. O estudo de caso a seguir é segundo Gil (2008, p. 58), o estudo de caso adequado quando se pretende analisar em profundidade um ou poucos objetos, permitindo o exame detalhado de fenômenos complexos inseridos em uma realidade específica.

3.2 OBJETO DE ESTUDO

Para a realização deste estudo, foram utilizados dados reais coletados de uma refinaria de petróleo. Nesse segmento, o resfriamento de água é uma etapa muito importante para o controle térmico. Tendo em vista a diversidade de equipamentos para a usabilidade de resfriamento será abordado um em específico, a torre de resfriamento.

Os materiais empregados na pesquisa incluíram instrumentos para medição de variáveis físico-químicas da água como pH, condutividade elétrica, concentração de oxigênio dissolvido e presença de íons cloreto. Tais variáveis são determinantes na compreensão da corrosividade do meio e foram monitoradas com o auxílio de equipamentos previamente calibrados, seguindo orientações técnicas presentes no artigo técnico de Silva e Carvalho (s.d) e nas recomendações de Gasparoni e Rodrigues (2020).

Além dos dados operacionais, foram utilizados registros internos da empresa, como a taxa de corrosão, consumo de produtos químicos, inspeções visuais e relatórios técnicos de análises laboratoriais, que foram coletados no período de janeiro a agosto de 2025. Esses documentos serviram de base para o diagnóstico situacional do sistema e permitiram a contextualização do problema estudado.

Dentro de todos os processos existentes nesta refinaria de petróleo, o processo de tratamento de água da torre de resfriamento foi o foco de estudo por meio das ferramentas de qualidade citadas anteriormente.

A performance da água dentro da refinaria depende diretamente da qualidade da água de reposição do sistema, por ser o abastecimento do processo. Ao longo do ano, a água de abastecimento sofre com sazonalidades e isso afeta diretamente a concentração de sais

correspondentes na torre de resfriamento.

Figura 8 - Identificação dos pontos de captação para água de reposição do sistema.



Fonte: OS AUTORES (2025).

Os pontos de captação da água utilizada no sistema de resfriamento localizam-se nos rios Jaguarari e Atibaia, conforme apresentado na Figura 4. Após a captação, a água passa por um tratamento primário, cujo objetivo é remover partículas em suspensão e matéria orgânica de maior porte, evitando que esses materiais entrem no sistema e comprometam seu desempenho.

A neutralização é a primeira etapa e fundamental, pois as partículas presentes na água costumam ter cargas elétricas em suas superfícies, o que gera repulsão entre elas e dificulta sua aglomeração. A neutralização visa eliminar ou reduzir essas cargas elétricas, favorecendo a aproximação das partículas e preparando o meio para as etapas seguintes.

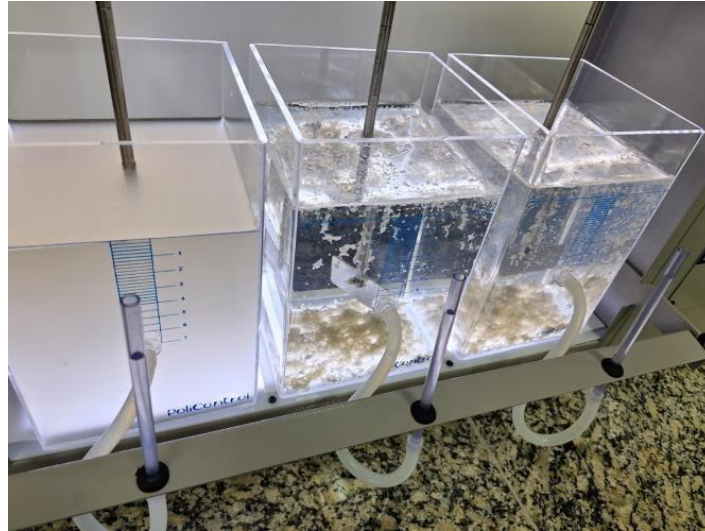
Com a neutralização das cargas, as partículas estão aptas a se agrupar. A coagulação, segunda etapa, é o processo de adição de coagulantes ou floculantes que promovem esse agrupamento inicial, permitindo a formação de microflocos.

Na sequência, ocorre a floculação, etapa na qual os microflocos se unem formando flocos maiores. Esse processo depende da agitação controlada da água: a velocidade deve ser suficiente para permitir o contato entre as partículas, mas sem ser intensa a ponto de romper os flocos formados.

Por fim, na etapa de decantação, os flocos formados tornam-se suficientemente densos para se depositarem no fundo do tanque. Esse processo separa a água em duas fases, o material sedimentado (corpo de fundo) e a parte líquida mais clara que permanece na superfície (fase

sobrenadante), pronta para etapas posteriores de tratamento ou uso no sistema de resfriamento.

Figura 9 - Identificação das etapas dos processos de tratamento de água para reposição do sistema de resfriamento.

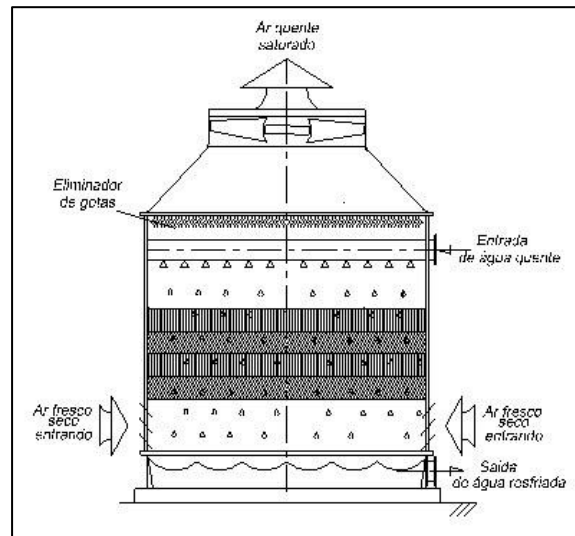


Fonte: OS AUTORES (2025).

Após passar pelos tratamentos preliminares, a água de reposição, já adequada para minimizar os principais problemas associados ao sistema de resfriamento, é direcionada diretamente para a bacia da torre, onde realiza a reposição do nível de água no processo.

A torre de resfriamento atua como um trocador de calor. Nela, a água quente proveniente dos processos industriais desce em fluxo contínuo, enquanto ocorre a troca térmica com o ar ambiente. Na parte inferior da torre (a bacia), a água já resfriada é coletada. Esse resfriamento ocorre por meio de convecção natural ou forçada, utilizando um material de enchimento (recheio), que aumenta a área de contato entre a água e o ar, promovendo a dissipação do calor e, conseqüentemente, a redução da temperatura da água.

Figura 10 - Ilustração de uma torre de resfriamento de fluxo conta corrente.



Fonte: CARAVELA (2025).

As refinarias fazem o uso de uma quantidade excessiva de água pra seu funcionamento desde as etapas iniciais de destilação até os processos finais do seu processo, tendo em vista esse alto volume de uso da água se faz necessário um tratamento efetivo para a diminuição de custos de produção e recursos naturais.

Antes da aplicação dos métodos que utilizam as ferramentas de qualidade não existia uma metodologia em que consistia em uma análise linear dos dados e as ações eram feitas corretivamente, assim não possuindo o tempo para uma análise preventiva da situação específica da ocorrência.

A aplicação das ferramentas da qualidade foi utilizada sob os resultados analíticos a partir de análises laboratoriais das águas do sistema, fazendo o uso dessas ferramentas para priorizar e padronizar os dados analíticos mais relevantes e que tem a maior interferência na água de resfriamento.

A técnica de *Brainstorming* foi utilizada inicialmente com uma equipe multidisciplinar da empresa para identificar, sem julgamentos, possíveis causas para a elevação da taxa de corrosão. Conforme SEBRAE (s.d, p. 2), essa técnica favorece a geração de ideias inovadoras e a participação ativa dos colaboradores.

As informações obtidas foram organizadas por meio do Diagrama de Ishikawa, o qual, segundo Monteiro (2022, p. 25), permite agrupar e visualizar as causas potenciais de um problema segundo categorias clássicas (6M: Máquina, Método, Material, Mão de Obra, Meio Ambiente e Medição).

Por fim, aplicaram-se a Análise de Pareto para identificar as causas mais significativas

entre aquelas detectadas, com base no princípio 80/20. A partir disso, os esforços foram concentrados nas causas com maior impacto, que permitiu um plano de ação mais eficaz e direcionado.

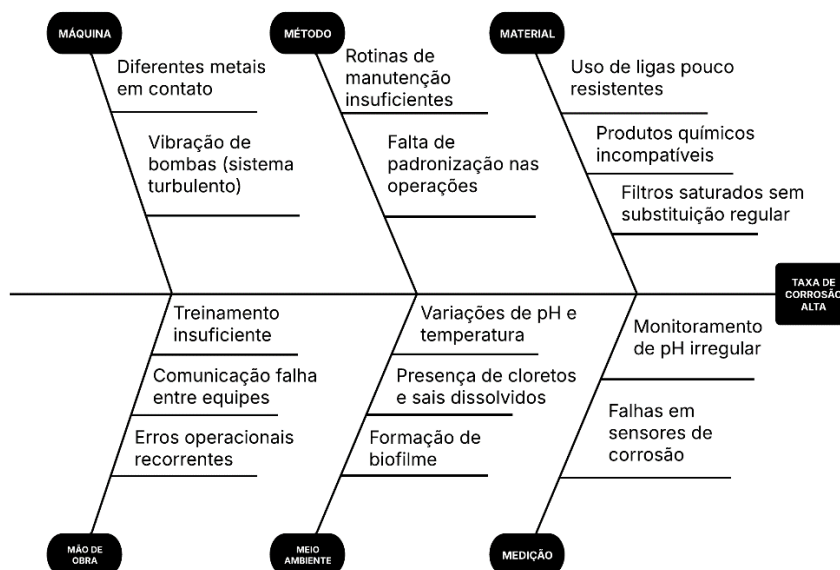
A efetividade das intervenções foi avaliada com base em dados comparativos de antes e depois da implementação, utilizando os registros operacionais da empresa e a análise dos parâmetros monitorados. A metodologia proposta permitiu uma abordagem sistêmica e estruturada para a mitigação da corrosão, fundamentada em dados reais e ferramentas consolidadas da qualidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A etapa de discussão foi iniciada a partir da aplicação da ferramenta *Brainstorming*, realizado em formato de reunião colaborativa, envolvendo a equipe técnica da refinaria e os especialistas da empresa do setor industrial responsável por operar e manter sistemas de resfriamento, com o objetivo de levantar as possíveis causas para os elevados índices de corrosão observados no sistema de torre de resfriamento. A dinâmica consistiu na exposição livre de ideias pelos participantes, sem julgamentos ou descartes iniciais, de modo a incentivar a contribuição de todos os envolvidos. Durante a atividade, foram elencados fatores físico-químicos, como variações de pH, concentração de cloretos, alcalinidade, ciclo de concentrações, níveis de zinco e turbidez, além de aspectos operacionais relacionados à frequência de monitoramento e à execução das ações corretivas. Foram considerados cenários prováveis para a ocorrência da corrosão que poderiam estar impactando a torre de resfriamento tanto externamente como internamente.

As hipóteses levantadas na etapa de *Brainstorming* foram organizadas por meio do Diagrama de Ishikawa, que possibilitou estruturar de forma lógica os diferentes fatores associados ao aumento da taxa de corrosão, distribuindo-os nas categorias clássicas de análise, essa organização favoreceu a visualização conjunta das causas potenciais, evitando dispersão das discussões e permitindo priorizar as variáveis mais críticas apontadas nas reuniões.

Figura 11 - Diagrama de Ishikawa com hipóteses para a corrosão na torre de resfriamento.



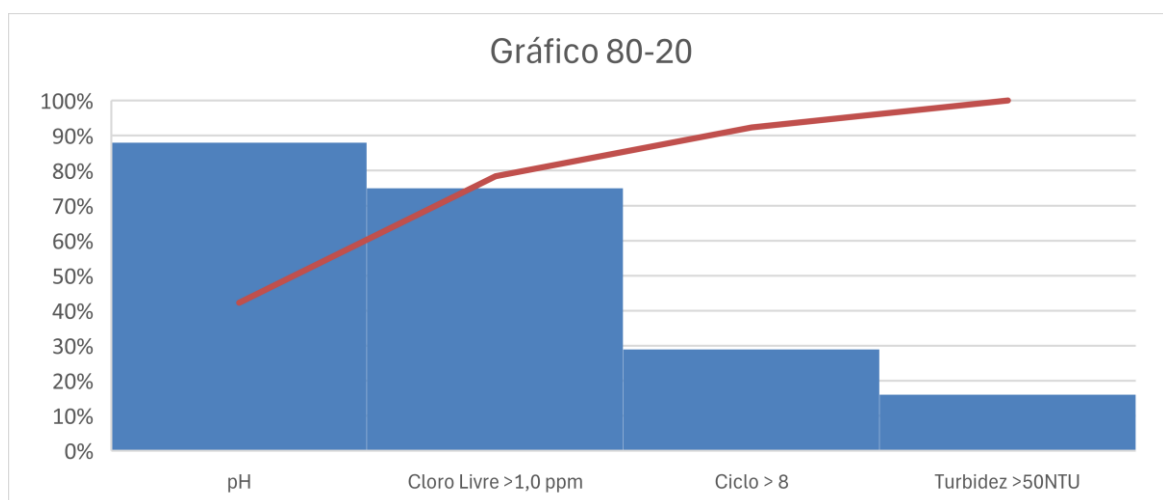
Fonte: OS AUTORES (2025).

A organização das hipóteses por meio do Diagrama de Ishikawa permitiu ampliar a visão sobre as possíveis origens do problema, reunindo fatores de ordem física, operacional, ambiental e de monitoramento. Essa sistematização foi fundamental para orientar a etapa seguinte de investigação, uma vez que, entre os elementos discutidos, o pH destacou-se como variável crítica, em consonância com a literatura que ressalta sua influência direta sobre os processos corrosivos (Silva; Carvalho, s.d).

Contudo, não havia consenso imediato entre a equipe multidisciplinar quanto ao seu impacto, o que reforçou a necessidade de validar essa hipótese por meio da análise dos dados operacionais do sistema. Dessa forma, o Diagrama de Ishikawa não apenas consolidou o levantamento inicial, mas também direcionou a atenção para fatores prioritários que demandariam verificação empírica.

Portanto, a análise de dados representou a etapa seguinte do processo investigativo: recorreu-se inicialmente à ferramenta Diagrama de Pareto, que possibilitou identificar os fatores com maior contribuição para os desvios associados à corrosão. Como mostra o Gráfico 1, variáveis como o pH da água de circulação e os níveis de cloro livre foram responsáveis pela maior parcela dos impactos observados, enquanto parâmetros como ciclos de concentração e turbidez apresentaram influência secundária. A aplicação dessa ferramenta reforçou o princípio de que grande parte dos problemas pode estar concentrada em um número reduzido de causas.

Gráfico 1 - Gráfico de Pareto com fatores associados à corrosão.



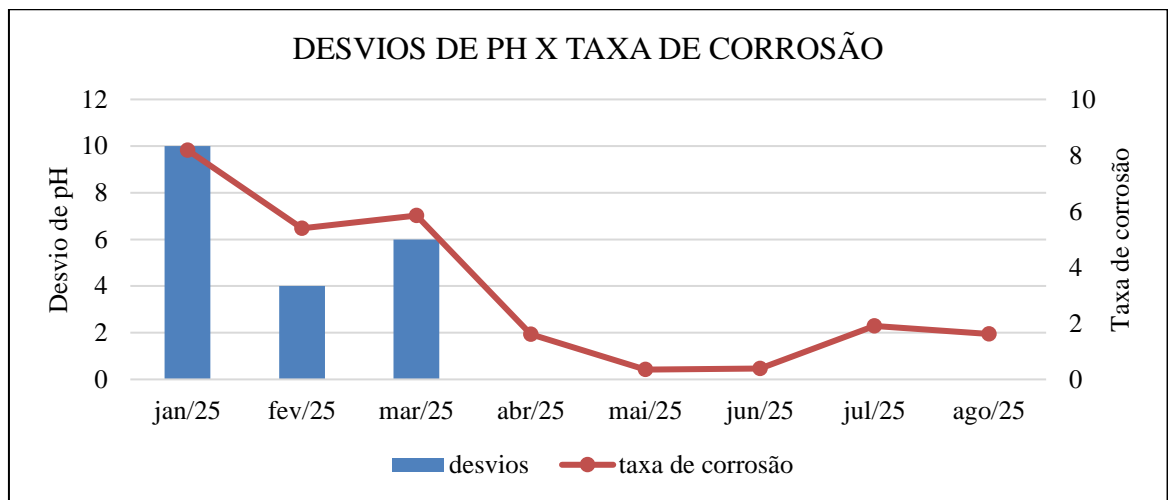
Fonte: OS AUTORES (2025).

Dando sequência à investigação, realizou-se a análise de correlação entre o desvios de pH, cloro livre, média do ciclo de concentração e desvios de turbidez em relação a taxa de

corrosão registrada no sistema, conforme expresso nos Gráficos 2 a 5. Para obtenção desses dados, contabilizou-se a frequência de ocorrência dos desvios e os respectivos valores da taxa de corrosão nos meses em que as investigações foram realizadas.

O Gráfico 2 foi elaborado com base na literatura de Silva e Carvalho (s.d.), na qual é estabelecido que o intervalo ideal de pH situa-se entre 7,5 a 8,5, os desvios considerados corresponderam a valores de pH inferiores ou superiores a esse intervalo.

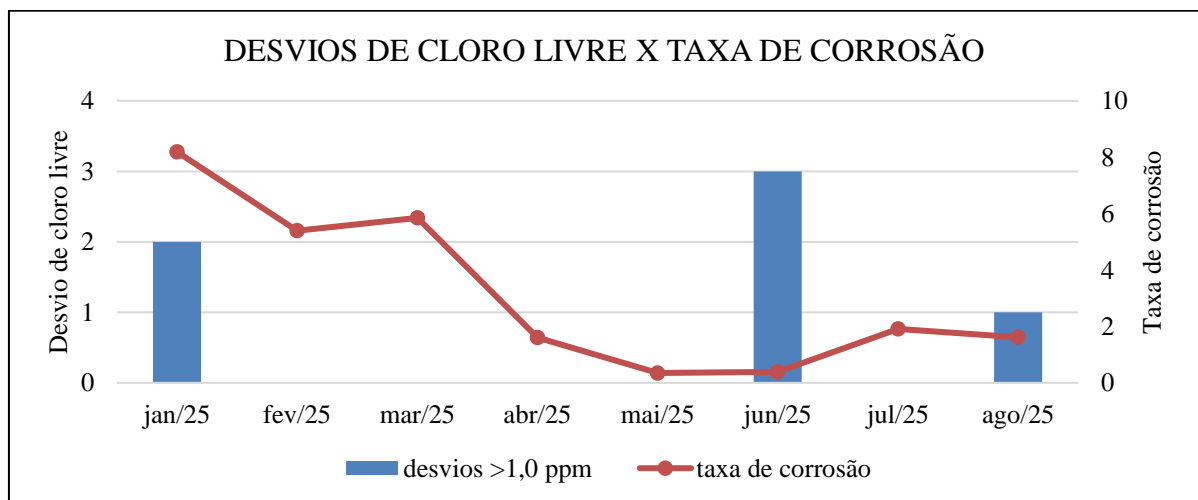
Gráfico 2 - Relação entre desvio de pH e taxa de corrosão.



Fonte: OS AUTORES (2025).

Para a elaboração do Gráfico 3, foram considerados os desvios de cloro livre correspondentes a valores maiores que 1 ppm.

Gráfico 3 - Relação entre desvio de cloro livre e taxa de corrosão.

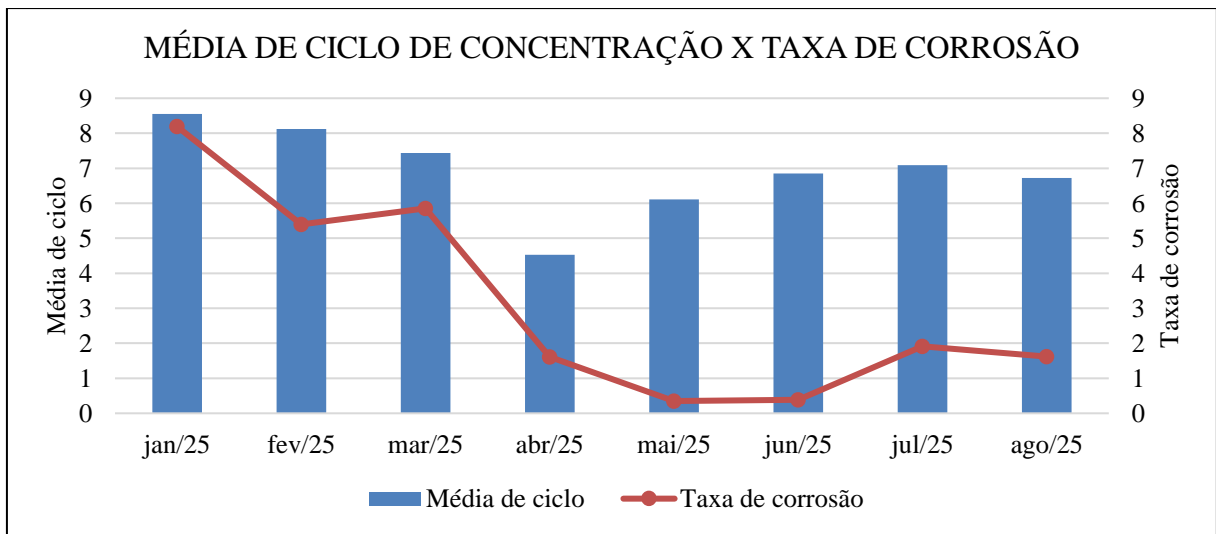


Fonte: OS AUTORES (2025).

Para os desvios apresentados no Gráfico 4, foram contabilizadas as médias de ciclo de

concentração superiores a oito.

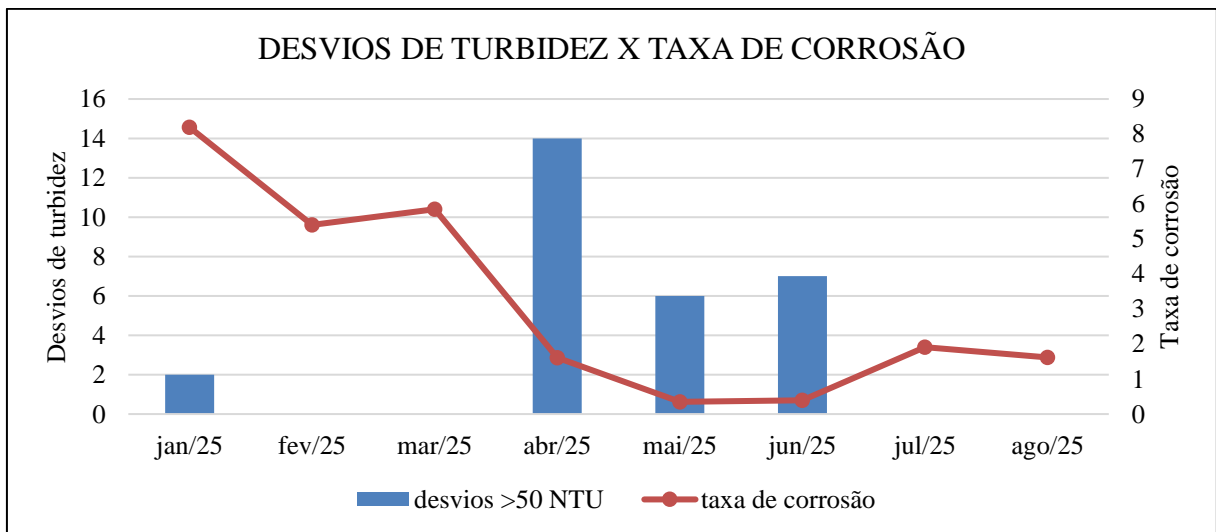
Gráfico 4 - Relação entre desvio de ciclo de concentração e taxa de corrosão.



Fonte: OS AUTORES (2025).

Para a elaboração do Gráfico 5, foram registrados os desvios de turbidez que corresponderam a valores maiores que 50 NTU.

Gráfico 5 - Relação entre desvio de turbidez e taxa de corrosão.



Fonte: OS AUTORES (2025).

A aplicação da Análise de Pareto orientou a priorização das variáveis e, ao cruzar esses resultados com os registros de pH, cloro livre, ciclo de concentração e turbidez, emergiu com clareza que o desvio de pH foi a variável de maior impacto sobre a corrosão registrada no período. Observou-se que os maiores picos de corrosão coincidiram temporalmente com episódios de pH fora da faixa operacional recomendada, isto é, os meses em que o pH

permaneceu elevado apresentaram as maiores taxas medidas pelos cupons de sacrifício, enquanto a normalização do pH foi seguida por redução expressiva na taxa de corrosão. Esse comportamento sugere que a estabilidade do pH é condição necessária para a preservação das camadas passivas protetoras e para a manutenção da integridade dos materiais metálicos no sistema avaliado, mas há respaldo na literatura técnica, que aponta a manutenção do pH em intervalos estreitos como medida fundamental para a proteção de metais em sistemas de resfriamento (Silva; Carvalho, s.d)

As análises das demais variáveis indicaram que nenhuma delas, isoladamente, alcançou a força explicativa observada para o pH, mas todas mantêm papel relevante no contexto operacional por suas interações com o equilíbrio químico do sistema. Por exemplo, o desvio de cloro livre apresentou picos em alguns meses, contudo esses picos não se correlacionaram de forma direta e consistente com aumentos proporcionais na taxa de corrosão ao longo de toda a série temporal. Isso é compatível com o fato de que o efeito agressivo do cloro residual sobre metais tende a se manifestar mais severamente quando combinado com outros fatores desfavoráveis, naturalmente pH fora da faixa ideal ou falhas na estratégia de inibidores, do que quando a dosagem é controlada e acompanhada de proteção química adequada. Assim, o cloro livre funciona como um amplificador de risco, isto é, em condições bem geridas, seu impacto é limitado, enquanto em condições de descontrole, pode acelerar processos corrosivos.

Em paralelo, a média do ciclo de concentração, embora apresente variações ao longo dos meses, não mostrou nos dados analisados uma tendência de produzir saltos imediatos e sistemáticos na taxa de corrosão, isso não invalida sua importância técnica, portanto, elevar os ciclos concentra sais e íons agressivos que, a médio e longo prazo, aumentam a agressividade da água e favorecem mecanismos de corrosão localizada e erosiva. Nos registros do período estudado, entretanto, medidas operacionais de controle, tais como remoção de sólidos, uso de dispersantes e dosagem de inibidores, parecem ter atenuado, temporariamente, os efeitos adversos do aumento pontual de ciclos. A turbidez, por sua vez, evidenciou correlação fraca com a taxa de corrosão na série mensal, embora a turbidez possa contribuir mecanicamente para desgaste e retenção de partículas que favoreçam pontos de ataque, os procedimentos de pré-tratamento e a rotina de limpeza adotados reduziram a manifestação desse efeito em curto prazo.

5 CONCLUSÃO

A leitura integrada dessas análises reforça a utilidade prática das ferramentas da qualidade aplicadas, o *Brainstorming* associado ao Diagrama de Ishikawa permitiu mapear um conjunto amplo de hipóteses, a Análise de Pareto concentrou esforços nas variáveis de maior impacto e os gráficos de dispersão serviram para validar, empiricamente, as correlações observadas. Tal abordagem confirmou a necessidade de priorizar o controle do pH como medida central de mitigação, ao mesmo tempo em que exige uma visão sistêmica, onde controle de cloro livre, gestão de ciclos de concentração e manutenção de baixos níveis de turbidez atuam como complementos necessários para reduzir a vulnerabilidade do sistema. Na prática, isso significa que ações focadas exclusivamente em uma variável têm probabilidade reduzida de sucesso quando as demais permanecem descoordenadas, por outro lado, um programa integrado, baseado em limites operacionais definidos, alarmes claros e procedimentos de resposta rápida, aumenta substancialmente a eficácia das intervenções.

Em termos operacionais, os dados apontam para a necessidade de consolidar procedimentos que assegurem a estabilidade do pH e a sua correlação explícita com as estratégias de dosagem de inibidores e de cloro, bem como para aumentar a vigilância durante períodos sazonais da água de reposição. A priorização de pH no plano de ação não nega a relevância dos outros parâmetros, mas sinaliza que a maior parte da redução potencial da taxa de corrosão, no horizonte temporal avaliado, será obtida com o controle rigoroso desse parâmetro. Ao mesmo tempo, a inclusão das variáveis críticas em uma análise de risco (por exemplo, FMEA) e a aplicação do ciclo PDCA para ajustes rápidos e contínuos asseguram que as ações sejam constantemente refinadas a partir dos resultados operacionais.

Além disso, os resultados obtidos estabelecem uma base metodológica sólida para que investigações futuras possam aprofundar a compreensão dos mecanismos de corrosão em condições operacionais distintas. A estrutura analítica utilizada, combinando medições de campo, correlações estatísticas e ferramentas da qualidade, demonstrou ser eficiente para transformar variáveis dispersas em informações organizadas e comparáveis. Dessa forma, trabalhos subsequentes poderão expandir o escopo para incluir outros parâmetros, métodos laboratoriais complementares, inserção de mais ferramentas de qualidade, períodos de monitoramento mais longos ou diferentes configurações de torre, permitindo que a compreensão do fenômeno evolua gradualmente. Assim, o presente estudo não apenas responde às questões imediatas do sistema avaliado, mas também deixa um caminho

metodológico claro para pesquisadores que desejem aprofundar ou replicar essa análise em contextos semelhantes.

Em conclusão, a investigação realizada entre janeiro e agosto de 2025 fornece base empírica para afirmar que o pH é o fator mais determinante para a taxa de corrosão na torre estudada, enquanto cloro livre, ciclo de concentração e turbidez desempenham papéis secundários, porém complementares, sobretudo quando interagem com desvios de pH ou com falhas na proteção química. A integração das ferramentas da qualidade foi decisiva para transformar dados em prioridades operacionais, ou seja, concentrar esforços nas poucas variáveis críticas, com um programa de monitoramento e resposta bem definido, constitui a estratégia mais eficiente para mitigar a corrosão, prolongar a vida útil dos ativos e melhorar a confiabilidade do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, P. **Ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/369300087_FERRAMENTAS_DA_QUALIDADE_E_NO_GERENCIAMENTO_DE_PROCESSOS. Acesso em: 15 out. 2025.
- BLOG DO APRENDIZ. Disponível em: <https://paulooaprendiz.blogspot.com/2012/03/o-ciclo-pdca-e-melhoria-continua.html>. Acesso em: 15 out. 2025.
- CARAVELA. Disponível em: <https://www.torre-caravela.com.br/torres>. Acesso em: 8 jun. 2025.
- COMPRACO. **Corrosão intergranular do aço inoxidável: compreendendo o básico**. Compraco, 2024. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/industria/corrosao-intergranular-do-aco-inoxidavel-compreendendo-o-basico>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- GASPARONI, A. G.; RODRIGUES, L. M. **Corrosão de estruturas metálicas em águas e sua proteção**. 1 ed. Belém: RFB Editora, 2020.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- IANNUZZI, M.; FRANKEL, G. S. *The carbon footprint of steel corrosion*. npj Materials Degradation, v. 6, p. 101, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00318-1>. Acesso em: 8 jun. 2025.
- INSPENET. *Preventing galvanic corrosion*. Disponível em: <https://inspenet.com/en/articulo/preventing-galvanic-corrosion/>. Acesso em: 8 jun. 2025
- INSTITUTE FOR HEALTHCARE IMPROVEMENT. **Kit de ferramentas essenciais para melhoria da qualidade: Análise dos Modos de Falha e seus efeitos**. Disponível em: https://www.ihl.org/sites/default/files/QIToolkit_FailureModesandEffectsAnalysis.pdf. Acesso em: 8 jun. 2025
- INSTITUTE FOR HEALTHCARE IMPROVEMENT. **Kit de ferramentas essenciais para melhoria da qualidade: diagrama de dispersão**. Disponível em: https://www.ihl.org/sites/default/files/Diagrama-de-Dispersao_Portugu%C3%A7%C3%AAs.pdf. Acesso em: 8 jun. 2025.
- KURITA do Brasil LTDA. **Água de Resfriamento**. Kurita. Disponível em: <https://kurita.com.br/atuacao/produtos-e-servicos/agua-de-resfriamento/>. Acesso em 8 jun. 2025.
- MONTEIRO, F. D. **Diagrama de Ishikawa: a importância da ferramenta na identificação e controle dos impactos negativos dos processos gerenciais de uma organização**. 2022. 40p. Monografia - Centro Universitário Atenas, Paracatu, 2022.
- RADZKOU, A. *Pitting Corrosion*. Disponível em: <https://www.alamy.com/stock-photo/pitting-corrosion.html?sortBy=relevant>. Acesso em: 8 jun. 2025.

RIJEZA METALURGIA. **As formas mais comuns de corrosão metálica**. Disponível em: <https://rijeza.com.br/wp-content/uploads/2020/10/corrosao-metalica-1.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2025.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). **Geração de ideias com *brainstorming***. Disponível em: https://sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Arquivos/ebook_serai_geracao-de-ideias-com-brainstorming.pdf. Acesso em: 8 jun. 2025.

SILVA, D. de O. e; CARVALHO, A. R. P. **Tratamento de água de resfriamento**. Kurita do Brasil LTDA. Disponível em <https://kurita.com.br/artigos-tecnicos/tratamento-de-agua-de-resfriamento/>. Acesso em: 8 jun. 2025.

VEOLIA. **Manual de Tratamento de Água Industrial**. Capítulo 3: Aplicação de métodos de qualidade ao tratamento de água. 2024.

WARREN FORENSICS. ***Stress corrosion cracking of stainless steel in marine environments***. Disponível em: <https://www.warrenforensics.com/2021/01/29/stress-corrosion-cracking-of-stainless-steel-in-marine-environments/>. Acesso em: 8 jun. 2025.