

TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LATICÍNIOS PARA REUSO

Carlos Manoel Lopes da Silva, Guilherme Henrique Dias de Souza Vicente, Matheus de Oliveira Cruz, Victor Tomaz dos Santos, Prof. Dr. Wellington Batista de Sousa, Prof. Me. Pedro Adolfo Galani.

Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo
carlosmanoel0828@gmail.com, guilherme.vicente4@fatec.sp.gov.br, matheusdeoliveiracruz4@gmail.com,
victortomaz2@gmail.com, wellington.sousa5@fatec.sp.gov.br, pedro.galani@fatec.sp.gov.br

RESUMO: A indústria de laticínios, embora fundamental para a economia, é responsável pela geração de grandes volumes de efluentes com elevada carga orgânica, o que exige soluções eficazes para tratamento e reuso. Este estudo propõe a automação do processo de tratamento de efluentes de laticínios por meio da eletrofloculação, integrando tecnologias como sensores, Soft PLC, algoritmos de programação, atuadores e sistema supervisão. A metodologia compreendeu pesquisa bibliográfica, que contribuiu na análise de parâmetros físico-químicos e na elaboração de um protótipo automatizado voltado ao controle e monitoramento do processo. Resultados de pesquisas correlatas apontam que a eletrofloculação apresenta elevada eficiência na emulsão, remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica, enquanto a automação contribui para a otimização do processo, redução de custos operacionais e aumento da confiabilidade. Conclui-se que a integração entre automação e tratamento eletroquímico constitui uma alternativa sustentável, de forma inovadora, tecnicamente viável e promissora para o reuso de efluentes na indústria de laticínios.

Palavras-chave: Automação. Eletrofloculação. Processo. Sustentabilidade.

ABSTRACT: The dairy industry, although fundamental to the economy, is responsible for generating large volumes of effluents with high organic loads, which requires effective solutions for treatment and reuse. This study proposes the automation of the dairy effluent treatment process through electroflocculation, integrating technologies such as sensors, Soft PLC, programming algorithms, actuators, and supervisory systems. The methodology included a literature review, which contributed to the analysis of physicochemical parameters and the development of an automated prototype aimed at controlling and monitoring the process. Results from related research indicate that electroflocculation shows high efficiency in emulsion, removal of suspended solids, and organic matter, while automation contributes to process optimization, reduction of operational costs, and increased reliability. It is concluded that the integration between automation and electrochemical treatment constitutes a sustainable alternative, in an innovative, technically feasible, and promising way for the reuse of effluents in the dairy industry.

Keywords: Automation. Electroflocculation. Process. Sustainability.

1. Introdução

O índice de industrialização é uma das formas de acompanhamento do crescimento de um país. Contudo, verifica-se que em países industrializados, a poluição gerada durante todo o seu processo de produção tem se tornado cada vez mais preocupante. Um setor que se destaca é a indústria de laticínios, que contribui com um grande papel para a economia global, mas tem um grande problema em relação aos impactos causados ao solo e o consumo excessivo de água no processo de produção.

Uma estratégia que pode reduzir esses impactos ambientais é uma boa eficiência no tratamento do resíduo gerado no processo, ao ponto que ela tenha características de potabilidade, e assim diminuir os impactos nos recursos hídricos. Entre os setores mais críticos, destaca-se a indústria de laticínios, cujo elevado consumo de água e geração de efluentes com alta carga orgânica representam sérios riscos aos corpos hídricos quando não tratados adequadamente.

Diante dos problemas apresentados, uma forma de tratar esses efluentes é por meio da aplicação dos métodos de Eletrólise e Nanofiltração, como processos primário e secundário, respectivamente, a fim de garantir os padrões de qualidade de água de reuso seguindo as etapas abaixo:

- a primeira é a eletrofloculação, que através de uma diferença de potencial entre um par de eletrodos gera um coagulante de alta capacidade;
- a segunda etapa de tratamento é a fase de eletroxidação, processo no qual tem como objetivo decompor compostos orgânicos e inorgânicos em composições orgânicas mais simples, não tóxicas e biologicamente oxidáveis que favorecem a degradação de materiais orgânicos, resultando na formação de dióxido de carbono, água, amônia e outros produtos;
- e como etapa final, tem-se o processo de separação por membranas, mais conhecida como fase por imersão-precipitação, na qual aumenta a vazão de permeado de água, mantendo a retenção de sais.

O presente trabalho propõe tornar o processo de tratamento de efluentes mais eficiente e sustentável por meio da automação industrial, aplicando conhecimentos técnicos a uma problemática ambiental relevante e suprimindo a lacuna de estudos sobre a automação da eletrofloculação em escala industrial. A solução desenvolvida, baseada em Arduino, Soft PLC, sistema supervisor, sensores e atuadores, busca reduzir custos operacionais, aumentar a autonomia do sistema e promover a sustentabilidade industrial, monitorando e controlando o escoamento e os parâmetros do fluido. Além disso, o estudo avalia a viabilidade do reuso da água tratada segundo normas ambientais e incentiva práticas sustentáveis voltadas à otimização dos recursos hídricos e à mitigação dos impactos ambientais.

2. Revisão da Literatura

Neste capítulo são apresentadas as teorias de autores renomados que dão sustentação ao desenvolvimento do projeto intitulado Tratamento de Efluentes de Laticínios para Reuso.

2.1 Eletrofloculação

Shonza (2017) salienta que a eletrofloculação é um processo eletroquímico para o tratamento de água, no qual acontece a uma associação entre eletrocoagulação e eletroflotação. Tal processo ganhou destaque na década de 80 devido a sua grande eficácia em processos de emulsões entre água e óleo.

Souza (2015) enfatiza que para promover a criação de coagulante é aplicado uma diferença de potencial entre os eletrodos metálicos - que comumente são de ferro ou alumínio – nos quais são submetidos a uma corrente elétrica, e por sua vez geram coagulantes *in situ*¹. No ânodo e cátodo, formam-se bolhas de oxigênio e hidrogênio, respectivamente, que são responsáveis por carregar o material floculado para a superfície, sendo assim, substituindo a adição de floculantes.

Benazzi (2013) destaca o que acontece com a adsorção dos hidróxidos, que são compostos formados por íons metálicos e grupos de hidroxila (OH^-), formados nos eletrodos. Os hidróxidos metálicos vão “grudar” nas micropartículas suspensas no fluido, gerando os chamados “flocos”. Após essa fase ocorre a transferência dos “flocos” para a superfície do fluido, transportadas pelas bolhas de oxigênio.

Grecco et al. (2022), as reações químicas da eletrofloculação ocorrem entre pares de eletrodos no reator, gerando coagulantes que reduzem a carga orgânica dos efluentes. A primeira equação fundamental, ocorre no ânodo representa a oxidação de um metal M no estado sólido para seu íon em solução aquosa, liberando n elétrons. Vale ressaltar que essa é apenas uma fórmula, não a reação propriamente dita.

A segunda equação fundamental deriva da primeira, pois o íon metálico de carga positiva liberado no ânodo reage com os íons hidróxido formados no cátodo, originando um hidróxido metálico insolúvel. Essa reação representa a precipitação do hidróxido, na qual o cátion metálico combina-se com os íons hidróxido, resultando na formação de um precipitado sólido.

¹ Solução onde os poluentes estão presentes no próprio fluido.

No cátodo ocorre a terceira equação fundamental, a água ganha elétrons (redução) e se decompõe em íons hidroxila (OH^-) e gás hidrogênio (H_2). Os íons OH^- formados são essenciais na eletrofloculação, pois reagem com os íons metálicos liberados no ânodo (como Al^{3+} ou Fe^{3+}), gerando hidróxidos metálicos que promovem a floculação e remoção de impurezas do efluente. Essa é uma reação de redução da água, que ocorre, no cátodo durante a eletrólise, nela, a água recebe elétrons, formando íons hidroxila e liberando hidrogênio.

Fleck et al. (2013) explicam que a eletrofloculação é eficiente e promissora. A eficiência é notável em emulsões - processo esse que consiste na separação de compostos gordurosos e oleosos, tem alta capacidade de coagular e promover flotação das partículas presentes. Durante a eletrolise os eletrodos geram gases – geralmente H_2 e O_2 -, gases esses que levam o composto coagulado à superfície do fluido, viabilizando sua remoção. Como consequência, forma-se um coloide de densidade menor que a do fluido, ajudando esses agregados a se deslocarem naturalmente para a superfície.

Cerqueira (2006) destaca que a eletrofloculação, dentre os processos vigentes de floculação se destaca com sua alta versatilidade e eficácia em diversos tipos de processos de tratamento de efluentes diferentes, sendo capaz de tratar substâncias variadas, desde metais pesados até compostos orgânicos.

Fornari (2007) menciona que a comparação a outros processos convencionais, se sobressai quando o assunto é o controle de liberação de agentes coagulantes, resultando em uma redução significativa de quantidade de produtos químicos inseridos no processo, o que o torna mais sustentável, pois contribui com a diminuição dos xenobióticos na natureza. Além disso, os flocos formados são menos propensos a se desagregar e tem estrutura mais consistente, em relação a flocos formados por processos convencionais, contribuindo para que os flocos sejam facilmente removidos por um simples processo de filtração.

2.2 Efluentes e variáveis controladas

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), mostra que os efluentes são resíduos líquidos ou gases gerados por atividade humanas, sendo classificados em domésticos, industriais e agropecuários.

De acordo com a CETESB (2008), a composição dos efluentes acaba variando, pois ela depende de vários fatores como: tipo de derivado que está sendo produzido, produto de limpeza utilizado e o tamanho da escala de produção. Os principais fatores são os sólidos suspensos, a demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, sais minerais, detergentes e produto químicos de limpeza e o pH.

Nadal (2018), enfatiza os estudos sobre a eficiência do processo de eletrofloculação indicam que seu desempenho está condicionado ao controle de determinadas variáveis operacionais. Entre essas, destacam-se a intensidade de corrente elétrica aplicada, pH, condutividade e temperatura. Esses fatores influenciam a formação, o tamanho e a distribuição das bolhas de gás, geradas no eletrodo catódico.

A intensidade de corrente influencia diretamente na velocidade das reações, é influenciada pelas características do meio, e deve ser ajustada com cautela, para a preservação da eficiência energética e evitar o desgaste prematuro dos eletrodos (NASCIMENTO, 2021).

O pH é essencial no processo de eletrocoagulação por influenciar diretamente a solubilidade e a forma dos íons metálicos envolvidos na coagulação. Um pH inadequado pode reduzir a eficiência da remoção de poluentes, pois afeta a formação de hidróxidos metálicos, que são os principais agentes coagulantes no processo (MÓDENES et al., 2017).

O controle da temperatura no processo de eletrocoagulação é um fator essencial para garantir a eficiência do tratamento. Temperaturas mais elevadas favorecem a solubilização dos íons metálicos e aceleram as reações eletroquímicas, aumentando a formação de coagulantes. No entanto, o excesso de calor pode levar à degradação dos eletrodos e à elevação do consumo energético, tornando o processo menos sustentável (MARTINS, 2016).

Segundo o mesmo autor, a condutividade elétrica é uma variável operacional fundamental na eletrocoagulação, pois determina a capacidade do meio líquido de conduzir corrente elétrica entre os eletrodos. A turbidez também é um dos principais indicadores da qualidade de efluentes, refletindo a presença de partículas suspensas, coloidais ou dissolvidas na água. No contexto da eletrocoagulação, a redução da turbidez está diretamente associada à eficiência do processo.

2.3 Sustentabilidade e reuso no tratamento de efluentes

Fonseca (2023) declara que a sustentabilidade pode ser utilizada como caminho para auxiliar a gestão e desenvolvimento das indústrias, buscando um equilíbrio entre os aspectos ambientais, econômicos e sociais. O desenvolvimento sustentável é aquele que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades.

Beltrame et al. (2016) , relata que o uso da água para abastecimento em um contexto geral, resulta em um efluente final que muitas vezes não é tratado para ser destinado novamente ao meio ambiente. “A geração de efluentes deve ser controlada; porém, se essa resultante não puder ser evitada, deve-se proporcionar um tratamento adequado do efluente gerado”. Nas diversas aplicações que utilizam a água, em média 80%, resultam em resíduos, seja ele de origem doméstica, hospitalar e industrial.

A EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, (2023) menciona que a cadeia industrial do setor de laticínios se destaca pelo elevado consumo de água nas diversas etapas de produção. Em 2022 o mundo produziu cerca de 753,3 bilhões de litros de leite, sendo que 35,5 bilhões foi de produção Brasileira. Entre os 10 maiores produtores de leite do mundo, o Brasil ocupou a 4º posição no *ranking* mundial.

De acordo com dados obtidos da CETESB (2008) a produção de efluente gerado é em torno de 1 a 6 litros de efluente para cada 1 litro de leite processado, podendo variar conforme o tipo de produto. O volume de efluentes líquidos gerados na indústria de laticínios varia conforme o tipo de produto processado: cerca de 3 litros por quilograma de leite para produtos “brancos” (leite, cremes e iogurtes), 4 litros para produtos “amarelos” (manteiga e queijos) e 5 litros para produtos “especiais” (concentrados de leite, soro e produtos lácteos desidratados).

Nadal (2018) destaca que o reuso tem como benefícios: o incentivo a adoção de tecnologias importantes de uso sustentável com o objetivo de promover ganhos econômicos para as indústrias de laticínios; a reutilização interna da água pode cortar despesas associadas ao descarte de efluentes, como taxas ambientais e custos de tratamento terciário; redução de insumos químicos e mão de obra envolvidas nos tratamentos convencionais. O investimento em processos como a eletrocoagulação torna a indústria competitiva e alinhada com as práticas sustentáveis.

2.4 Eletrodos e medições

Silva (2022), cita que os eletrodos são responsáveis pela liberação dos íons metálicos que formam os coagulantes. A disposição física e elétrica dos eletrodos influencia diretamente a eficiência do processo. Parâmetros como distância entre eletrodos, geometria das placas, tipo de conexão monopolar ou bipolar e a posição dentro do reator afetam na distribuição do campo elétrico, na densidade de corrente e na formação de flocos.

O alumínio tem ampla aplicação devido à sua capacidade de formar hidróxidos poliméricos que promovem eficiente coagulação e floculação. Apresenta melhor relação entre custo e desempenho, além de ser amplamente disponível no mercado brasileiro. A alta eficiência se dá, devido à presença de proteínas e gorduras que são eficientemente captadas pelos flocos de $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Péres (2012) enfatiza que a resistência elétrica de aquecimento é amplamente empregada em diversos sistemas com o objetivo de elevar a temperatura de fluidos em estado líquido. Ela é um dispositivo capaz de converter energia elétrica em energia térmica. A temperatura em torno de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ é considerada ideal, pois favorece significativamente a eficiência do processo, acelerando as reações eletroquímicas e promovendo a formação de flocos. Assim, a resistência elétrica torna-se um componente fundamental para assegurar a eficácia, a velocidade das reações e a estabilidade térmica ao longo do tratamento.

Serrano (2020) esclarece que, a medição e controle de pH é de suma importância em diferentes ramos da indústria, em todos processos que envolvam descartes líquidos, como na fermentação de etanol. O controle do pH é essencial em processos industriais que envolvem efluentes líquidos, pois indica a acidez ou alcalinidade de uma solução com base na concentração de íons hidrogênio (H^+). Na eletrofloculação, a medição do pH é fundamental para avaliar a eficiência do processo, já que ele influencia a solubilidade dos hidróxidos metálicos e a densidade de corrente aplicada nos eletrodos.

Thomazini e Albuquerque (2009) destaca que há vários tipos de sensores de temperatura, que são: termistores, resistor termicamente sensível, coeficiente de temperatura positivo (PTC), coeficiente de temperatura negativo (NTC), termopares, termorresistência, e também os eletrônicos, com diodos, transistores e circuitos integrados, termopilhas e pirômetros.

Bagnato e Rodrigues (2006) aponta que a condutividade elétrica é a capacidade de um corpo de conduzir corrente elétrica, ou seja, permitir a passagem de corrente em sua estrutura. A condutividade pode ser mensurada de acordo a diversos princípios físicos e métodos, dentre eles: princípio da lei de ohm, condutividade em soluções eletrolíticas, condutivímetros, indução eletromagnética, condutivímetros indutivos e etc.

Cardoso (2011) enfatiza que a medição de turbidez é dada através da opacidade de um líquido ou a quantidade de partículas em suspensão que dispersam ou absorvem luz. Ela pode ser medida através de diversos métodos, os sensores medem diretamente a quantidade de luz que atravessa a amostra. Quanto maior a turbidez, menor a transmissão. Pode ser interpretada como a “redução da transparência de um líquido causada pela presença de matéria não dissolvida” e “redução da transparência de um líquido causada pela presença de matéria não dissolvida”.

2.5 Aspectos elétricos

Silva (2017) destaca que a bomba é um equipamento hidráulico onde tem como finalidade transferir um fluido de um lugar para outro, utilizando a energia fornecida por uma fonte motora, convertendo parte dessa energia em pressão, velocidade ou ambas, elevando assim a energia do fluido durante o processo.

Os circuitos eletrônicos operam, em sua maioria, com alimentação proveniente de fontes de corrente contínua. A origem dessa alimentação pode variar conforme a aplicação (REVISTA TÉCNICO CIENTÍFICA, 2023).

Essas fontes têm como principal função converter a corrente alternada (CA) da rede em corrente contínua (CC) estabilizada, adequada às exigências dos componentes eletrônicos. Tal conversão visa mitigar riscos associados à variação de tensão, sobrecorrente, sobretensão, danos aos dispositivos e choques elétricos, proporcionando uma alimentação segura, confiável e eficiente ao sistema.

Segundo Patsko (2006), a ponte H é um dispositivo fundamental no exercício do controle sobre motores DC, pois possibilita a inversão da polaridade em seus terminais, alterando assim o sentido de rotação. Constituída por quatro chaves - que podem ser relés, transistores ou MOSFETs - organizadas em forma de “H”, ela opera por meio da ativação alternada de pares opostos. Em contextos como a robótica e a automação, ela é o elo que permite que a intenção digital se materialize em movimento.

2.6 Dispositivo de controle

Silva (2018) aponta que o controlador lógico programável (CLP) é um equipamento eletrônico digital utilizado para automatizar processos industriais. Sua função é monitorar entradas digitais e analógicas, processar logicamente essas informações de acordo com um programa pré-definido e gerar saídas que comandam máquinas e sistemas. Um CLP é composto por três partes fundamentais: Unidade Central de Processamento (CPU), Módulos de Entrada e Saída (I/O) e Interfaces de comunicação.

A programação dos CLPs é padronizada pela norma IEC 61131-3, utilizando linguagens como Ladder Diagram (LD), Structured Text (ST) e Function Block Diagram (FBD), o que favorece a padronização e manutenção dos sistemas. Eles são projetados para operar em ambientes agressivos com alto nível de ruído elétrico, variações térmicas e umidade, garantindo alta confiabilidade e operação contínua.

Santos et al. (2018) esclarece que, o Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto baseada em microcontroladores da família Atmel AVR. Seu principal diferencial é a acessibilidade: a placa pode ser programada por meio de uma IDE simples, utilizando linguagem baseada em C/C++, e permite a leitura de sensores e o controle de atuadores de forma direta e intuitiva.

O Arduino não possui o mesmo nível de robustez de um CLP, tampouco oferece nativamente suporte a protocolos industriais. Entretanto, pode ser utilizado como uma interface de I/O remota, especialmente quando integrado a sistemas com Soft PLCs, como o CODESYS. Seu uso é comum em ambientes de ensino, pesquisa, prototipagem e até em aplicações reais de automação de baixo custo, quando adaptado com proteções elétricas e adequado isolamento dos sinais.

Complementando essa arquitetura de controle, a execução do Soft PLC neste projeto será realizada em um notebook, sendo uma plataforma física para o sistema automatizado.

2.7 Sistema supervisorio SCADA

Segundo Zanghi (2021), com o avanço da automação industrial e o aumento da complexidade dos processos produtivos, tornou-se necessário desenvolver ferramentas que permitem uma visão global e centralizada das operações em tempo real. Nesse contexto, surgem os sistemas SCADA, que são plataformas voltadas à supervisão e controle de processos, possibilitando a aquisição de dados e o gerenciamento remoto de variáveis de campo.

Torres e Araujo (2023) enfatiza que, o principal papel dos sistemas supervisórios de maneira geral nas indústrias atuais é apresentar plataformas em tempo real, conectividade entre dispositivos (IoT), capacidade e segurança no armazenamento de dados (Big Data), computação em nuvem, alarmes inteligentes e integração efetiva entre dispositivos de diferentes marcas e sistemas organizacionais, toda essa gama de atribuições são ideias trazidas pela indústria 4.0.

Vianna, Bringheti e Martins (2008) descreve modelos de arquitetura SCADA em algumas partes:

- Arquitetura de comunicação, é interação entres dispositivos, traz como base estrutural a pirâmide da automação, que por sua vez estabelece os diferentes níveis de interação entre os equipamentos;
- Arquitetura distribuída, inclui o uso de um sistema supervisorio, CLP compacto ou modular e elementos de campo;
- Arquitetura local de rede com CLP, esse sistema pode ser associado ao sistema supervisorio como o “*client*” da rede e o controlador como “*server*”, responsável por repassar as informações obtidas em campo e posteriormente exibir os dados obtidos nas telas de controle.

Segundo Zanghi (2021), os sistemas SCADA, são compostos por elementos de hardware e software que, ao se comunicarem entre si por meio de uma rede, constituem uma arquitetura integrada de supervisão e controle. Nessa configuração, o termo “sistema SCADA” refere-se à totalidade da solução, enquanto o “sistema supervisorio” diz respeito especificamente ao componente de software responsável pela interface de monitoramento, controle e aquisição de dados.

Os principais softwares de supervisão SCADA utilizados em um contexto geral no Brasil e no Mundo, com base em pesquisas de mercado. Com base em avaliações de usuários de Softwares SCADA apresenta-se um os melhores sistemas do mercado, que são: SIMATIC WinCC (SIEMENS), Experiência HS (Honeywell), Planta Aveva Scada (Schneider) e Aveva Edge (Aveva).

2.8 Redes Industriais

Cavallin (2016) cita que a rede industrial é um sistema de comunicação digital projetado especificamente para interligar dispositivos e sistemas de controle em ambientes de automação industrial. Essas redes permitem a troca de dados entre campo, controladores lógicos programáveis (CLPs), interfaces homem-máquina (IHMs), sistemas supervisórios (SCADA) e outros, garantindo a sincronização e o controle eficiente dos processos.

Para compreender a estrutura de funcionamento dos protocolos de comunicação industrial, é comum utilizar o modelo de referência ISO/OSI (Open Systems Interconnection). Esse modelo organiza a comunicação de dados em sete camadas, que vão desde o nível físico (camada 1) até a aplicação (camada 7), permitindo uma visão modular e padronizada da troca de informações entre dispositivos.

Os protocolos industriais podem ser classificados segundo sua arquitetura de comunicação como mestre-escravo e seu meio físico (comunicação serial ou via Ethernet). Entre os protocolos mais amplamente utilizados na indústria destacam-se o Modbus, PROFIBUS, PROFINET, EtherNet/IP e OPC. Cada um desses protocolos apresenta características específicas quanto à velocidade de transmissão, determinismo, topologia de rede e nível de aplicação.

3. Metodologia

Neste capítulo encontram-se as diretrizes para o desenvolvimento e construção do projeto que se intitula Tratamento de efluentes de laticínios para reúso. São destacados métodos e técnicas que direcionam a trajetória da construção do projeto. Trata-se de uma pesquisa aplicada que é desenvolvida nas dependências da Fatec SBCampo e nas residências dos integrantes do grupo.

Dentre os vários autores que tratam da metodologia científica, Pradanov e Freitas (2013) destacam que a metodologia é o caminho a percorrer para o desenvolvimento de uma pesquisa. Enfocam que os métodos são procedimentos amplos do raciocínio e as técnicas são procedimentos que operacionalizam os métodos mediante a instrumentos adequados.

Severino (2018) enfatiza que a preparação metódica e planejada de um trabalho científico supõe uma sequência de etapas que compreendem: determinação do tema problema e justificativa, levantamento da bibliografia referente ao tema, leitura e documentação desta bibliografia após seleção e construção lógica do trabalho.

A preparação metódica está diretamente ligada ao tipo de pesquisa que se pretende realizar, utilizando técnicas que estão em sintonia com os assuntos abordados. As técnicas dão base para forma correta para a elaboração do projeto que são procedimentos que se encadeiam os raciocínios para o uma metodologia de aplicação prática.

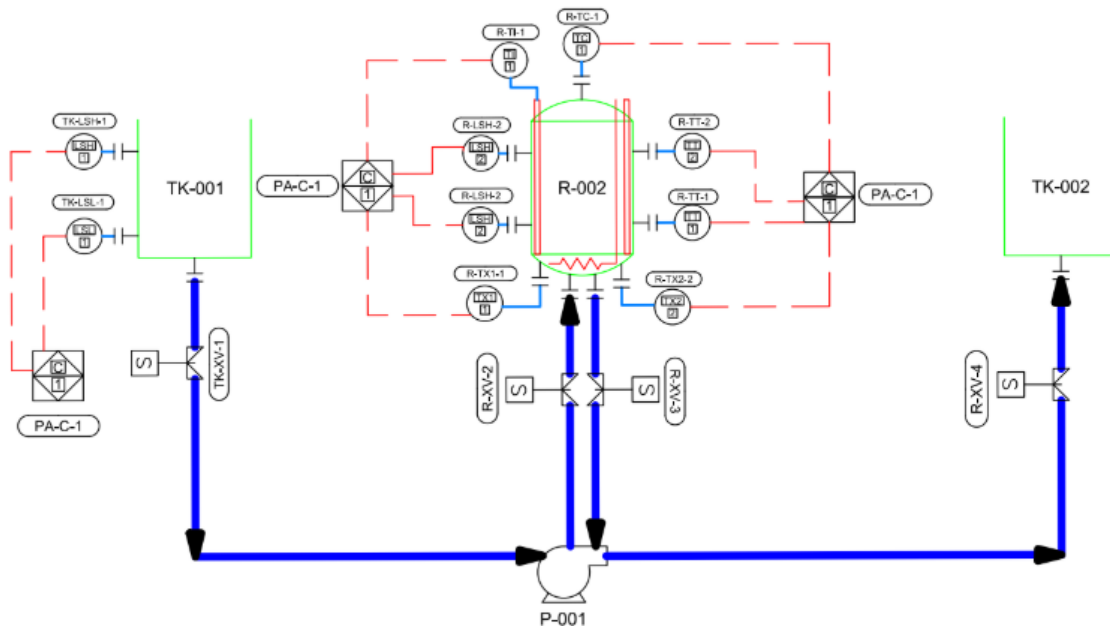
A construção da redação do TCC tem como base o Manual de Normalização do TCC (2023), que se encontra amparado nas normas da ABNT (2025). O trabalho é escrito em uma linguagem simples, concisa e terminologia adequada.

3.1 O tema-problema, justificativa e fluxograma

O trabalho que se intitula Tratamento de efluentes de laticínios para reuso, tem como objetivo automatizar o processo de tratamento de efluentes por eletrocoagulação. Justifica-se por ser um equipamento automatizado que proporciona controle e interatividade no processo, saando de baixo custo, versátil, garantindo maior eficiência, fácil operação e controle.

O projeto é composto, principalmente, eletrodos de alumínio, soft plc, Arduino, supervisor AVEVA, fonte de tensão, motor e sensores. Para melhor visualização das etapas que compõem o projeto. O sistema representado pela Figura 3.1 realiza o tratamento de efluentes de laticínios por eletrofloculação, utilizando um reator automatizado monitorado por sensores de pH, turbidez, condutividade, temperatura e nível. a Figura 3.1 ilustra um diagrama do processo geral.

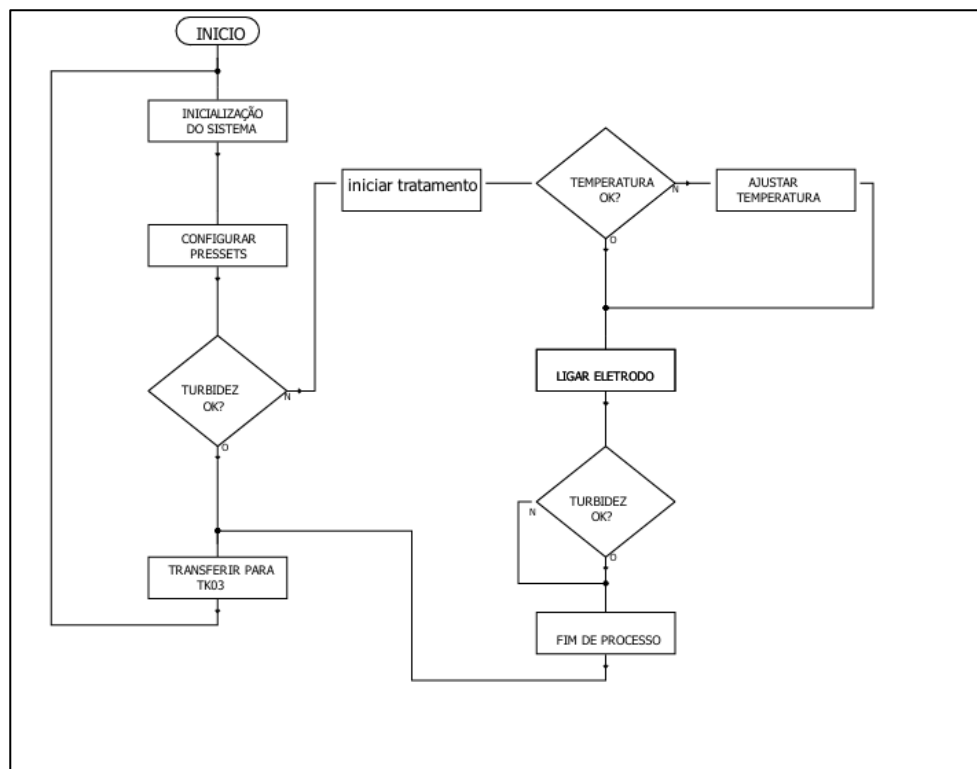
Figura 3.1 - Diagrama do projeto



Fonte: Autoria própria, 2025.

A Figura 3.2 ilustra um fluxograma do processo de tratamento.

Figura 3.2 - Fluxograma do processo de tratamento



Fonte: Autoria própria, 2025.

O processo inicia a verificação sequencial de parâmetros essenciais para garantir a eficiência do tratamento por eletrocoagulação. Primeiro, avalia-se se a turbidez está dentro da faixa ideal. Caso esteja conforme os parâmetros, o efluente segue para o reservatório 3, onde é classificado como tratado. Se a turbidez estiver fora dos padrões, verifica-se a temperatura do efluente. Se a temperatura estiver adequada, o eletrodo é acionado; caso contrário, realiza-se o ajuste necessário.

Esse fluxo lógico garante um processo mais seguro, eficiente e padronizado, otimizando o uso de insumos e contribuindo para a sustentabilidade e redução de custos com o reuso da água tratada.

3.2 Aplicações no projeto

O Soft PLC é uma solução ideal para aplicações industriais de médio porte, mas, que exigem confiabilidade e operação contínua, que deve se adequar ao projeto. O Arduino é essencial em projetos com menor complexidade, principalmente quando aliado a Soft PLCs. Quando o Arduino atua apenas como módulo remoto de I/O e a lógica de controle reside em um sistema mais robusto, sua limitação pode ser contornada com boas práticas de projeto.

A integração entre o Arduino e o Soft PLC é realizada por meio do protocolo Modbus RTU, via RS-485. O CODESYS é o software responsável por “rodar” o programa dentro do Soft PLC. Ele é o responsável por trocar dados com o Arduino, recebendo os dados de leitura dos sensores e enviando comandos de acionamento de atuadores. O CODESYS é aplicado ao processo de eletrocoagulação, que faz parte do projeto.

No projeto, o notebook será utilizado como plataforma física para execução de um Soft PLC. O sistema operacional a ser adotado é o Windows, devido à sua ampla familiaridade entre os usuários, alta compatibilidade com ferramentas de automação, é um suporte abrangente a drivers e bibliotecas de comunicação.

O sistema SCADA escolhido para monitorar as variáveis de processo é o AVEVA™ Edge Educacional 2020, este é um dos Softwares SCADA mais utilizados nas indústrias, além de ser um dos Softwares utilizado pela Fatec para ministração das aulas de Supervisório. O Aveva é um software de supervisão industrial (HMI/SCADA) projetado para desenvolver aplicações intuitivas, seguras e de alta disponibilidade para ambientes industriais e de máquinas inteligentes, que atende as propostas do projeto. Entre os recursos diretamente destacados no projeto, estão:

- criação de alarmes e eventos: monitoramento em tempo real de condições críticas de operação;
- registro de dados com tendências históricas e em tempo real: útil para análise de desempenho e rastreabilidade das variáveis de processo;
- exibição gráfica personalizada com símbolos: gráficos industriais e animações, permitindo visualização clara de variáveis como pH, turbidez e condutividade.

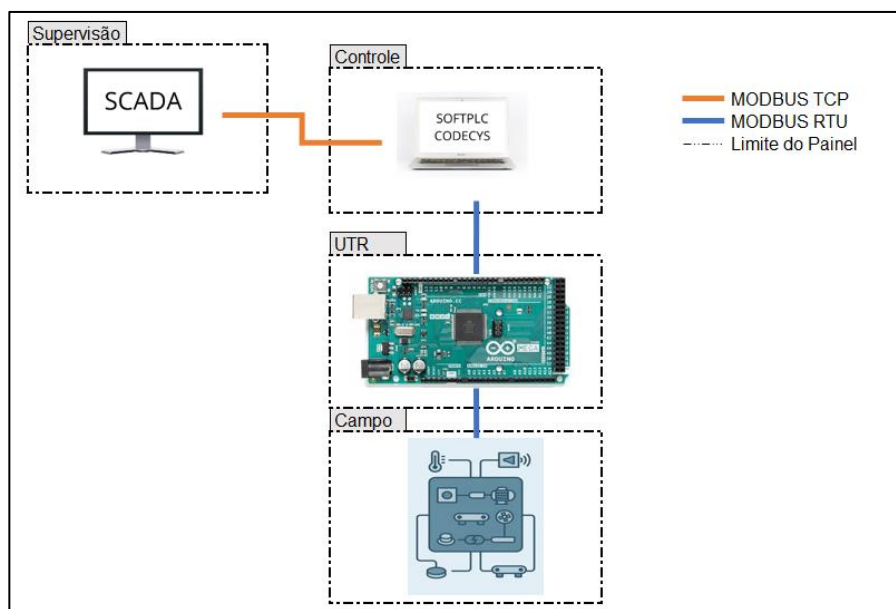
Esses recursos demonstram que o AVEVA Edge é uma ferramenta consolidada para ambientes industriais que demandam visualização em tempo real e controle confiável de processos críticos, como é o caso do tratamento de efluentes, que é o foco do projeto.

A escolha do protocolo para comunicação é o Modbus RTU, que faz a comunicação serial entre o supervisório AVEVA Edge e o ambiente de controle baseado em CODESYS. Este protocolo é fundamentado em sua ampla adoção na indústria, simplicidade de implementação, robustez e compatibilidade direta com os dois sistemas.

O protocolo Modbus RTU possui as seguintes características, que está de acordo com o projeto que se pretende desenvolver, sendo elas: baixa complexidade e alto nível de interoperabilidade; formato compacto de mensagens; amplo suporte em ambientes industriais; verificação de erros nas transferências de dados e flexibilidade de endereçamento.

Na arquitetura de rede do projeto, o AVEVA Edge atua como mestre Modbus, e o CODESYS no Soft PLC como escravo. As variáveis de comunicação são mapeadas em registradores Modbus nas funções 03 para leitura e 06/16 para escrita de dados. A Figura 3.3 destaca um esquemático representativo da arquitetura de rede que será utilizada no projeto:

Figura 3.3 - Arquitetura de Rede



Fonte: Autoria Própria (2025).

3.3 Etapas para o desenvolvimento do projeto

Após delimitar o tema-problema, justificativa e descrição do funcionamento através do fluxograma, parte-se para as seguintes etapas:

- **Primeira etapa:** reunião dos integrantes do grupo com o orientador para traçar as diretrizes de como efetuar a pesquisa sobre o tema proposto. O orientador fez uma explanação geral sobre o assunto, dando ideias de como efetuar a pesquisa teórica. Ficou determinada um dia por semana para o grupo apresentar o andamento das pesquisas;
- **Segunda etapa:** levantamento bibliográfico disponíveis na biblioteca da Fatec SBC, em sites especializados provenientes de arquivos PDF manuais e catálogos de empresas;
- **Terceira etapa:** após o levantamento bibliográfico, as mesmas foram selecionadas, de acordo com o tema e fez-se a construção do Capítulo 1- Fundamentação teórica, bem como as referências. A bibliografia tem como objetivo referenciar as teorias descritas por autores renomados;

- Quarta Etapa: levantamento de materiais a serem utilizados no projeto, pesquisas de preços em sites e lojas especializadas. Estudo da viabilidade econômica e aquisição dos materiais.

4. Desenvolvimento do Projeto

Durante o intervalo entre o quinto e o sexto semestre do curso, foram adquiridos os materiais necessários para a construção do protótipo, incluindo sensores, recipientes, ponte H, resistência, cabos, válvulas, cantoneiras, suportes, entre outros periféricos. O custo total desses componentes foi de R\$ 1.698,86, valor considerado equilibrado, tendo em vista que se trata de um projeto com fins acadêmicos, conforme apresentado na tabela 1 de custos a seguir.

Tabela 1 - Custos

CATEGORIAS	VALOR
Sensores	R\$ 326,16
Atuadores	R\$ 261,13
Acessórios de montagem	R\$ 148,60
Sistema eletro-eletrônico	R\$ 256,70
Despesas	R\$ 406,27
Arduínos	R\$ 300,00
Computadores	R\$3.000,00
TOTAL	R\$ 4.698,86

Fonte: Autoria Própria

O estudo em questão aborda a indústria de processos, um setor caracterizado por elevados custos operacionais, especialmente no que se refere à instrumentação de campo. Tais custos decorrem do alto grau de robustez e confiabilidade exigido pelos equipamentos utilizados nesse ambiente. No trabalho, optou-se pela utilização de instrumentos de menor porte e com índices de proteção reduzidos, uma vez que o protótipo foi concebido com finalidade demonstrativa.

4.1 Montagens Físicas e Eletromecânicas

Como parte essencial do desenvolvimento, foram realizadas diversas montagens físicas e eletromecânicas do protótipo. Todas as etapas de montagem foram executadas de forma manual pelos próprios integrantes do grupo, utilizando a infraestrutura disponível no campus da FATEC Adib Moisés Dib e, complementarmente, nas residências dos membros da equipe.

Dentre essas montagens, destaca-se a construção do painel elétrico, responsável por acomodar os principais componentes eletrônicos e de controle, como as remotas Arduino, a ponte H, o módulo relé, as proteções elétricas, entre outros dispositivos. A Figura 4.1 ilustra a etapa de montagem do painel elétrico.

Figura 4.1 – Painel elétrico em montagem

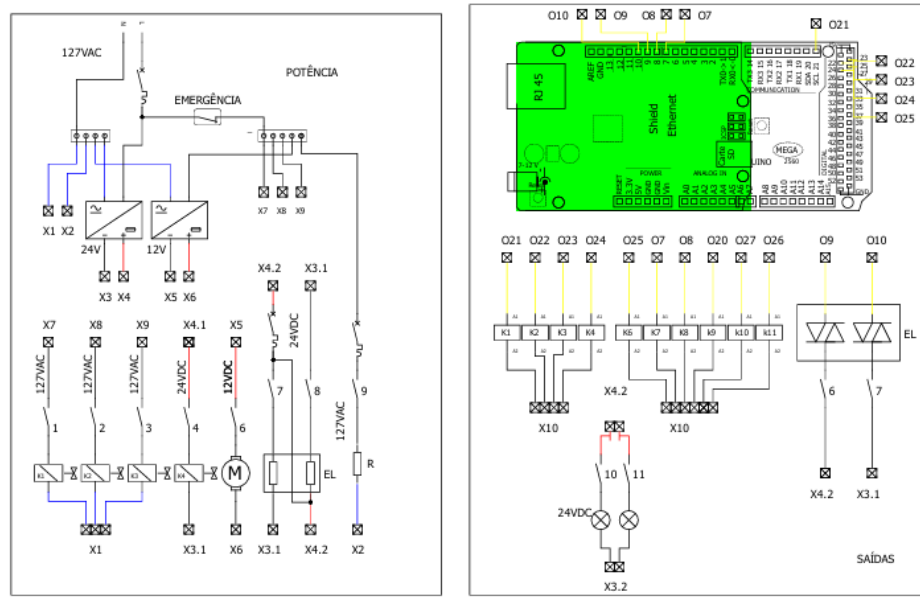


Fonte: Autoria própria, 2025.

A montagem do painel elétrico foi baseada nos esquemas desenvolvidos durante o projeto, divididos em duas partes: a primeira refere-se à parte remota do Arduino, este responsável pelo acionamento das saídas. A segunda refere-se à parte remota destinada ao processamento dos sinais provenientes das entradas.

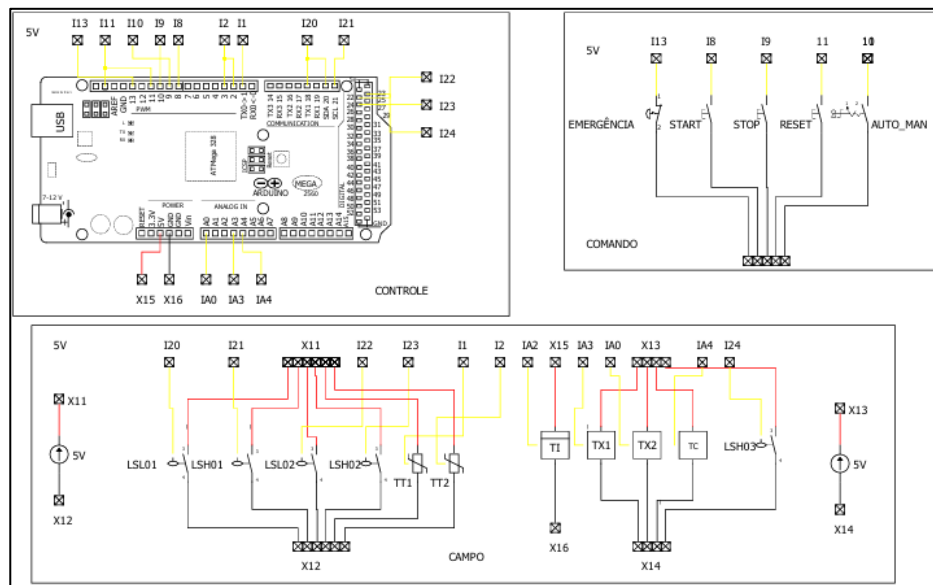
As figuras 4.2 e 4.3 apresentam, respectivamente, os circuitos das saídas e das entradas.

Figura 4.2 - Circuito das saídas



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 4.3 - Circuito das entradas



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.2 Desenvolvimento da Lógica de Controle

A lógica de controle do sistema foi desenvolvida na plataforma CODESYS, utilizando Sequential Function Chart (SFC) para as rotinas principais e Ladder Diagram (LD) para as subrotinas e blocos funcionais (Function Blocks – FB). Essa combinação permite aproveitar os pontos fortes de cada abordagem: enquanto o SFC oferece uma visão estruturada e sequencial das etapas do processo, ideal para fluxos operacionais complexos, o Ladder garante clareza, padronização e facilidade de manutenção para rotinas específicas e lógicas de instrumentação.

No ambiente de desenvolvimento, foram criadas diversas POU's (Program Organization Units), unidades fundamentais para estruturar a lógica de forma modular e escalável. As POU's foram configuradas como programas, para as rotinas principais, e como blocos de função, para encapsular comportamentos repetitivos e facilitar a reutilização de código. Essa estratégia modular contribui para maior organização e flexibilidade no desenvolvimento, além de simplificar futuras expansões ou ajustes no sistema.

A rotina principal em SFC coordena o fluxo do processo, acionando subrotinas nos momentos apropriados e realizando decisões com base nas variáveis globais e nos estados da planta. Já os Function Blocks em Ladder padronizam a lógica dos instrumentos de campo, como sensores, transmissores e atuadores, garantindo consistência na interpretação dos sinais e facilitando a manutenção.

Também foram criadas sub-rotinas específicas para o tratamento e a conversão dos sinais analógicos e digitais provenientes do campo. Para as entradas, os sinais são convertidos para unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI), assegurando padronização e compatibilidade com os cálculos internos. Para as saídas, ocorre o inverso: os valores gerados pelo controlador são ajustados aos padrões exigidos pelos atuadores, como válvulas, motores ou inversores de frequência.

O sistema opera em modo manual e automático, proporcionando flexibilidade ao operador. No modo manual, o usuário controla diretamente cada atuador, facilitando manutenção e testes. No modo automático, todas as etapas seguem a lógica programada, garantindo precisão, repetibilidade e segurança operacional. Essa estrutura híbrida fortalece a confiabilidade do sistema e amplia sua adaptação a diferentes cenários de operação.

4.3 Sistema Supervisório

Um sistema supervisório desempenha papel essencial na automação industrial ao permitir o monitoramento em tempo real de variáveis do processo, o registro contínuo de dados operacionais e a geração de alarmes em situações de anormalidade, garantindo maior segurança e confiabilidade à operação. Além disso, possibilita o controle remoto de equipamentos, otimiza a tomada de decisão por meio de informações históricas e contribui para a redução de custos e aumento da eficiência produtiva, tornando-se uma ferramenta indispensável para processos industriais modernos e alinhados aos princípios da Indústria 4.0.

O sistema supervisório desenvolvido contempla quatro telas principais: Menu, Gráficos, Relatórios e Operação. Vale ressaltar, que todas as imagens do sistema, são provenientes dos resultados dos ensaios do efluente da produção de manteiga e creme.

- Tela Menu: esta é a tela inicial da aplicação, permitindo a navegação para as demais telas, visualização do horário atual e encerramento do sistema, se necessário. A figura 4.4 apresenta a interface da tela menu.

Figura 4.4 - Tela Menu



Fonte: Autoria própria, 2025.

- A tela de gráficos constitui uma das funcionalidades mais importantes de um Sistema Supervisório, pois permite a visualização dinâmica e em tempo real das variáveis envolvidas no processo industrial. Por meio dela, o operador ou engenheiro de controle pode acompanhar simultaneamente tanto os sinais medidos quanto seus respectivos setpoints, possibilitando uma avaliação imediata do comportamento do sistema sob diferentes condições operacionais.

Essa interface gráfica facilita a identificação de fenômenos fundamentais para a análise de desempenho de malhas de controle, como overshoot, tempo de subida, tempo de acomodação, erro em regime permanente (steady-state error) e eventuais oscilações que indiquem instabilidade ou necessidade de retuning dos parâmetros do controlador. Além disso, a visualização histórica ou em tempo real dos dados permite comparações entre diferentes variáveis do processo, contribuindo para o diagnóstico de falhas, para a avaliação de interações entre malhas e para a validação de estratégias de controle implementadas. A Figura 4.5 apresenta a tela Gráficos utilizada no sistema desenvolvido.

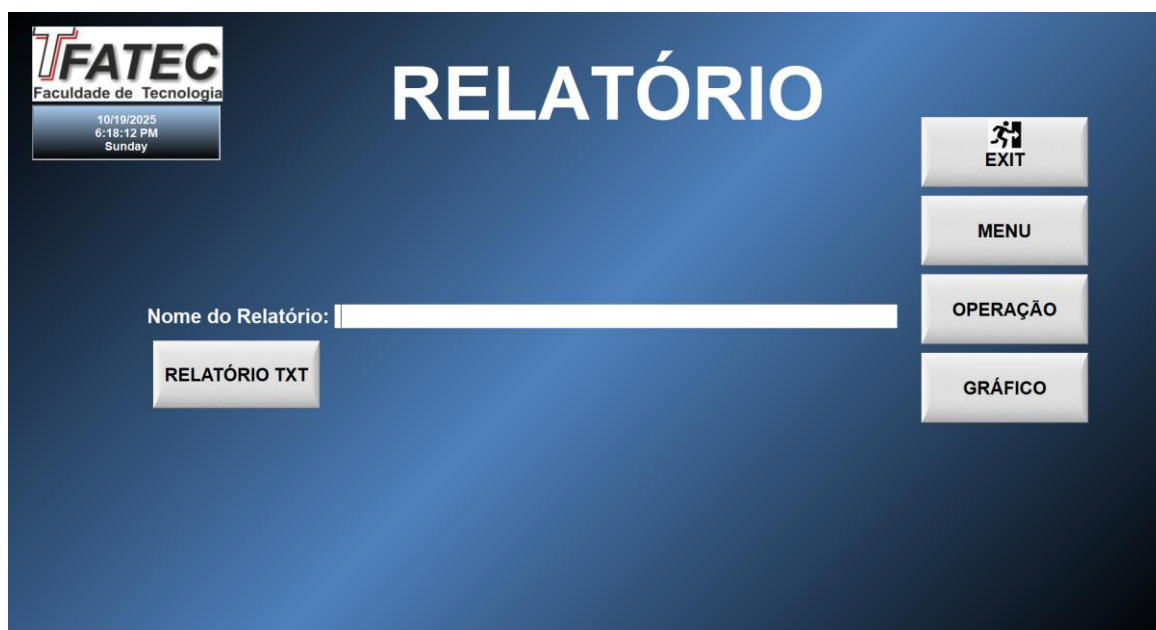
Figura 4.5 - Tela Gráficos



Fonte: Autoria própria, 2025.

- A tela de relatórios disponibiliza a funcionalidade de extração e armazenamento de dados em formato .TXT, permitindo ao usuário registrar informações relevantes provenientes do processo. Esses relatórios podem ser gerados durante testes operacionais, atividades de comissionamento, procedimentos de manutenção preventiva ou corretiva, bem como durante etapas de validação e verificação do sistema de controle. O uso de arquivos em formato texto apresenta vantagens significativas, como leveza, portabilidade e facilidade de manipulação, possibilitando que as informações registradas sejam analisadas posteriormente em softwares externos, integradas a bancos de dados ou anexadas a documentações técnicas. Dessa forma, a tela de relatórios contribui para o registro histórico do processo, favorecendo análises comparativas, rastreabilidade de eventos, acompanhamento de desempenho e suporte à tomada de decisão. Além disso, a geração de relatórios estruturados auxilia na conformidade com normas e procedimentos internos de engenharia, uma vez que permite manter um histórico confiável e organizado das intervenções e condições operacionais do sistema. A Figura 4.6 apresenta a tela Relatórios utilizada no supervisor desenvolvido.

Figura 4.6 - Tela Relatórios



Fonte: Autoria própria, 2025.

- Tela Operação: Esta interface permite o controle do processo, seja em modo manual ou automático. Em modo manual, o operador pode comutar diretamente as saídas, enquanto em modo automático, o sistema atua conforme a lógica previamente programada. A Figura 4.7 apresenta a tela de operação.

Figura 4.7 - Tela de operação



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.4 Testes e resultados

Nesta seção são descritos os procedimentos e resultados obtidos durante o tratamento dos diferentes tipos de efluentes simulados, representativos dos resíduos gerados em processos industriais de laticínios. Cada amostra foi preparada de acordo com as características típicas de produção e higienização de equipamentos, de forma a reproduzir, em escala laboratorial, as condições reais observadas na indústria.

Foram simulados 5 tipos de efluentes, para comprovar a eficácia do processo, um efluente de produtos brancos, um efluente de produtos amarelos, um efluente de produção de iogurte, efluente de produção de manteiga/creme e um efluente da produção de leite em pó.

Os efluentes criados, tinham os seguintes parâmetros antes do tratamento:

Tabela 2 – Efluentes antes do tratamento

Efluente	pH antes	Turbidez antes (NTU)	Condutividade antes (μS/cm)
1 – Produtos “brancos”	6,6	1200	1350
2 – Queijos (“amarelos”)	5	1500	1450
3 – Iogurte	4,5	1700	1600
4 – Manteiga e creme	6,2	2000	1500
5 – Leite em pó / “especiais”	6,8	1300	1400

Fonte: Autoria Própria

Após o serem submetidos a uma corrente de 1 Ampère e a temperatura de 45°C, durante 20 minutos, os resultados obtidos estão presentes na tabela a seguir.

Tabela 3 – Efluentes após tratamento

Efluente	pH depois	Turbidez depois (NTU)	Condutividade depois (μS/cm)
1 – Produtos “brancos”	7,9	120	1000
2 – Queijos (“amarelos”)	7,4	180	1100
3 – Iogurte	7,2	220	1200
4 – Manteiga e creme	7,8	250	1100
5 – Leite em pó / “especiais”	8	100	1000

Fonte: Autoria Própria

O efluente referente aos produtos brancos foi constituído por 100 mL de leite integral, 5 mL de detergente neutro e 1,9 L de água. Essa composição representa os resíduos oriundos da higienização de maquinários utilizados na produção de leites e derivados com menor teor de gordura. O efluente apresenta, portanto, traços de detergente, proteínas e lipídios.

Durante o tratamento observou-se uma elevação do pH, comportamento esperado em função da desestabilização das gorduras e proteínas, o que favorece o processo de coagulação. A pequena redução na condutividade foi atribuída à diminuição da concentração de íons metálicos e sais, removidos por meio da coagulação e flotação. A turbidez apresentou redução significativa, atingindo uma eficiência próxima de 90%, o que indica uma clarificação satisfatória do efluente tratado.

O efluente de produtos amarelos, composto por 100 mL de leite integral, 20 mL de vinagre e 1,9 L de água, representa os resíduos típicos da produção de queijos e derivados. Esse tipo de efluente apresenta elevada carga orgânica, decorrente da presença de gorduras, proteínas e sólidos coagulados resultantes da ação ácida do vinagre sobre o leite. Durante o processo de tratamento, verificou-se aumento do pH de 5,0 para 6,8, o que favoreceu a coagulação e a desestabilização dos sólidos. A condutividade reduziu de 1450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, resultado da remoção de íons na formação dos flocos. A turbidez apresentou redução de aproximadamente 88%, demonstrando que o processo foi eficaz, ainda que o efluente se apresente naturalmente mais turvo devido à presença de sólidos precipitados.

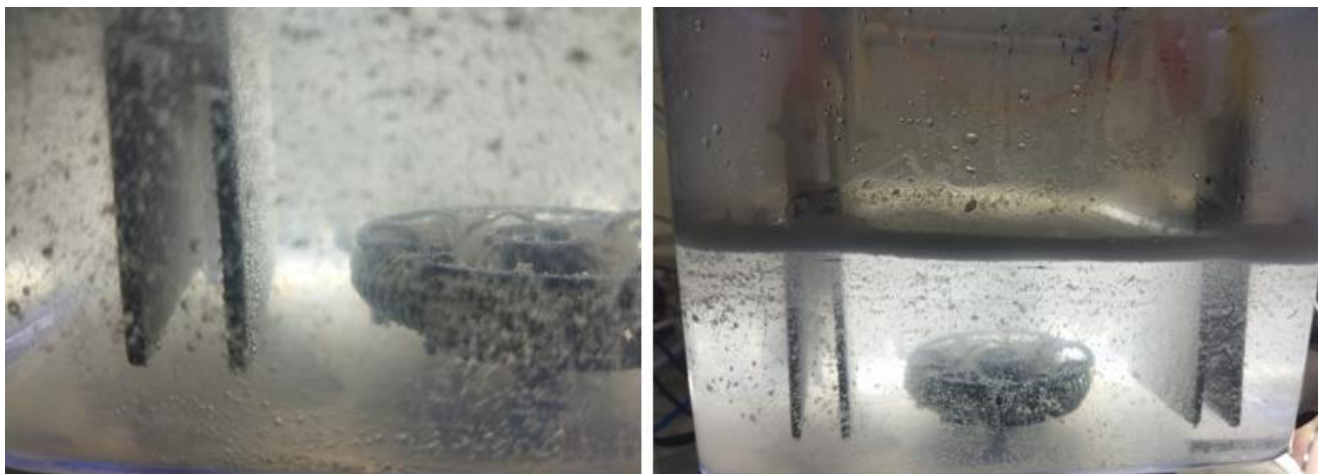
O efluente proveniente de produtos à base de iogurte foi preparado com 100 mL de iogurte natural, uma colher de chá de açúcar e 1,9 L de água. Essa formulação representa os resíduos gerados nos processos de fabricação e higienização de produtos fermentados. Após o tratamento, observou-se elevação do pH e redução expressiva da condutividade, o que reflete a remoção de íons e estabilização do meio. A turbidez diminuiu de forma considerável, com eficiência de cerca de 87%, porém o valor final ainda se manteve em torno de 220 NTU, indicando que a clarificação foi parcial e que há possibilidade de aprimoramento do processo para melhorar a remoção de sólidos suspensos.

O efluente da produção de manteiga e creme, composto por 20 mL de creme de leite, 2 mL de óleo vegetal e 1,96 L de água, caracteriza-se pela elevada concentração de óleos e graxas. Essa composição torna o efluente mais denso e desafiador para o processo de tratamento.

Durante a eletrofloculação, o pH elevou-se de 6,2 para 7,8, favorecendo a coagulação de lipídeos e proteínas. A condutividade reduziu-se de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando remoção parcial de íons dissolvidos. A turbidez caiu de 2000 NTU para 250 NTU, com eficiência de 87,5%, resultado expressivo considerando a complexidade do efluente. Apesar da melhoria, o valor final ainda demonstra a presença significativa de sólidos em suspensão, reforçando a necessidade de ajustes operacionais para otimizar a clarificação.

As figuras 4.8 e 4.9 ilustram o tratamento do efluente de manteiga e creme de leite.

Figura 4.8 e 4.9 – Tratamento de efluente de manteiga e creme de leite.



Fonte: Autoria própria, 2025.

As figuras acima ilustrando processo de eletroflotação, ocorrendo as liberações de hidrogênio e oxigênio e a espuma proveniente da eletrocoagulação.

Finalmente, o efluente dos produtos “especiais”, representando a produção de leite em pó, foi preparado com quatro colheres de sopa de leite em pó, 2 mL de detergente neutro e 1,8 L de água. Este efluente possui alta concentração de sólidos dissolvidos, característica dos processos de desidratação do leite.

O tratamento por eletrofloculação resultou em aumento do pH de 6,8 para 8,0, promovendo a coagulação das partículas sólidas. A condutividade decresceu de 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, refletindo a remoção de sais e íons metálicos. A turbidez reduziu de 1300 NTU para 100 NTU, atingindo eficiência de aproximadamente 92%, o que demonstra desempenho altamente satisfatório para esse tipo de resíduo concentrado.

A automação do processo mostrou-se um recurso essencial para o controle e eficiência do sistema. O monitoramento em tempo real das variáveis físicas — pH, turbidez e condutividade — possibilitou o acionamento e desacionamento automático dos eletrodos, garantindo transferência elétrica precisa, estabilidade operacional e alta confiabilidade durante o tratamento. Essa integração tecnológica reforça a viabilidade do uso de sistemas automatizados em processos de tratamento de efluentes industriais, promovendo ganhos de eficiência, economia de recursos e sustentabilidade.

5. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo primordial o desenvolvimento de um sistema automatizado para tratamento de efluentes da indústria de laticínios por meio do processo de eletrofloculação, combinando inovação tecnológica e sustentabilidade hídrica. A pesquisa demonstrou que a integração entre automação industrial – utilizando componentes como Arduino, Soft PLC, supervisor AVEVA e protocolo Modbus RTU – e processos eletroquímicos permite um controle eficaz e contínuo das variáveis críticas do tratamento (pH, turbidez e condutividade), garantindo estabilidade operacional, redução do erro humano e otimização dos recursos aplicados.

Os experimentos realizados com diferentes tipos de efluentes representativos dos resíduos laticínios comprovaram a alta eficiência do processo, com remoção de turbidez acima de 85% para todos os casos, atingindo cerca de 92% para o efluente de leite em pó. O sistema promoveu aumento controlado do pH e redução significativa da condutividade elétrica, evidenciando a remoção de sais dissolvidos e a estabilização do meio tratado. Destaca-se que o efluente com maior desafio foi o proveniente da produção de manteiga e creme, devido à alta concentração de lipídeos, que embora tenha apresentado melhora significativa, demandará etapas complementares para polimento, como filtração ou separação por membranas.

Sob a perspectiva tecnológica, o uso da automação demonstrou ser essencial para o monitoramento e controle em tempo real, ativando automaticamente os eletrodos e ajustando as condições operacionais para maximizar a eficiência do processo, além de viabilizar a coleta de dados para análises futuras e possíveis modelagens preditivas. O projeto evidencia uma solução industrial de baixo custo, versátil e com elevado potencial de replicabilidade, alinhada aos princípios da indústria 4.0 e práticas sustentáveis, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e a preservação dos recursos hídricos.

Como continuidade, sugere-se a implementação do sistema em escala piloto industrial para validação e ajuste das condições em ambiente real, além do estudo da integração com outras tecnologias como nanofiltração e eletroxidação, com vistas a aperfeiçoar a qualidade do efluente tratado para cumprimento rigoroso das normas ambientais para reuso. A evolução do sistema inclui ainda o desenvolvimento de modelos preditivos para otimização energética e operacional, fortalecendo a competitividade e sustentabilidade da indústria de laticínios.

Recomenda-se a adoção da corrente pulsada no processo de eletrofloculação, visando maior eficiência energética e menor passivação dos eletrodos. Sugere-se, também, a integração da inteligência artificial ao sistema automatizado, de modo que, por meio de *machine learning* e banco de dados em nuvem, para que o processo possa aprender e otimizar parâmetros operacionais conforme o tipo de efluente. Por fim, destaca-se a inclusão de motores de passo para ajuste automático da distância entre os eletrodos, tornando o sistema mais flexível e adaptável.

Essa abordagem inovadora demonstra a viabilidade técnica e econômica da eletrofloculação automatizada como uma alternativa ambientalmente viável para o tratamento e reuso de efluentes, consolidando práticas industriais que promovem a sustentabilidade e a eficiência hídrica no setor laticinista.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. R.; COSTA, F. M. **Estudo comparativo entre corrente contínua e pulsada em processos de eletrocoagulação para tratamento de efluentes industriais**, 2023. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbesa>> Acesso em: 07 maio 2025.
- BAGNATO, V., RODRIGUES, V. Análogo mecânico para condutividade elétrica dos metais: efeito da temperatura: **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 28(1), 35–39, 2006. Disponível em: <<https://www.scielo.br>> Acesso em: 20 abr.2025.
- BELTRAME, T. F. et al. Efluentes, resíduos sólidos e educação ambiental: Uma discussão sobre o tema. Santa Maria: **Revista Eletrônica em gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v. 20, 2016.
- BENAZZI, T. **Otimização de um sistema de eletrofloculação em fluxo contínuo para o tratamento de efluentes líquidos das indústrias de laticínios**, 2013. Disponível em: <https://www.uricer.edu.br/site/cursos/arq_trabalhos_usuario/2301.pdf> Acesso em: 15 mar. 2025.
- CARDOSO, T. **Sensor de turbidez para análise de amostras de água**, 2011. Disponível em: <<https://core.ac.uk>> Acesso em: 05 abr.2025.
- CAVALLIN, F. **Estudo sobre redes de comunicação para automação industrial**. Paraná: Monografia de especialização Curitiba – UTFP, 2016.
- CERQUEIRA, A. A. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis**, 2006. *UERJ*. Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://www.bdt.d.uerj.br>> Acesso em: 20 mar. 2025.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **O problema da escassez de água no mundo**, 2008. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/tpos-de-agua/o-problema-da-escasez-de-agua-no-mundo>> Acesso em: 19 abr. 2025.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Leite em Números**. Disponível em: <<https://www.cileite.com.br/content/leite-numeros>> Acesso em: 19 abr. 2025.
- FLECK, L., TAVARES, M. H. F., & EYNG, E. Utilização da técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluentes têxteis: uma revisão, 2013. **Revista Eixo**, 2. Disponível em: <<https://doi.org/10.19123/eixo.v2i2.107>> Acesso em: 18 mar. 2025.
- FONSECA, R. M. **Tratamento de efluente de uma indústria de laticínios**, por meio do processo fenton, visando seu reuso. Espírito Santo: IFES, 2023.

FORNARI, M. **Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume**, 2007. UNIOESTE. PR. Disponível em: <<https://tede.unioeste.br/handle/tede/1866>> Acesso em: 21 mar. 2025.

GRECCO, L. H. A., SOUZA, B. C. A., ZANONI, M. V. B. **Eletrocoagulação/eletrofloculação para tratamento de águas residuárias: eletrodos não convencionais e acoplamento de técnicas**. São Paulo: Química Nova, 2022.

Manual de Normalização de TCC – Fatec SBC. Fatec, 2023.

MARTINS, I. A. **Aplicação de tratamento eletrolítico na remoção de cor de efluente têxtil**. Fortaleza: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – UFC, 2016.

MÓDENES, A. N. et al. **Aplicação da técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves**, 2017. Engenharia Sanitária e Ambiental. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa>. Acesso em: 3 maio 2025.

NADAL, B. A. **Processos eletrolíticos e de nanofiltração para produção de água de reúso a partir de efluentes de laticínios**. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimento. Passo Fundo: UPF, 2018.

NASCIMENTO, R. F. **Tratamento de efluentes por eletrocoagulação: fundamentos e aplicações**. Fortaleza: UFC, 2021.

PATSKO, L. **Tutorial montagem da ponte H**, 2006. Disponível em: <<http://www.maxwellbohr.com.br>> Acesso em: 27 abr. 2025.

PÉRES, A. et al. **Chuveiros eletrônicos: conhecer para ter consciência**, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4157.8084>> Acesso em: 27 mar 2025.

PRADANOV E FREITAS. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas**. Rio Grande do Sul: ed. Feevale, 2013.

REVISTA TÉCNICO CIENTÍFICA. **Fontes de alimentação**, 2023. Disponível em: <<https://www.robotica.pt/revista/>> Acesso em: 5 mar. 2025.

RODRIGUES, A. C.; MOURA, H. L. *Avaliação da corrente contínua pulsada em processos eletroquímicos: aplicação no tratamento de efluentes orgânicos.*, 2020. Disponível em: <<https://revistas.unis.edu.br/es>> Acesso em: 07 maio 2025.

SANTOS, G. A. et al. **Aplicação do Arduino uno em sistemas de automação residencial**, 2018. **Revista Campo Real**, 2ed. Disponível em: <<https://revista.camporeal.edu.br>> Acesso em: 02 mai. 2025.

SERRANO, M. **Estratégias de controle avançado para uma planta de tratamento de pH**, 2020. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br>> Acesso em: 05 mai. 2025.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 24.ed. São Paulo: Cortez, 2018.

SHONZA, N. **Análise do processo de eletrofloculação com eletrodos de alumínio e inversor de polaridade em fluxo contínuo no tratamento de água oleosa**. Espírito Santo: UFES, 2017.

SILVA, A. **Automação Industrial**. UFRN, 2018. Disponível em: <<https://www.dca.ufrn.br>> Acesso em: 02 mai. 2025.

SILVA, F. R. et al. **Eletrocoagulação: fundamentos, aplicações e perspectivas na engenharia ambiental**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2022.

SILVA, J. F. **Guia Básico de Bombas**, 2017. Disponível em: <https://www.academia.edu/31815447/GUIA_BASICICO_DE_BOMBAS> Acesso em: 17 mar. 2025.V

SOUZA, P. **Avaliação do reúso agrícola de águas oleosas da indústria de petróleo tratadas por eletrofloculação e osmose inversa: efeitos na germinação, no desenvolvimento de plântulas de girassol e em atributos do solo**, 2015. Disponível em: <<https://www.bdtd.uerj.br:8443/handle/1/15639>> Acesso em: 15 mar. 2025.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 8.ed. São Paulo: 2009

TORRES, L., ARAUJO, T. Modelos de Sistemas de Supervisão na Indústria 4.0. Revista interdisciplinar de pesquisa em engenharia, v. 9, p. 27 – 48, Pará Parauebas: PPG – Integridade, 2023.

SILVA, A. **Automação Industrial**. UFRN, 2018. Disponível em: <<https://www.dca.ufrn.br>> Acesso em: 02 mai. 2025.

SILVA, F. R. et al. **Eletrocoagulação: fundamentos, aplicações e perspectivas na engenharia ambiental**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2022.

SILVA, J. F. **Guia Básico de Bombas**, 2017. Disponível em: <https://www.academia.edu/31815447/GUIA_BASICICO_DE_BOMBAS> Acesso em: 17 mar. 2025.

VIANNA, W. DA S.; BRINGHENTI, P. M.; MARTINS, L. DOS S. SISTEMA SCADA SUPERVISÓRIO. Campos dos Goytacazes, RJ: Instituto Federal Fluminense de Educação Ciência e Tecnologia, dez. 2008.

ZANGHI, E. **Sistemas SCADA: Conceitos**. Porto, PT: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net>> Acesso em: 29 abr. 2025.