



CEFET-MG

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

BRUNNA RESENDE GUIMARÃES FERREIRA

**TÍTULO: AVALIAÇÃO DE ELETRODOS DE PH UTILIZADOS EM
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

ARAXÁ/MG

2025

BRUNNA RESENDE GUIMARÃES FERREIRA

AVALIAÇÃO DE ELETRODOS DE PH UTILIZADOS EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Duarte Fagundes
Coorientadora: Prof^ª. Dra. Elise Marques Freire Cunha

ARAXÁ/MG

2025

ANEXO VII

ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL DA ALUNA BRUNNA RESENDE GUIMARÃES FERREIRA

Às 19 horas do dia 13 DE FEVEREIRO DE 2025 reuniu-se, na sala 603 do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, Campus Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **AVALIAÇÃO DE ELETRODOS DE PH UTILIZADOS EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. **FREDERICO DUARTE FAGUNDES**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, concedeu a palavra ao candidato, **BRUNNA RESENDE GUIMARÃES FERREIRA**, para a exposição de seu trabalho. Após a apresentação, seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Ultrapassada a arguição, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Após a reunião da Comissão Examinadora, o candidato foi considerado aprovada, obtendo nota final de: 88/100 (oitenta e oito). O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. O aluno, abaixo assinado, declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que devidamente identificada a fonte original. Declara ainda, neste âmbito, não violar direitos de terceiros. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos. O prof. **FREDERICO DUARTE FAGUNDES**, responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso no semestre corrente, lavrou a presente ATA, que, após lida e aprovada, segue assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Araxá, 13 de fevereiro de 2025.

Orientador(a): **FREDERICO DUARTE FAGUNDES**

Assinatura: Frederico Duarte Fagundes

Coorientador(a): **ELISE MARQUES FREIRE CUNHA**

Assinatura: Elise Marques Freire Cunha

Membro da Banca 2: **LUIS PAULO FAGUNDES**

Assinatura: Luis Paulo Fagundes

Membro da Banca 3: **ALINE FERNANDA BIANCO MATTIOLI**

Assinatura: Aline F. B. Mattioli

Aluno(a): **BRUNNA RESENDE GUIMARÃES FERREIRA**

Assinatura: Brunna Resende Guimarães Ferreira

Professor(a) responsável pelos TCCs: **FREDERICO DUARTE FAGUNDES**

Assinatura: Frederico Duarte Fagundes

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por me guiar e fortalecer em todos os momentos desta jornada acadêmica, cheia de momentos inconstantes e altos e baixos, tanto no âmbito pessoal e do curso.

Quero prestar uma homenagem especial e eterna gratidão à memória dos meus queridos avós, Eleusa e Onofre que, mesmo não estando mais presentes fisicamente, deixaram um legado de muito amor, sabedoria e valores que levarei para toda a vida. Suas histórias, carinho e exemplos foram fundamentais para moldar quem eu sou hoje.

Aos meus avós queridos, Ataíde e Marluce que estão presentes em minha vida, oferecendo atenção, conselhos valiosos e sendo exemplos de força e sabedoria.

Aos meus pais, Fabíola e Mansor, pela educação, apoio incondicional, e por acreditarem em mim, nos meus sonhos mesmo nos momentos mais desafiadores. Sem o incentivo, a nossa união e os valores que me ensinaram, esta conquista não seria possível.

À minha irmã, Brendha, por ser minha parceira com seu jeito único, sempre disposta a compartilhar risadas, desafios e conquistas. Sua presença é fonte inestimável de força e inspiração.

Ao meu esposo Vitor, meu companheiro de vida, que sempre esteve ao meu lado em cada momento dessa jornada, oferecendo suporte, palavras de encorajamento nos momentos difíceis, por sua paciência, e incentivo constante. Sua presença foi fundamental para que eu alcançasse essa conquista.

À minha família, minha base inabalável, por todo amor e apoio. Um agradecimento especial aos meus afilhados, cujos sorrisos e carinho são verdadeiras fontes de motivação.

Aos amigos e colegas de curso, por dividirem essa caminhada cheia de aprendizados.

Aos meus professores e orientadores, pela paciência, dedicação e por compartilhar seu conhecimento, que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Muito Obrigada!

EPÍGRAFE

"O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia."

— Robert Collier

RESUMO

Este trabalho aborda a avaliação de eletrodos de pH utilizados em uma estação de tratamento de água, com o objetivo de identificar o modelo mais eficiente em termos de precisão, durabilidade e custo-benefício para aplicação em uma mineradora localizada em Araxá/MG. Para isso, foram testados três modelos distintos de eletrodos: 3250i, 4260i e Pure Water pHure, todos amplamente empregados em processos industriais. A pesquisa foi conduzida ao longo de cinco meses, com medições diárias e calibrações quinzenais. Os eletrodos foram instalados em série, permitindo a comparação direta de suas performances em condições operacionais idênticas. Durante o estudo, a equipe acompanhou a frequência de falhas, a estabilidade das medições e a necessidade de manutenção. Os dados coletados foram analisados com base nos limites de tolerância definidos para o processo, buscando identificar variações críticas nas leituras. O eletrodo 3250i demonstrou melhor desempenho geral, apresentando alta precisão, robustez e menor taxa de falhas. Além disso, sua necessidade de manutenção foi reduzida, refletindo em menores custos operacionais. Em contraste, os modelos 4260i e Pure Water pHure apresentaram maior instabilidade e necessidade de substituições frequentes, comprometendo sua eficiência a longo prazo. Conclui-se que a escolha adequada do eletrodo de pH é crucial para garantir medições confiáveis e reduzir custos operacionais em estações de tratamento de água. O modelo 3250i destacou-se como a melhor opção, devido à sua precisão e durabilidade superiores. Recomenda-se a sua adoção para o monitoramento contínuo de pH, além de treinamentos regulares para as equipes de manutenção e melhorias na infraestrutura de suporte aos eletrodos, com o objetivo de otimizar a eficiência do processo e garantir a qualidade do tratamento da água.

Palavras-chave: Eletrodos de pH. Estação de Tratamento de Água. Custo-benefício.

ABSTRACT

This study focuses on evaluating pH electrodes used in a water treatment plant, aiming to identify the most efficient model in terms of accuracy, durability, and cost-effectiveness for application in a mining facility located in Araxá/MG. Three distinct electrode models were tested: 3250i, 4260i, and Pure Water pHure, all widely employed in industrial processes. The research was conducted over five months, with daily measurements and bi-weekly calibrations. The electrodes were installed in series, allowing direct comparison of their performance under identical operational conditions. Throughout the study, the team monitored failure frequency, measurement stability, and maintenance requirements. The collected data were analyzed based on the tolerance limits defined for the process, aiming to identify critical variations in readings. The 3250i electrode demonstrated the best overall performance, showing high accuracy, robustness, and a lower failure rate. Additionally, it required less maintenance, resulting in lower operational costs. In contrast, the 4260i and Pure Water pHure models exhibited greater instability and frequent replacement needs, compromising their long-term efficiency. The research concludes that the proper selection of pH electrodes is crucial to ensure reliable measurements and reduce operational costs in water treatment plants. The 3250i model stood out as the best option due to its superior accuracy and durability. Its adoption is recommended for continuous pH monitoring, alongside regular maintenance team training and infrastructure improvements to optimize process efficiency and ensure water treatment quality.

Keywords: pH Electrodes. Water Treatment Plant. Cost-effectiveness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do tratamento de água para fins industriais.....	15
Figura 2 - Fluxograma do tratamento de água para fins industriais.....	17
Figura 3 - Exemplo de pHmetro de bancada.....	20
Figura 4 - Exemplo de transmissor de pH da Mettler.....	22
Figura 5 - Eletrodos de pH escolhidos para o estudo.....	29

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 01 – Comparativo entre os eletrodos de pH selecionados para uso durante teste de aplicação na estação de tratamento de água.....	29
Tabela 02 – Tolerância de calibração e valores de mínimo e máximo nas faixas de 4 e 7 pH.....	34
Tabela 03 – Média das verificações diárias por semana para cada eletrodo de pH testado.....	35
Tabela 04 – Resumo dos resultados das verificações diárias.....	36
Tabela 05 – Média das calibrações quinzenais para cada eletrodo de pH testado.....	37
Tabela 06 – Totalizado de trocas dos eletrodos durante o período de cinco meses.....	38
Tabela 07 – Custos totais com cada eletrodo de pH durante os 5 meses.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
A/D	Analógico/Digital
ETA	Estação de Tratamento de Água
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IHM	Interface Homem-máquina
NBR	Norma técnica Brasileira
MRC	Material de Referência Certificado
mV	milivolts
mg/L	miligrama por litro
mA	miliampère
mm	milímetros
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

H^+	Íons de Hidrogênio
OH^-	Ânion hidroxila
HCO_3^-	Bicarbonatos
CO_3^{2-}	Carbonatos
$CaCO_3$	Carbonato de Cálcio
$\log 10$	Função logarítmica
$M\Omega$	Mega Ohms
$^{\circ}C$	Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Estação de tratamento de água.....	15
2.2	Conceito de pH.....	17
2.2.1	Importância da medição de pH.....	19
2.3	Eletrodo de pH.....	20
2.4	Transmissor de pH.....	21
2.5	Solução tampão	23
2.6	Calibração.....	24
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	Levantamento dos dados na empresa	25
3.2	Seleção dos eletrodos de pH.....	27
3.3	Ajustes nas plantas de produção.....	29
3.4	Aferição de pH e verificação da integridade dos equipamentos	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento preciso do pH é fundamental para avaliar a qualidade da água em diversos processos industriais, especialmente na mineração, onde a qualidade da água e dos rejeitos afeta diretamente a eficiência operacional e o meio ambiente.

O pH indica o nível de acidez ou alcalinidade da água, através da quantificação do potencial hidrogeniônico de uma solução. Ele é determinado pela concentração de íons de hidrogênio (H^+) e serve para medir o grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade de determinada solução, com valores que variam de 0 a 14 (BACCAN, 2001).

De acordo com a Resolução CONAMA 357/05(2), Níveis de pH fora da faixa ideal podem corroer tubulações, comprometer sistemas de irrigação e afetar a eficiência de tratamentos dos fluidos.

Um eletrodo de pH é a parte sensível (sensora) de um instrumento. De maneira simples, o pH é medido através da diferença de potencial elétrico entre o eletrodo de medida (ou meia célula de medida) e o eletrodo de referência (ou meia célula de referência). Essa diferença de potencial (mV) é convertida ao valor proporcional de pH (DIGIMED, 2022).

A forma mais precisa e rápida para realizar a análise de pH é através do eletrodo tipo íon seletivo, que de forma resumida, é um sensor com um bulbo de vidro seletivo ao íon H^+ . Essa metodologia é relativamente simples e pode ser realizada em laboratório, campo ou de maneira on-line. Esta última, permite a automação do processo industrial trazendo maior confiabilidade ao processo e economia na dosagem de produtos químicos. Abaixo falaremos das aplicações de pH no setor de meio ambiente e utilidades e suas características (DIGIMED, 2022).

A maioria dos eletrodos de pH são fabricados com o corpo externo de vidro, amplamente utilizados devido à sua precisão e confiabilidade, e por ser um material inerte. Outros materiais como de kynar e poliacetal podem ser utilizados caso o vidro não seja o mais adequado para a amostra (DIGIMED, 2022). A escolha adequada do eletrodo é essencial para assegurar resultados consistentes e minimizar a necessidade de manutenção frequente. A medição de pH utilizando eletrodo de vidro vem sendo amplamente utilizada nas empresas (GALSTER, 1991).

A escolha do eletrodo de pH mais adequado não só garante medições mais precisas, como também minimiza os custos operacionais associados à manutenção e substituição frequente desses eletrodos.

O estudo foi realizado em virtude das queixas e contínuas trocas de eletrodos de pH por quebra, desgaste em períodos curtos de uso do equipamento e recorrência nos chamados para realizar as calibrações.

O objetivo geral deste trabalho foi comparar o desempenho de três modelos de eletrodos de pH, avaliando qual deles oferece a melhor eficiência em relação às condições operacionais da mineradora localizada no município de Araxá. Dessa forma, foram identificadas as vantagens e limitações de cada tipo de eletrodo, foi analisado o impacto das condições locais nas medições de pH e foi avaliado os custos associados à manutenção e substituição dos eletrodos.

O objetivo final do trabalho é encontrar o melhor eletrodo de pH para o processo de tratamento de água da empresa mineradora, considerando os fatores de precisão, estabilidade e vida útil dos sensores. Com isso, viabilizamos a manutenção de um estoque estratégico e funcional, e reduzimos custos operacionais decorrentes de compras emergenciais.

O método utilizado para esta pesquisa foi a comparação direta entre três eletrodos de pH, realizada sob as mesmas condições de operação. Por meio de verificações diárias de suas medições e calibração periódica foi possível realizar a comparação dos resultados que permitiu identificar qual dos eletrodos apresenta melhor desempenho em termos de precisão, durabilidade e resistência, visando determinar o modelo com o melhor custo-benefício para as condições operacionais da mineradora.

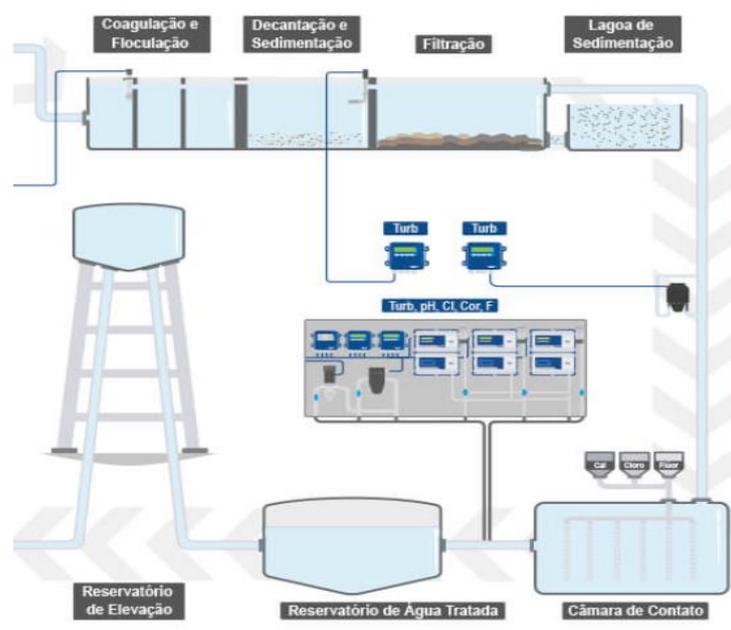
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estação de tratamento de água

A água desempenha um papel fundamental no processo produtivo da indústria, sua qualidade higiênico-sanitária exerce influência direta nos produtos produzidos e, portanto, deve apresentar características que assegurem a sua qualidade, necessitando passar por um procedimento em uma Estação de Tratamento de Água (ETA) (SIMENSATO; BUENO, 2019). Esse procedimento tem como objetivo transformar a água bruta proveniente de rios, lagos ou barragens em água potável, por meio de processos químicos, físicos ou uma combinação de ambos, o resultado desse processo é conhecido como água tratada (AL-OMARI; KHAN; JAAFAR, 2020).

Na figura 01, podemos observar o processo de tratamento de água exemplificado. Vale ressaltar que as medições relevantes para avaliar a qualidade da água tratada são realizadas ao final do processo.

Figura 01 - Fluxograma do tratamento de água para fins industriais



Fonte: DIGIMED. Aplicações Industriais para o pH (2022).

O tratamento da água designada ao consumo humano tem por objetivo básico fazer com que essa água seja segura, do ponto de vista de potabilidade, ou seja, o tratamento da água tem a finalidade de retirar as impurezas prejudiciais e nocivas à saúde. Dessa maneira, para designar a tecnologia de tratamento para obtenção da água potável, deve-se realizar análises microbiológicas e físico-químicas na água bruta, para definir suas características e as alterações que ela está sujeita devido aos fenômenos naturais (LIBÂNIO, 2010).

Além disso, essas análises também são importantes após o tratamento da água para a verificação da sua qualidade e durante sua distribuição e, principalmente, nos reservatórios particulares, pois ela pode estar sujeita a contaminação devido à vedação inadequada das caixas d'águas e pela falta de controle na limpeza (YAMAGUCHI et al., 2013).

Souza (2007) retrata estação de tratamento como uma unidade do sistema de abastecimento de água responsável pelo enquadramento da água a ser fornecida a população nos padrões de potabilidade. Basicamente, quando se define o tratamento de água, entende-se que é uma sequência de operações que, associadamente, consistem em melhorar suas características organolépticas, físicas, químicas e bacteriológicas, a fim de que se torne apropriada para o consumo humano.

De acordo com Von Sperling (2015), as ETAs industriais priorizam a adequação da água às necessidades específicas do processo fabril, enquanto as ETAs para consumo humano focam na segurança e qualidade da água destinada à população, garantindo a ausência de contaminantes prejudiciais à saúde.

O tratamento da água para fins industriais ocorre em seis etapas distintas: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e, opcionalmente, neutralização (CESAN, 2013). O Fluxograma apresentado na figura 02 representa o sequenciamento dessas etapas no tratamento de água para uso industrial.

Figura 02 - Fluxograma do tratamento de água para fins industriais

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

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

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

2.2 Conceito de pH

O potencial hidrogeniônico (pH), por meio da quantificação de íons hidrogênio (H^+), define a intensidade da acidez ou da alcalinidade da água. A variação do pH ocorre por origem natural através da dissolução de rochas, fotossíntese ou antropogênicas como resíduos domésticos e industriais (BRASIL, 2006).

O pH é um número que descreve o grau de acidez (H^+) ou de alcalinidade (OH^-) de uma solução, definido pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) como o logaritmo negativo da atividade do íon hidrogênio (ASTM, 2002). Os dois íons, cátions hidrogênio (H^+) e ânion hidroxila (OH^-) são formados pela ionização da água (Campbell e Campbell, 1986). Existem três tipos gerais de compostos iônicos: ácidos, bases e sais, sendo o foco deste trabalho os ácidos e bases.

Soluções ácidas possuem maior número de íons hidrogênio dissociados (livres), que íons hidroxila e as soluções básicas apresentam mais íons hidroxila que hidrogênio livre; quando o número de íons se iguala, as soluções são ditas neutras. Segundo Sheppard e Guiseppi-Elie (1999), o pH é usado para especificar o grau de acidez e basicidade de uma solução aquosa e foi definido pela Equação de Sørensen, equação 1, proposta em 1909, como sendo o logaritmo negativo da concentração do íon H^+ , para facilitar o manuseio de pequena concentração desse íon em uma dada solução.

$$pH = \log- [H]^+ \quad (\text{eq. 1})$$

Dessa forma, substâncias diferentes são objetivamente comparadas entre si, sendo pH entre 0 e 6,9 característicos de substâncias ácidas, pH entre 7,1 e 14 de substâncias alcalinas e pH igual a 7 característico das substâncias neutras. Com as exigências da tecnologia e da ciência moderna de uma definição exata de valores de pH experimental forçaram o abandono da definição de Sørensen e sua reformulação. Observou-se que, na verdade, não é a concentração do íon hidrogênio que determina o grau de acidez ou de basicidade da solução, mas sim sua atividade. Sørensen e Linderström-Lang propuseram uma nova definição e, então, o pH passou a ser representado pela atividade iônica (a_{H^+}), como mostra a equação 2 (HÖFFNER, 1998; BAUCKE, 2002).

$$pH = -\log a_{H^+} \quad (\text{eq. 2})$$

A alcalinidade é responsável por indicar a quantidade de íons presentes na água capaz de neutralizar os H^+ . Os bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos (OH^-) são os principais constituintes da alcalinidade de corpos de água (BRASIL, 2006). As três formas de alcalinidade na água estão relacionadas com o pH: pH > 9,4 presença de hidróxidos e carbonatos; pH entre 8,3 e 9,4 carbonatos e bicarbonatos e pH entre 4,4 e 8,3 presenças de bicarbonatos (SPERLING, 2017).

A alcalinidade também tem importância no tratamento da água, nos processos de coagulação e floculação. As substâncias alcalinas reagem com a acidez do coagulante, para a obtenção de pH ótimo e, dessa forma, favorece boas condições para a formação de flocos (BRAGA, 2014). Geralmente, as águas naturais apresentam valores de alcalinidade de 30 a 500 mg/L de CaCO_3 (BRASIL, 2006).

Um dos parâmetros mais utilizados para a análise de água corresponde à determinação potenciométrica do pH, utilizando-se eletrodo de vidro. A competência dos laboratórios em medir pH de águas, assim como outros parâmetros está fundamentada na norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 (2005).

2.2.1 Importância da medição de pH

No contexto da maioria dos processos industriais e analíticos, é crucial o controle de diversas variáveis, como vazão, pressão, condutividade, turbidez, entre outras. A medição do pH desempenha um papel fundamental na obtenção de alguns produtos, como bebidas, cosméticos, medicamentos, entre outros. Um desvio em relação ao pH desejado pode impactar significativamente as características do produto final.

Além disso, o monitoramento do pH contribui para a proteção de pessoas e materiais no ambiente de trabalho, bem como para a preservação dos equipamentos, evitando danos estruturais, como corrosão e o acúmulo de material nas tubulações. A adequação do pH também se reflete na redução dos custos de produção e no atendimento a exigências regulatórias, como aquelas aplicadas em estações de tratamento de água.

A adequação do pH em uma estação industrial reduz custos de diversas maneiras ao otimizar processos e preservar equipamentos. Manter o pH dentro de faixas específicas aumenta a eficiência de reações químicas, reduzindo o consumo de produtos químicos e energia. Além disso, o controle adequado do pH evita a formação de incrustações e corrosão em tubulações, bombas e trocadores de calor, prolongando a vida útil dos equipamentos e minimizando os gastos com manutenção e substituições.

O pH tem grande importância durante o tratamento da água, pois ele está relacionado com a eficiência dos processos de coagulação, floculação, filtração e desinfecção. Além de ser importante o seu controle após o tratamento, para garantir que não ocorra corrosão ocasionada pelo pH baixo e formação de incrustações possibilitadas pelo pH elevado nas tubulações (SPERLING, 2017).

O despejo industrial refere-se aos resíduos líquidos gerados em processos produtivos, que podem conter substâncias químicas tóxicas, metais pesados, óleos, gorduras e outros poluentes. O valor do pH dos despejos industriais podem ser muito ácido ou muito alcalino. Nos sistemas de abastecimento industrial para resfriamento e em caldeiras, águas com valores baixos de pH tendem a ser corrosivas ou agressivas a certos metais e paredes de concreto, enquanto águas com valor elevado de pH tendem a formar incrustações (BERNARDO; BERNARDO; CENTURIONE, 2002).

2.3 Eletrodo de pH

O pHmetro é um medidor de potencial hidrogeniônico (pH), indicado para medir acidez ou alcalinidade de alguma amostra. O pHmetro é composto por uma sonda (eletrodo) conectada a um circuito de acondicionamento de sinal que possibilita a conversão do valor de potencial do eletrodo em unidades de pH, pois quando o eletrodo é submerso na amostra a ser medida ele produz milivolts que são transformados na escala de pH, onde -414mV corresponde ao $\text{pH} = 0$ e $+414\text{mV}$ corresponde ao $\text{pH} = 14$ (VOGEL, 1986).

Figura 03 - Exemplo de pHmetro de bancada



Fonte: <https://www.splabor.com.br/blog/phmetro/o-que-e-um-phmetro-de-bancada-guia-do-comprador/>

Os eletrodos de vidro são eletrodos seletivos a íons nos quais a membrana sensível ao íon é uma película fina de vidro especial em que na interface membrana-líquido surge uma diferença de potencial proporcional à atividade do íon hidrogênio na solução (VOGEL, 1986). O eletrodo de pH necessita cumprir com os requisitos estabelecidos em normas como possuir resistência máxima de $300 \text{ M } \Omega$ a 25°C , conforme a JIS Z 8805 (JIS, 1989) e o ponto zero estabelecido para o correspondente valor de pH da solução-tampão (detalhada na seção 2.4) (BS, 1993; DIN, 1989).

As medidas potenciométricas sempre devem ser feitas com dois eletrodos, sendo que um deles deve ser um eletrodo que tenha um potencial constante e estável em função do tempo, independente das propriedades da solução no qual está imerso. Este eletrodo é denominado eletrodo de referência, o qual será sempre o fator de comparação do eletrodo indicador.

O eletrodo combinado caracteriza um tipo específico em que o eletrodo de vidro para medição, o eletrodo referência e o sensor de temperatura são construídos dentro de uma mesma estrutura física (Buck et al., 2002; JIS, 1989). O eletrodo de vidro combinado é o mais utilizado para medida de pH porque seu potencial não é afetado pela presença de agentes oxidantes e redutores e tem a vantagem de poder ser operado numa larga faixa de pH. Consiste em um corpo de vidro selado, dotado de uma membrana de vidro na forma de um bulbo na sua extremidade inferior (eletrodo indicador) e contendo internamente uma solução diluída de HCl em contato com um fio de prata recoberto com cloreto de prata ($\text{Ag}^\circ/\text{AgCl}$), o qual funciona como uma referência interna do eletrodo indicador. Essa referência interna é que vai responder à diferença de potencial da membrana devido à variação na concentração dos íons H^+ na solução a ser medida. (ANDRADE, 2011).

Ele é uma alternativa prática e de fácil manuseio em comparação com a utilização de dois eletrodos separados. Este dispositivo é essencialmente composto por uma parte externa de vidro, que é sensível ao pH, enquanto sua parte interna abriga o eletrodo de referência e o eletrólito correspondente.

2.4 Transmissor de pH

O transmissor de pH é o dispositivo responsável por converter o sinal elétrico do sensor em um sinal padrão, adequado para sistemas de automação e controle. Normalmente são equipamentos eletrônicos instalados bem próximos aos sensores de pH, instalados no processo.

Dessa forma, o sinal de milivolts gerado pelo sensor é amplificado e convertido em uma faixa padrão bem comum nos sistemas de controle (4 a 20 mA), como aplicado nessa estação onde foi realizado o estudo descrito, devido sua robustez contra interferências eletromagnéticas e precisão em longas distâncias.

Figura 04 - Exemplo de transmissor de pH da Mettler.



Fonte: METTLER TOLEDO. BA pH Transmitter 2100e FF: Manual do Transmissor de pH 2100e FF. 1. ed. 2007.

Este sinal do transmissor é recebido no PLC (Controlador lógico programável), que realiza o processamento das informações para tomadas de decisões automáticas, anteriormente definidas de acordo com os limites de erro aceitáveis nas medições. O PLC possui módulos de entrada analógicos para receber o sinal do transmissor de pH.

O processo de recepção do sinal é feito da seguinte forma: em caso de sinais analógicos, como o de 4 a 20 mA, o PLC realiza a conversão A/D (Analógico para Digital) para transformar o sinal elétrico em um valor digital que pode ser processado pelo controlador. Neste caso, o valor recebido é convertido para unidade de pH. Como exemplo, na estação de tratamento de água que foi realizado o estudo, o sinal de 4mA representa o pH 0 e o 20mA, representa o pH de 14.

O valor do pH é armazenado em um registrador interno do PLC, ficando disponível para o sistema de controle, supervisão e registro de valores de pH ao longo do tempo, possibilitando o armazenamento de dados para análises posteriores do resultado das análises por período. Dessa forma, pode ser monitorada para verificar se está dentro da faixa desejada. Quando o pH

obtido está fora dos limites aceitáveis estabelecidos previamente, o PLC aciona alarmes visuais e envia notificações para o sistema supervisório.

O sistema supervisório é uma interface homem-máquina (IHM) que permite aos operadores de produção monitorar e controlar os processos industriais. Além do monitoramento, sendo um sistema automático em sua maioria, ele pode tomar ações corretivas e preventivas para garantir o controle eficiente do processo produtivo.

2.5 Solução tampão

A solução tampão MRC (Material de Referência Certificado) para pH é uma solução padrão de alta precisão usado para calibração de instrumentos, como eletrodos de pH, em medições laboratoriais e industriais. Desenvolvida para oferecer estabilidade e confiabilidade, essa solução é formulada com componentes de alta pureza e possui um pH certificado em condições específicas de temperatura. É amplamente utilizada em estações de tratamento de água, laboratórios químicos e indústrias, garantindo que os equipamentos estejam devidamente ajustados e as medições sejam precisas e rastreáveis, atendendo aos requisitos de controle de qualidade. (CONTROLLAB, 2024).

Solução tampão é a preparação à base de sais que são capazes de suportar variações na atividade de íons hidrogênio. É uma mistura de um ácido fraco ou base fraca e sua respectiva base conjugada ou ácido conjugado, na qual a mistura possui capacidade de resistir a variações no pH decorrente de diluições. Os tampões são utilizados em inúmeras situações quando é desejável manter o pH sob níveis predeterminados (SKOOG et al.,2006).

Por definição, se uma solução-tampão tem um valor de pH determinado e conhecido (padrão), o pH de outra solução-tampão pode ser determinado a partir desta. A escala de pH é vinculada à definição da solução-tampão padrão e atribuindo-se um valor de pH a ela (VOGEL,1986).

Com o uso das soluções-tampão com pH determinado, um instrumento de medição pode ser calibrado e o pH de uma solução desconhecida medido, sendo que quanto mais próximas as soluções-tampão estiverem do valor desconhecido do pH da solução, melhor será a exatidão da medição e menor será o erro de não-linearidade (BATES E COVINGTON, 1968).

2.6 Calibração

A calibração pode ser definida como sendo um procedimento experimental através do qual são estabelecidas sob condições específicas, as relações entre os valores indicados por um instrumento de medição ou valores representados por uma medida materializada e os valores correspondentes a estas grandezas, estabelecidos por padrões reconhecidos por entidades legalmente credenciadas (WIKA, 2023).

Para a realização dos testes de calibração normalmente são criadas ferramentas de apoio para calibrar, nomeadamente: procedimentos de calibração, folhas de registros específicas, definição de critérios de aceitação, definição dos elementos mensuráveis e registo dos resultados obtidos (RODRIGUES, 2012).

A calibração de equipamentos é crucial para assegurar a qualidade e a confiabilidade das medições em qualquer aplicação. Um processo de calibração bem executado não apenas melhora a precisão dos dados obtidos, mas também contribui para a eficiência operacional e a conformidade com normas e regulamentos aplicáveis.

Antes de iniciar a calibração de pH, é essencial preparar adequadamente o ambiente de trabalho. O eletrodo de pH deve ser inspecionado para garantir que está em bom estado de funcionamento e os acessórios, como sensores e eletrodos, devem estar limpos e corretamente instalados. As condições ambientais, como temperatura e umidade, também devem ser controladas, pois podem influenciar a precisão das medições. Além disso, é importante garantir que as soluções padrão ou materiais de referência utilizados na calibração estejam dentro do prazo de validade e devidamente armazenados (METTLER TOLEDO, 2007).

A calibração requer o uso de padrões de referência ou soluções tampão com valores conhecidos e certificados. Estes padrões devem ser escolhidos com base na faixa de medição do equipamento e na precisão necessária. Para a calibração de um pHmetro, por exemplo, são utilizadas soluções com pH conhecido e certificado. É crucial preparar as soluções de acordo com as recomendações do fabricante e garantir que estejam a uma temperatura estável, conforme exigido (METTLER TOLEDO, 2007).

O procedimento de calibração começa com a verificação inicial do desempenho do equipamento, assegurando que está funcionando corretamente e que as leituras estão estáveis. O equipamento é então submetido a medições com os padrões de referência. No caso de um pHmetro, o eletrodo é submerso em soluções tampão com pelo menos dois valores de pH distintos. O equipamento é ajustado para que as leituras correspondam aos valores conhecidos

das soluções tampão. Dependendo do tipo de equipamento, a calibração pode ser realizada manualmente ou de forma automática, com a assistência de software específico (METTLER TOLEDO, 2007).

Se durante o processo de calibração forem identificados problemas, como discrepâncias nas medições ou falhas no equipamento, é necessário realizar ações corretivas. Isso pode envolver reparos no equipamento, substituição de componentes ou ajuste das condições ambientais. A resolução de problemas deve ser documentada e o equipamento deve ser recalibrado após qualquer intervenção significativa (METTLER TOLEDO, 2007).

No próximo capítulo deste trabalho, será apresentada a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa, detalhando os procedimentos, técnicas e ferramentas utilizadas para a coleta e análise dos dados. Essa seção é fundamental para compreender a abordagem sistemática que sustentou a investigação, permitindo uma avaliação crítica dos resultados obtidos e garantindo a transparência do estudo.

3 METODOLOGIA

3.1 Levantamento dos dados na empresa

A metodologia desenvolvida neste trabalho diz a respeito à análise de melhor aplicação dos eletrodos de pH, na Estação de Tratamento de Água de uma empresa Mineradora de Araxá/MG. O trabalho foi desenvolvido de forma multidisciplinar por algumas equipes da empresa, incluindo o setor de Metrologia, Calibração, e pela equipe de Produção da área de Tratamento de águas.

As Estações de Tratamento de Água podem ser identificadas como uma infraestrutura projetada para tratar e purificar a água captada de fontes naturais ou reservas de águas utilizadas nas indústrias, com objetivo de torná-la adequada para consumo humano ou industrial. Tem como objetivo garantir que a água atenda aos padrões de qualidade exigidos por órgãos reguladores, eliminando contaminantes físicos, químicos e biológicos que possam prejudicar à saúde ou comprometer os processos industriais.

Para o controle de qualidade da água são realizadas análises periódicas que monitoram através da utilização de parâmetros essenciais nesse processo as características do corpo d'água tanto na captação, que é quando ela chega para ser processada, quanto quando sai para uso novamente. Entre estes parâmetros, pode-se citar como indispensáveis a análise de turbidez, cloro residual, condutividade e acidez ou alcalinidade da água por meio da determinação do pH.

O setor de calibração levantou a necessidade de avaliação do uso e manuseio dos eletrodos, como tentativa de solucionar os problemas encontrados no setor de tratamento de água da empresa, e conseqüentemente reduzir custos, talvez desnecessários. O setor de metrologia, não menos importante, teve grande atuação no acompanhamento das medições e análises realizadas. A equipe de produção teve forte atuação no registro dos dados durante todo o período de teste, acompanharam de perto todos os resultados obtidos, analisando os desvios e diferenças das medições realizadas nos analisadores de pH.

Os eletrodos de pH são sensores que medem a concentração de íons hidrogênio (H^+) da água em tempo real, gerando uma diferença de potencial elétrico que é proporcional ao pH da solução. Esse sinal elétrico, geralmente em milivolts (mV) é bastante sensível e é processado antes de ser utilizado em sistemas de automação. O sensor de pH normalmente é instalado em locais estratégicos do processo, garantindo que haja o mínimo de erros experimentais possíveis.

Nos experimentos descritos a seguir, os eletrodos foram inseridos diretamente no sistema de tratamento de água, localizados tanto no início do circuito de tratamento de água, quanto na etapa final de tratamento.

Conforme descrito acima, o controle de pH é um dos procedimentos essenciais para a análise de qualidade da água na Estação de Tratamento. Entretanto, os registros de quebra constante e desgaste nos eletrodos, dificultavam o processo de análise e registro de dados, pois erros experimentais não trazem confiabilidade às medições.

Na primeira etapa do estudo, foi realizado um levantamento de todos os problemas encontrados quanto ao uso dos eletrodos de pH na entrada e saída do sistema de tratamento de água. Com o objetivo de realizar um levantamento eficaz desses problemas, foi realizado um *brainstorming* com as equipes envolvidas nos processos de análise de parâmetro. A equipe de calibração foi acompanhada durante a realização de suas calibrações periódicas e a equipe de produção durante as verificações diárias.

A segunda etapa realizada foi uma avaliação minuciosa em campo, onde foi observado como e onde os sensores de pH haviam sido instalados. A localização do sensor de pH no processo é crucial para obter medições representativas e precisas, no entanto o eletrodo precisa estar instalado em um local onde a amostra seja bem homogênea, o fluxo de solução deve ser constante para evitar a alteração nas leituras e também turbulência, podendo danificar o eletrodo e causar erros nas medições. Para a condição da Estação de Tratamento de Água, a melhor opção é que o eletrodo fosse instalado diretamente na tubulação que transporta a água em tratamento, também conhecida como *Inline*.

Também foi avaliado o posicionamento do eletrodo quanto a orientação, de forma vertical com a parte do bulbo de vidro voltado para baixo, para evitar bolhas de ar na junção do eletrodo. Quanto a profundidade de imersão, o eletrodo deve estar completamente imerso na solução, evitando que fique exposto ao ar, para que não gere erros experimentais. Quanto a estes parâmetros citados acima, as instalações estavam corretas e adequadas ao processo.

Conforme mencionado anteriormente, no processo de tratamento de água da empresa, já tinha instalado um eletrodo de pH na entrada do processo e um eletrodo na saída. Para a ocasião de testes e ensaios, foi realizada uma modificação na linha de entrada. Essa modificação deve-se ao fato de que são utilizados para o estudo, três eletrodos distintos, instalados em série, para o comparativo entre suas performances.

A instalação serial permitiu a comparação entre a performance dos três eletrodos selecionados em um ponto comum do processo, na mesma linha e bem próximos, para o

monitoramento da linearidade das medições, visando um comparativo entre elas, sendo que na teoria, não poderiam apresentar divergências em suas respectivas leituras.

3.2 Seleção dos eletrodos de pH

Para a seleção dos três eletrodos de pH utilizados, foi realizada uma análise criteriosa das características físico-químicas de cada modelo utilizado. A escolha envolveu a aplicação de diversos critérios de filtragem. Na primeira etapa, com o objetivo de padronizar os modelos empregados na empresa, foram considerados apenas os eletrodos já cadastrados no sistema interno e disponíveis no estoque.

Essa escolha dos eletrodos de pH cadastrados no sistema e disponíveis em estoque foi realizada devido a avaliação de quais já são empregados em demais linhas de produção de outras áreas e essa escolha trouxe grandes vantagens, como: facilidade na manutenção dos equipamentos, pois as equipes técnicas já possuíam conhecimento técnico sobre os equipamentos utilizados, reduzindo assim erros operacionais durante a instalação, verificação e calibração; treinamento simplificado e pontual, já que a maioria dos técnicos já haviam sido treinados e orientados no manuseio dos eletrodos.

Além disso, considerando que o eletrodo de pH já estava disponível em estoque, isso evitaria atrasos nas trocas. Quando uma troca urgente se faz necessária, o item estando imediatamente disponível, sem a necessidade de compras emergenciais, eliminaria custos exacerbados, que poderiam ser significativamente elevados devido à urgência da aquisição, tarifas adicionais de frete expresso e possíveis reajustes de preços por demanda emergencial, além da complexidade logística associada à obtenção de novos equipamentos. Esse estoque estratégico garante que, em situações críticas, o processo de substituição do eletrodo seja rápido e eficiente, evitando interrupções no processo de análise da qualidade da água.

Foi realizada uma avaliação da quantidade de eletrodos de pH de cada marca no estoque, juntamente com os respectivos transmissores de sinal disponíveis, permitindo a seleção de eletrodos compatíveis com os transmissores que já estavam em estoque. Essa compatibilidade é essencial para garantir que as medições de pH sejam precisas e confiáveis, além de facilitar a instalação e integração no sistema existente, reduzindo a necessidade de ajustes ou investimentos em novos equipamentos. Dessa forma, a empresa pode garantir maior consistência no desempenho do sistema de medição e controle de pH, mantendo a eficiência operacional e a redução de custos associados à manutenção e substituição de equipamentos.

Foram escolhidos três eletrodos de pH da marca Metler Toledo, conhecidos pela sua qualidade e confiabilidade em análises de processos industriais. A escolha da marca foi baseada no modelo do transmissor utilizado no local. Os modelos selecionados foram o InPro 3250i. Este modelo é ideal para medições de pH em ambientes agressivos, oferecendo alta resistência à contaminação e a variações de temperatura. Seu design robusto é adequado para processos com flutuações rápidas nos parâmetros da amostra (água) e condições extremas.

O segundo escolhido foi InPro 4260i, um eletrodo de pH projetado para processos industriais exigentes, como aqueles com altas concentrações de sólidos ou líquidos viscosos. Ele combina alta estabilidade nas medições com a capacidade de resistir a condições difíceis, proporcionando medições precisas e consistentes ao longo do tempo. E o terceiro eletrodo escolhido foi o modelo Pure Water pHure ISM. Este modelo é especialmente indicado para aplicações em sistemas de água pura ou de alta pureza, garantindo precisão nas medições de pH em ambientes controlados. O design ISM (Intelligent Sensor Management) oferece monitoramento inteligente e manutenção preditiva, otimizando a vida útil do eletrodo e a confiabilidade das medições. Abaixo segue as fotos dos eletrodos de pH escolhidos, 3250i, 4260i e pHure ISM, dispostos respectivamente. A figura 05 ilustra os diferentes eletrodos utilizados na pesquisa.

Figura 05 - Eletrodos de pH escolhidos para o estudo



A Tabela 01 apresenta informações básicas de cada eletrodo de pH selecionado, as quais também estão disponíveis no manual de cada modelo no site do fabricante.

Tabela 01 – Comparativo entre os eletrodos de pH selecionados para uso durante teste de aplicação na estação de tratamento de água

Características/Modelo	3250i	4260i	Pure Water pHure
Digital ou Analógico	Digital	Digital	Digital
Faixa de leitura (pH)	0 – 14	0 – 14	1 - 11
Tamanho do sensor (mm)	120	120	120
Material do corpo	Vidro	Vidro	Vidro
Solução interna	Platina	Platina	
Temperatura (°C)	0 - 100	0 - 130	0 - 80
Sistema de referência	Eletrólito líquido, diafragma de cerâmica e íons de prata	Eletrodo com polímero Xerolyt, junção dupla aberta e íons de prata	Eletrólito em gel
Aplicados em	Processos químicos, e processos de água	Processos químicos, e processos de água	Processos químicos, e processos de água
Custo (R\$)	2500,00	3250,00	3420,00

Esses modelos foram escolhidos com base em suas características específicas, que atendem às necessidades de estabilidade, resistência e precisão na análise das amostras no processo de tratamento da água, além de sua compatibilidade com os transmissores de sinal, itens de estoque e a infraestrutura já existente na empresa.

3.3 Ajustes nas plantas de produção

Após a seleção dos eletrodos, foi realizada uma visita em campo com a equipe de melhoria de manutenção, composta por projetistas experientes em otimizações e pequenos ajustes nas plantas de produção. Durante a visita, foram avaliadas possibilidades para a instalação de dois novos pontos de medição na tubulação, garantindo que não houvesse interferência nas leituras dos eletrodos nem impactos no funcionamento da linha de processo.

A adequação foi concluída com a disponibilização de dois novos pontos de inserção de eletrodos, permitindo a comparação das medições e a verificação da precisão no mesmo ponto do processo. Além disso, foi dimensionado um ponto de coleta próximo a essa região, viabilizando o uso de um analisador de pH portátil como referência, caso surjam dúvidas quanto à confiabilidade das medições realizadas.

Por questões de definição, pode-se afirmar que, diferentemente do transmissor de pH, o analisador de pH é um equipamento portátil que realiza medições utilizando eletrodos de pH. Sua principal função é converter o sinal elétrico enviado pelo eletrodo em uma leitura direta do valor de pH, exibida no próprio dispositivo. A grande diferença em relação ao transmissor é que o analisador não possui comunicação integrada com PLC para controle remoto ou monitoramento em salas de controle, sendo utilizado principalmente para medições locais e pontuais, sem a necessidade de integração em sistemas automatizados, sendo utilizados como uma referência a mais para análise das medições obtidas.

A instalação dos eletrodos foi realizada imediatamente, permitindo o início do processo de comparação da performance e das leituras dos instrumentos. Para garantir a confiabilidade dos dados, foram estabelecidos critérios específicos para o acompanhamento de cada eletrodo. O primeiro passo consistiu em avaliar como as verificações diárias estavam sendo conduzidas pela equipe de produção. Essa análise contou com o suporte da equipe de metrologia, responsável por validar os procedimentos e assegurar que as medições seguissem os padrões estabelecidos.

Diante deste cenário, foi elaborado um novo procedimento, detalhado e abrangente, para garantir que o processo de verificação das medições dos eletrodos de pH fosse mais confiável e padronizado. Além disso, foi identificada a necessidade de realizar um treinamento completo com todas as equipes de produção responsáveis por essa atividade. O objetivo principal do treinamento foi melhorar a performance das medições, assegurando uniformidade nos resultados, independentemente de quem as executasse. Outro aspecto crucial abordado no treinamento foi o manuseio adequado dos eletrodos de pH, destacando boas práticas que

contribuíssem para a redução de danos, quebras e falhas decorrentes de manipulação do eletrodo incorreta ou descuidada. Embora o treinamento e o novo procedimento tenham sido identificados como pontos essenciais para a melhoria do processo, esses não foram parte integrante deste TCC, mas sim um desdobramento observado durante a análise do tema.

Com toda a equipe devidamente treinada e capacitada para realizar as medições, foi iniciado o acompanhamento sistemático das verificações diárias e a análise dos resultados das calibrações realizadas com os equipamentos. Para garantir a eficiência e a confiabilidade desse processo, foram estabelecidas diretrizes gerais, abrangendo critérios de aceitação, frequências das calibrações, registro de dados coletados e a realização de cálculos médios a partir das verificações diárias. Esse método permitiu reduzir o volume de dados brutos, mantendo informações suficientes para facilitar a interpretação dos resultados e embasar futuras tomadas de decisão de forma precisa e eficiente.

3.4 Aferição de pH e verificação da integridade dos equipamentos

A verificação diária dos eletrodos de pH é uma prática fundamental para garantir a precisão e confiabilidade das medições industriais. Essa atividade foi realizada pela equipe de produção da empresa mineradora, de forma a assegurar que os resultados obtidos estivessem dentro dos parâmetros estabelecidos. Os dados obtidos neste procedimento foram registrados, criando assim um histórico para consulta de todos os envolvidos e interessados, principalmente para avaliação de tendências e desempenho por um longo tempo.

Para facilitar as análises e evitar muitas informações, a equipe adotou uma prática simplificada. Avaliou-se o tempo aproximado que os eletrodos começavam a sofrer variações em suas leituras, e com isso em vez de trabalhar com os dados diariamente mensurados, foi realizado um cálculo da média semanal dos valores obtidos nas verificações diárias. Essas médias proporcionaram uma visão concisa a respeito da performance dos eletrodos e facilitou na tomada de decisões.

A calibração, outra prática extremamente importantes para os testes realizados com os eletrodos de pH, consiste em um procedimento para garantir a precisão e confiabilidade das medições. Este procedimento envolve o uso de soluções padrão de pH conhecidas, para certificar que os eletrodos de pH estariam funcionando dentro dos limites de tolerância exigidos. No processo de testes dos eletrodos foi utilizado uma periodicidade quinzenal entre as calibrações, para um controle e acompanhamento criterioso, que assegura que todas as variáveis

relevantes fossem observadas e avaliadas e que atende às demandas do fabricante em relação ao período para realizar calibração.

A frequência quinzenal foi definida com base na necessidade de um equilíbrio entre a periodicidade das avaliações e a eficiência do processo. Esse intervalo de tempo é suficiente para observar tendências e avaliar a evolução de indicadores, sem ser tão curto a ponto de sobrecarregar a equipe com análises constantes, nem tão longo a ponto de perder a capacidade de intervenção imediata.

A precisão e exatidão das medições realizadas pelos eletrodos de pH é essencial pois os sensores podem sofrer desgaste, o que pode acarretar medições imprecisas e com grandes variações. Dessa forma, o procedimento de calibração, pode identificar estes desvios, garantindo a melhor performance do eletrodo.

Os limites de tolerância são parâmetros críticos que definem a faixa aceitável de variação em medições e nos resultados obtidos, que possam garantir que os equipamentos atendam a padrões de qualidade e asseguram que as medições sejam confiáveis e utilizáveis para tomadas de decisão.

Para definir os limites de tolerância, é levado em consideração os parâmetros analisados no processo e consiste em determinar qual valor de erro é tolerável de forma que não cause impacto no resultado final. Outro requisito que é levado em consideração são as especificações do equipamento pelo fabricante, que registram a precisão e exatidão dos sensores, permitindo assim que as tolerâncias estejam alinhadas com as especificações de fábrica.

Nas verificações diárias dos eletrodos de pH, a equipe de produção usa como parâmetro o limite de tolerância definida para o processo, que estabelece a faixa aceitável de variação das medições. Por outro lado, as calibrações quinzenais dos eletrodos de pH, adotam 1/3 da tolerância definida no processo. Quando limites inferiores foram definidos, pode-se detectar e corrigir erro menores, que poderiam até passar despercebidos nas verificações e causar problemas maiores de desvios.

Dessa forma, a combinação entre os limites de tolerância, usada na verificação mais ampla em conjunto com a tolerância de calibração, com faixa bem inferior, ajudou a manter altos padrões de qualidade e eficácia no processo de tratamento de água.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O eletrodo utilizado no processo antes dos testes apresentava a necessidade de substituições frequentes, com um intervalo médio de apenas 10 dias entre as trocas. Diante desse cenário, tornou-se imprescindível a revisão dos procedimentos, realização de treinamentos e a escolha do modelo de eletrodo de pH que deveria empregado, optando por uma solução mais robusta e adequada às condições variáveis da água tratada.

Ao investigar essa alta frequência de troca, observou-se que as verificações realizadas pela operação não seguiam um procedimento claro e não eram acompanhadas de treinamentos adequados para as equipes. A verificação da operação, que sempre foi feita diariamente, tinha como principal objetivo aumentar o intervalo de calibração, monitorando a performance do equipamento. Não se tratava apenas de uma falha das equipes, mas também da necessidade de se considerar que a calibração exige a emissão de certificados, o que não seria necessário realizar diariamente.

O estudo realizado identificou que, com uma verificação diária e calibração a cada 15 dias, seria possível garantir a precisão do processo sem comprometer a eficiência. Esse intervalo de 15 dias foi determinado após uma análise abrangente de toda a indústria, estabelecendo um equilíbrio entre a frequência da calibração e a eficácia na manutenção dos equipamentos.

Junto com a equipe de produção da Estação de Tratamento de Água e a equipe de calibração, iniciaram-se os testes e calibrações planejadas, com o objetivo de coletar dados que fornecessem informações claras sobre o desempenho de cada eletrodo em avaliação no local.

Conforme mencionado anteriormente, as verificações foram realizadas diariamente pela equipe de produção, seguindo um procedimento rigorosamente detalhado para evitar erros de medição causados por descuidos. Caso fossem detectadas medições divergentes, já era sabido pela equipe de produção que poderiam estar relacionadas ao tipo de eletrodo utilizado ou a alguma condição específica da água que passava pelo local no momento da medição.

As avaliações da aplicação dos três eletrodos de pH foram realizadas ao longo de cinco meses consecutivos, período considerado ideal para analisar o desempenho de cada eletrodo em teste e identificar o mais adequado para aplicação na linha de tratamento de água. Para evitar um volume excessivo de dados, decidiu-se utilizar a média semanal dos valores obtidos nas verificações diárias.

Nesse contexto, os dados foram registrados em uma planilha Excel para a realização de cálculos e análises métricas, permitindo o acompanhamento das medições realizadas e do

comportamento de cada eletrodo ao longo do tempo. Conforme mencionado anteriormente, os limites de tolerância de processo foram definidos, e de acordo com essa definição, considerou-se os limites do fabricante quanto aos eletrodos empregados para definir a tolerância da calibração.

As verificações diárias, conforme o procedimento estabelecido, foram realizadas utilizando apenas um valor de pH conhecido, ou seja, uma única solução tampão é empregada para a calibração do eletrodo, sendo o valor escolhido de pH 7,0.

A tolerância do processo foi previamente definida como um erro permitido de 10% para as verificações diárias. Considerando que a faixa de pH utilizada para as medições foi de 7,0, os valores mínimo e máximo aceitáveis foram estabelecidos em 6,3 e 7,7, respectivamente. Dessa forma, se o valor medido estiver dentro dessa faixa, a medição é considerada aceitável; caso contrário, indica um possível problema no eletrodo ou na amostra.

A tolerância de calibração, definida como menor que a tolerância do processo, tem o objetivo de aumentar a confiabilidade tanto no processo quanto na calibração e nos ajustes, quando necessários. Essa tolerância reduzida em 1/3 do valor da tolerância do processo permite que pequenos erros identificados durante a calibração sejam corrigidos de forma antecipada, prevenindo desvios significativos nas medições diárias e nas medições do próprio processo.

Com base na tolerância de calibração, 1/3 da tolerância do processo, foi possível obter as faixas aceitáveis de leitura para os valores de pH. Para a calibração com a solução padrão de pH 4,0, a faixa aceitável é entre 3,88 e 4,12 pH. Já para a calibração com a solução padrão de pH 7,0 pH, a faixa vai de 6,79 a 7,21 pH. A tabela 02 descreve estes valores calculados.

Tabela 02 – Tolerância de calibração e valores de mínimo e máximo nas faixas de 4 e 7 pH

Tolerância	%	Valor da solução de pH	Faixa de leitura permitida (pH)	
			Valor mínimo	Valor máximo
Tolerância de calibração	3	7,0	6,79	7,21
		4,0	3,88	4,12

A Tabela 03 apresenta os dados das médias semanais das verificações diárias realizadas ao longo de cinco meses, totalizando vinte valores para comparação, para cada eletrodo utilizado nos testes. Cada valor corresponde à média semanal calculada a partir de sete leituras realizadas ao longo da respectiva semana. Na tabela 03, a primeira coluna indica a semana em que as verificações foram realizadas, a segunda coluna apresenta o valor do padrão de solução de pH utilizado e as colunas três e quatro exibem os valores mínimo e máximo aceitáveis como

faixa de erro permissível para as verificações. As leituras marcadas como 0 indicam que o eletrodo foi danificado durante a verificação diária em algum dia da semana mencionada. Os valores destacados em vermelho são aqueles que estavam fora da tolerância aceitável.

Tabela 03 – Média das verificações diárias por semana para cada eletrodo de pH testado

Média das verificações diárias (pH)						
Semana	Valor do pH	Tolerância aceitável		Modelo do eletrodo		
		Valor mínimo	Valor máximo	3250i	4260i	Pure Water
1ª semana	7,0	6,3	7,7	7,01	7,03	6,99
2ª semana				7,05	6,99	6,78
3ª semana				7,04	6,64	6,97
4ª semana				7,06	0	7,88
5ª semana				7,03	7,04	0
6ª semana				0	6,22	7,01
7ª semana				7,01	7,01	0
8ª semana				7,1	7,03	7,4
9ª semana				7,08	7,15	0
10ª semana				7,07	0	7,06
11ª semana				7,04	6,98	7,97
12ª semana				0	7,04	0
13ª semana				7,04	7,03	7,03
14ª semana				7,06	0	7,01
15ª semana				7,01	6,68	0
16ª semana				7	0	5,99
17ª semana				0	7,77	7,04
18ª semana				6,99	6,99	0
19ª semana				7,78	7,01	6,99
20ª semana				7,05	0	7,01

Os resultados obtidos na tabela 03 mostram que a média semanal das verificações realizadas foi satisfatória, mas apresentou alguns desvios dentro da tolerância aceitável.

Após a coleta dos valores das verificações diárias, foi elaborada a tabela 04, que permite comparar o desempenho de cada modelo de eletrodo. A tabela resume o número de quebras registradas, quantas leituras ficaram fora da faixa de tolerância estabelecida e quantas leituras foram satisfatórias ao processo e aos limites pré-estabelecidos.

Tabela 04 – Resumo dos resultados das verificações diárias

Modelo do eletrodo	3250i	4260i	PureWater
Quebras na verificação	3	5	6
Leitura fora dos limites	1	2	3
Leitura dentro dos limites	16	13	11

Os dados apresentados na Tabela 04 indicam um número significativo de quebras de eletrodos durante as verificações, evidenciando a necessidade de uma análise mais aprofundada das causas desse problema. Esse cenário sugeriu duas ações estratégicas importantes, como a revisão constante e reforço de treinamento da equipe envolvida, apresentando melhor manuseio do eletrodo durante a verificação. Além disso, foi essencial envolvimento com a equipe para compreender os desafios enfrentados no manuseio dos eletrodos, que foi identificado a falta de um local adequado para o condicionamento dos equipamentos nos intervalos entre as medições. Em contrapartida, os resultados obtidos mostram que a média semanal das verificações realizadas foram satisfatórias, mas apresentou alguns desvios dentro da tolerância aceitável.

Para garantir que a calibração seja confiável e efetiva, são selecionados, no mínimo, dois valores de pH para medição. No processo de tratamento de água, os valores escolhidos foram pH 7,0 e pH 4,0. Para cada um desses valores, são realizadas quatro medições, assegurando maior precisão e confiabilidade no equipamento.

A Tabela 05 apresenta a média dos valores de pH nas duas faixas de pH (4 e 7), obtidos durante a calibração na semana indicada, para cada eletrodo utilizado nos testes. A primeira coluna corresponde à semana em que a calibração foi realizada, a segunda coluna exibe o valor padrão da solução utilizada, e as colunas três e quatro indicam os limites mínimo e máximo toleráveis para as calibrações. As colunas subsequentes mostram os resultados obtidos para cada modelo de eletrodo de pH. As calibrações foram realizadas quinzenalmente, conforme o procedimento padrão previamente estabelecido e o plano de calibração existente na empresa.

Tabela 05 – Média das calibrações quinzenais para cada eletrodo de pH testado

Média das calibrações quinzenais (pH)						
Semana	Valor do pH	Tolerância aceitável		Modelo do eletrodo		
		Valor min.	Valor máx.	3250i	4260i	PureWater
1ª semana	7,0	6,79	7,21	7,01	7,03	7,06
3ª semana				7,05	7,09	6,55
5ª semana				7,03	7,01	6,99
7ª semana				6,88	7,88	7,12
9ª semana				6,95	7,03	6,99
11ª semana				6,79	7,12	7,06
13ª semana				6,65	7,05	7,04
15ª semana				7,03	7,06	6,66
17ª semana				7,05	6,55	7,03
19ª semana				7,25	7,09	7,05
1ª semana	4,0	3,88	4,12	3,99	3,99	4,03
3ª semana				4,05	4,22	4,42
5ª semana				3,86	3,99	4,01
7ª semana				4,02	4,01	4,03
9ª semana				4,03	3,98	4,05
11ª semana				4,07	4,02	3,99
13ª semana				3,76	4,05	3,88
15ª semana				4,01	3,86	3,64
17ª semana				3,99	3,75	4,01
19ª semana				4,15	4,03	4,01

A análise detalhada dos dados registrados na Tabela 5 durante as calibrações periódicas revelou resultados preocupantes sobre o desempenho dos eletrodos avaliados. O modelo 3250i apresentou cinco medições fora dos limites de tolerância aceitáveis. Dentre essas ocorrências, três substituições foram realizadas devido ao desgaste identificado. Entretanto, foi possível recuperar duas das leituras problemáticas mediante ajustes e calibrações subsequentes, garantindo o retorno à operação satisfatória do eletrodo.

O modelo 4260i também apresentou problemas significativos, com cinco leituras fora dos parâmetros aceitáveis. Desses episódios, quatro exigiram a substituição do eletrodo, evidenciando dificuldades em manter a confiabilidade das medições.

O cenário mais crítico foi observado no modelo PureWater, que apresentou quatro medições fora das especificações. Em todas essas situações, não houve possibilidade de recuperação ou ajustes corretivos, tornando indispensável a substituição de todos os eletrodos que apresentaram as leituras fora dos limites de tolerância. Esse desempenho insatisfatório

ocorreu ao longo de apenas cinco meses de testes, indicando uma baixa durabilidade e resistência desse modelo em condições operacionais reais de teste.

Após coletar os dados e elaborar tabelas de resumo para compreender o desempenho de cada modelo de eletrodo de pH utilizado, foi elaborada uma tabela final (Tabela 06) consolidando todas as trocas realizadas, tanto durante as verificações quanto nas calibrações. Essa tabela apresenta a soma total de trocas de eletrodos ocorridas ao longo de um período de cinco meses, resultando nos seguintes dados.

Tabela 06 – Totalizado de trocas dos eletrodos durante o período de cinco meses

Modelo do eletrodo	3250i	4260i	PureWater
Trocas por desgaste	3	4	2
Trocas por leitura fora	1	2	3
Trocas por quebra	3	5	6
Soma das trocas	7	11	11

Ao término das medições realizadas e dos resultados obtidos, foi feito um comparativo dos custos associados a cada eletrodo de pH, considerando que o custo é um fator relevante tanto para o processo quanto para a manutenção. Além disso, trocas excessivas e constantes de eletrodos podem gerar instabilidades no processo, comprometendo a confiabilidade nos resultados fornecidos.

A tabela 07 apresenta o valor unitário de cada modelo de eletrodo utilizado nos testes, juntamente com o número de trocas realizadas durante o período de análise. Com base nisso, foi calculado o valor total gasto com cada modelo de eletrodo de pH.

Tabela 07 – Custos totais com cada eletrodo de pH durante os 5 meses

Modelo do eletrodo	3250i	4260i	PureWater
Soma das trocas	7	11	11
Valor unitário do eletrodo	R\$ 2.500,00	R\$ 3.250,00	R\$ 3.420,00
Valor total investido por eletrodo	R\$ 17.500,00	R\$ 35.750,00	R\$ 37.620,00

Os resultados obtidos revelam que, embora todos os modelos de eletrodos tenham cumprido sua função de medir o pH, a escolha do modelo influencia significativamente na eficiência e na confiabilidade do processo de tratamento de água. A análise considerou a precisão das medições, refletida nas leituras dentro dos limites de tolerância durante as verificações e calibrações realizadas. Em relação à durabilidade e necessidade de manutenção, esses aspectos estão associados à robustez do eletrodo, que consiste em seu bom desempenho,

ao material de revestimento e à sua resistência ao processo. A seguir, são apresentados os resultados e a comparação entre os modelos de eletrodos de pH testados.

O eletrodo 3250i demonstrou maior precisão nas medições de pH, mantendo notável estabilidade ao longo do período de uso. As leituras foram consistentes e dentro dos padrões esperados, apresentando uma taxa de erro reduzida, em torno de 23%. Este modelo destacou-se por sua resistência e robustez, evidenciada pelo menor índice de quebras ou necessidade de substituição durante os cinco meses de operação, reduzindo mais de 40% as trocas referente ao eletrodo anterior utilizado. Além disso, mostrou alta resistência a contaminações, evitando desgastes físicos e impedindo a mistura da água do processo com o eletrólito do eletrodo no ambiente de tratamento. A necessidade de manutenção foi inferior à dos demais modelos testados, consolidando o 3250i como uma opção eficiente e confiável para processos contínuos e exigentes.

O eletrodo 4260i apresentou precisão moderada nas medições, mas com algumas variações discrepantes que atenderam parcialmente aos limites de tolerância, sem alcançar a exatidão e repetibilidade exigidas pelo processo de tratamento de água. A estabilidade das medições foi inferior à do modelo 3250i. Apesar de demonstrar uma vida útil aceitável, o 4260i exigiu substituições mais frequentes devido ao desgaste da membrana e a um aumento de leituras incorretas, com uma taxa de erro 13% superior à do 3250i. Em termos de resistência a quebras, o desempenho foi razoável, mas o modelo mostrou maior suscetibilidade a contaminações externas e demandou manutenção mais frequente para garantir a precisão nas medições.

O modelo Pure Water pHure apresentou precisão aceitável, mas com uma taxa de erros mais alta em comparação ao 3250i e equivalente à do 4260i. A estabilidade das medições foi comprometida por variações ao longo do período de uso. Este eletrodo demonstrou baixa durabilidade e instabilidade necessitando várias trocas nos cinco meses de operação, devido ao desgaste da junção ocasionadas por mudanças abruptas no pH da água, com alto grau de impurezas. Flutuações como turbidez, condutividade ou até mesmo a temperatura, afetaram diretamente a precisão das medições de pH.

O sensor mostrou pouca resistência, o que impactou negativamente sua confiabilidade a longo prazo. Além disso, o Pure Water pHure foi menos resistente a contaminações e apresentou um alto índice de leituras fora do padrão, exigindo manutenção frequente devido ao grande número de quebras. Essas características limitam sua adequação para aplicações que demandam monitoramento contínuo e confiável.

A análise comparativa entre os três eletrodos de pH revelou que o modelo 3250i se destacou como o mais eficiente e confiável para aplicações em estações de tratamento de água. Sua combinação de alta precisão, estabilidade consistente e durabilidade superior o torna a melhor opção para processos de tratamento, onde a precisão nas medições é crucial para o controle adequado da entrada e saída da água tratada.

A escolha do eletrodo 3250i para a estação de tratamento de água é recomendada com base nos resultados obtidos, evidenciando sua superioridade em termos de performance e confiabilidade em comparação com os modelos 4260i e Pure Water pHure.

O custo total utilizado para instalação e troca dos eletrodos, também foi um fator significativo para definição da melhor tecnologia a ser mantida e aplicada ao processo. Além de ter menor custo unitário, também apresentou menores trocas, e com isso, menor custo total, em comparação aos demais modelos, com uma redução de mais de 50% de custo em relação ao eletrodo anterior.

Dessa forma, avaliando as características de cada eletrodo aplicado, observando poucas diferenças, o Pure Water, não seria o ideal, por não apresentar tamanha robustez, como o 3250i ou até mesmo o 4260i, devido a variações e dinâmica do processo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação dos eletrodos de pH utilizados em uma estação de tratamento de água revelou ganhos valiosos sobre a eficácia e a adequação de diferentes modelos de sensores em condições operacionais reais. Foram analisados três tipos de eletrodos: 3250i, 4260i e Pure Water Phure, com um foco particular na precisão das medições, durabilidade, resistência e necessidade de manutenção.

Os resultados da avaliação demonstraram que o eletrodo 3250i apresentou o melhor desempenho geral em comparação com os outros modelos. Com alta precisão nas medições e estabilidade consistente ao longo do período de cinco meses, o 3250i se destacou pela sua robustez e durabilidade. A menor taxa de erros e a resistência a condições adversas confirmaram que este modelo é altamente confiável para aplicações que requerem monitoramento contínuo e preciso do pH.

Este desempenho pode ser atribuído à sua robustez e resistência a contaminações, características que são cruciais em ambientes de tratamento de água onde a confiabilidade das medições é essencial (GARCIA et al., 2022).

Em contraste, o eletrodo 4260i e o Pure Water Phure mostraram limitações em termos de estabilidade e durabilidade. O 4260i teve uma taxa de erros mais alta e exigiu uma troca após três meses devido ao desgaste, enquanto o Pure Water Phure apresentou uma maior necessidade de manutenção e teve uma vida útil menor, com mais substituições necessárias durante o período de avaliação. Esses fatores indicam que, embora ambos os modelos sejam adequados para certas aplicações, eles não oferecem o mesmo nível de confiabilidade e durabilidade que o 3250i nas condições estabelecidas pela empresa.

Baseado nas observações e análises realizadas, foram identificados vários pontos de melhoria para otimizar o uso dos eletrodos de pH, sendo recomendado a adoção de sistemas de monitoramento automatizado para permitir uma verificação contínua e em tempo real das medições dos eletrodos. O uso de software de análise de dados e o treinamento adicional da equipe podem ajudar a detectar problemas precocemente e a reduzir a necessidade de manutenção frequente.

A implementação de copos de leitura removíveis e suportes ajustáveis pode minimizar a necessidade de remover os eletrodos do processo. A introdução de um sistema de conexão rápida e o uso de materiais mais resistentes e fáceis de limpar para os suportes e recipientes de leitura podem aumentar a eficiência da manutenção e reduzir o tempo de inatividade.

A análise conclui que o eletrodo 3250i é a melhor opção para o monitoramento de pH em uma estação de tratamento de água, devido à sua superioridade em precisão, estabilidade e durabilidade. A implementação das melhorias propostas pode otimizar ainda mais o desempenho dos eletrodos e a eficiência do processo de tratamento de água. A escolha cuidadosa do eletrodo e a adoção de práticas de manutenção eficazes são fundamentais para garantir a qualidade do processo e a confiabilidade das medições, assegurando o sucesso e a eficiência contínua das operações de tratamento de água.

A confiabilidade do eletrodo de pH é um fator crítico para garantir a precisão e a estabilidade das medições, o que, por sua vez, afeta diretamente a eficácia do processo de tratamento de água. A escolha de um eletrodo confiável, como o 3250i, não só assegura a qualidade das medições, mas também reduz a frequência de manutenção e o impacto nas operações, otimizando o processo de tratamento e assegurando a conformidade com os padrões de qualidade (SILVA et al., 2023).

REFERÊNCIAS

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

ANDRADE, João Carlos de. **Química analítica básica: os instrumentos básicos de laboratório**. Rev. Chemkeys, Campinas, SP, n. 11, p. 1-14, nov. 2011. ISSN 2595-7430.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 17025: **Requisitos Gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração**, Rio de Janeiro, 2005.

BACCAN, N., Andrade, J.C., Godinho, O.E.S, Barone, J.S. **Química Analítica Quantitativa Elementar**, Editora E. Blücher, 3a. edição, 2001.

BAUCKE FGK. **New IUPAC recommendations on the measurement of pH – background and essentials**. Anal Bioanal Chem 2002; 374:772-77.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Brasília, DF, 212 p. 2006.

BERNARDO, L.; BERNARDO, A.; CENTURIONE, P. L. Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em ETA. São Carlos: Rima, 2002. 237 p.

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

CAMPBELL J. Campbell M. **Matemáticas de laboratório**. Aplicações médicas e biológicas. 3º ed. São Paulo: Roca; 1986. 341p.

CESAN. Companhia Espírito-Santense de Saneamento. **Tratamento da água**. 2013. Disponível em: www.cesan.com.br Acesso em 18 de janeiro de 2025, às 18:30h.

CONTROLLAB. **MRC Solução Tampão para pH**. Disponível em: <https://controllab.com/programa/mrc-solucao-tampao-para-ph/>. Acesso em: 12 nov. 2024.

DIGIMED. **O que é eletrodo de pH?**. 2022 Disponível em: www.digimed.ind.br Acesso em 30 de janeiro de 2025, às 19:30h.

DIGIMED. **Aplicações Industriais para o pH**. 2022 Disponível em: www.digimed.ind.br
Acesso em 26 de Janeiro de 2025, às 22:50h.

DIN: Deutsches Institut für Normung. DIN 19263 - **Glass electrodes for pH measurement**.
Germany: DIN; 1989. 3p.

DND QUÍMICA. **Ficha técnica sulfato de alumínio**. 2022. Disponível em:
dndquimica.com.br.

ENGLAND, British Standards. BS 3145 - **Specification for laboratory pH meter**. England
and Wales: BS; 1993. 14p.

HÖFFNER E. The measurement of pH in high purity water. Oxy Guard International A/S
Denmark.1998.

JAPAN, Japanese Industrial Standard. JIS Z 8805 - **Glass electrodes for measurement of pH**.
Japan:JIS; 1989. 10p.

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

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3 ed. Campinas: Átomo, 2010.

METTLER TOLEDO. **BA pH Transmitter 2100e FF: Manual do Transmissor de pH 2100e
FF**. 1. ed. 2007. Disponível em:
https://www.mt.com/dam/mt_ext_files/Editorial/Generic/0/BA_pH_Transmitter_2100e_FF_Editorial-Gen/eric_1097738401140_files/ba_ph_transmitter2100effpt52121251jan07.pdf.

Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. **Conselho Nacional de Meio Ambiente**.
Disponível em: Acesso em: 8 out. 2010.

SHEPPARD NFJr. Guiseppi-Elie A. pH measurement. In: Webster JG, editor. **The
measurement, Instrumentation and Sensors Handbook on CD-Rom**. New York: CRC Press
LLC; 1999.

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

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

SKOOG, D.A.; WEST, D.M. e HOLLER, F.J. **Fundamentals of analytical Chemistry**. 8° ed. Nova Iorque: Saunders College, 2006. p. 236-249.

SOUZA, Walterler. **Tratamento de Água**. Natal, Rio Grande do Norte. CEFET/RN, 2007.

SPERLING, M.V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2017, v. 37, n. 3, p. 312–320, 2013.

USA, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 70- **Standard test method for pH aqueous solutions with the glass electrode**. EUA:ASTM; 2002. 6 p.

VOGEL A.Vogel: **Análise inorgânica quantitativa; incluindo análise instrumental elementar**. Trad. de Espínola, A.4.ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara;1986. 690 p.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do tratamento de água**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2015.

WIKA. **Definindo parâmetros para a calibração de instrumentos**. Blog da WIKA, 27 jul. 2023. Disponível em: blog.wika.com

YAMAGUCHI, M.U.; CORTEZ, L.E.R.; OTTONI, L.C.C.; OYAMA, J. Qualidade microbiológica da água para consumo humano em instituição de ensino de Maringá PR. Mundo da Saúde, São Paulo.



CÓPIA DO TRABALHO Nº 30/2025 - DELMAX (11.57.05)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 21/02/2025 21:14)

*FREDERICO DUARTE FAGUNDES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: ###071#5*

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: 30, ano: 2025, tipo: **CÓPIA DO TRABALHO**, data de emissão: 21/02/2025 e o código de verificação: ee190f7957