

REVISTA ELETRÔNICA
DE ENGENHARIA ELÉTRICA E
ENGENHARIA MECÂNICA



R4  12^a EM

EDIÇÃO
V.7.N.2.2025

CARTA DO EDITOR



Caros leitores, é com alegria que apresento mais uma edição da Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica - R4EM. Neste artigo conversaremos sobre as inúmeras oportunidades em projetos de extensão e eventos organizados pelos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica.

No Brasil, o modelo que sustenta o ensino superior é conhecido como o Tripé Universitário. Esse conceito estabelece que uma universidade plena deve equilibrar três funções fundamentais e indissociáveis, o Ensino, a Pesquisa e a Extensão, e a recente inclusão de um quarto pilar, a inovação tecnológica.

O Ensino é a base mais importante e conhecida, referindo-se à transmissão de conhecimento com foco nos estudantes de graduação e pós-graduação para preparar indivíduos qualificados para o mercado de trabalho e para o exercício da cidadania, garantindo que o saber científico seja disseminado. A pesquisa que foca na produção de novos conhecimentos para expandir as fronteiras do saber humano. É a extensão, sendo a ponte entre a universidade e a sociedade, garantindo que o conhecimento produzido nas universidades retorne para a comunidade. E por sua vez, a inovação transforma pesquisas em produtos e soluções que geram desenvolvimento econômico direto para a sociedade.

A extensão é um processo educativo, cultural e científico que articula o ensino e a pesquisa de forma prática, sendo uma Via de Mão Dupla, ou uma troca, onde a universidade entrega soluções técnicas, novas tecnologias, atendimento especializado e cultura, e a universidade recebe demandas reais da sociedade, que servem para atualizar o ensino e sugerir novos temas de pesquisa.

Desde 2018 o Ministério da Educação (MEC) exige que pelo menos 10% da carga horária total de qualquer curso de graduação seja dedicada a atividades de extensão. Isso significa que participar desses projetos não é mais apenas uma atividade extracurricular optativa, mas uma obrigação curricular para o aluno se formar. Essa curricularização da extensão foi regulamentada no Brasil pela Resolução nº 7, de 18 de dezembro de 2018, do Conselho Nacional de Educação (CNE). As diretrizes visam garantir que as atividades de extensão sejam parte integrante da formação acadêmica, alinhadas aos Projetos Pedagógicos dos Cursos (PPCs) e aos Planos de Desenvolvimento Institucional (PDIs) das instituições.

Mas qual é importância da extensão para o estudante universitário? Além de aplicar a teoria, há o desenvolvimento das Soft Skills, ou seja, empatia, comunicação, liderança e ética. Pensando nisso, como os cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica da UFERSA/Mossoró estão lidando com os projetos de extensão? A extensão universitária destes cursos na UFERSA consolida-se em 2025 como um elo vital entre o



conhecimento acadêmico e as demandas da sociedade. Por meio de uma colaboração estreita entre os cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, a instituição promove uma série de iniciativas que transformam a formação dos discentes e impactam positivamente a comunidade regional.

Em 2025, vários eventos de extensão foram destaque na UFERSA refletindo a diversidade de temas abordados, desde a alta tecnologia até debates sobre inclusão e educação:

- Caminhos e Desafios na Educação (Mesa Redonda), coordenada pela Profa. Samanta Mesquita de Holanda.
- VII Workshop do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, sob a coordenação do Prof. Isaac Barros Tavares da Silva.
- Tecnologias e Sistemas de Veículos Elétricos de Competição: Experiência da Equipe E-Cactus (Mesa Redonda), coordenado pelo Prof. Olympio Cipriano da Silva Filho.
- 2nd IEEE MTT-S Northeast Brazil Student Workshop também sob responsabilidade do Prof. Isaac Barros Tavares da Silva.
- IEEE RoadShow (Palestra) coordenado pelo Prof. Victor de Paula Brandão Aguiar.
- XI Semana de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica (XI SEMEE), sob a coordenação do Prof. Idalmir de Souza Queiroz Júnior.
- Educação no Universo STEM: Desafios e Oportunidades (Palestra), iniciativa coordenada pela Profa. Samanta Mesquita de Holanda.
- Mulheres que Inspiram 4ª Edição (Palestra), coordenada pela Profa. Samanta Mesquita de Holanda.

Entre os diversos projetos de extensão apresentados pelos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica da UFERSA/Mossoró, destacam-se:

Engenharia Elétrica: Inovação e Sociedade: O curso de Engenharia Elétrica mantém um portfólio robusto de projetos que visam a capacitação técnica e o serviço à comunidade:

1. Programa de Educação Tutorial – PET Mecânica & Energia: Coordenado atualmente pelo Prof. Francisco Edson Nogueira Fraga, promove cursos, monitorias, ciclos de palestras e visitas técnicas desde 2013, fazendo parte dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica.
2. Embarcação – Eletrônica Embarcada em Ação: Focado em formação básica para a área de sistemas embarcados, sob coordenação do Prof. Idalmir de Souza Queiroz Júnior.
3. TEMPLE – Treinamento Em Módulos e Práticas Laboratoriais de Eletrotécnica: Coordenado pelo Prof. Idalmir de Souza Queiroz Júnior, busca reduzir a lacuna prática na formação dos alunos.
4. Uso eficiente de energia na UFERSA: Sob coordenação da Profa. Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella, dissemina conceitos de consumo racional.
5. IEEE/MTTS/UFERSA – Capítulo Estudantil sobre Teoria e Técnicas de Microondas: Coordenado pelo Prof. Humberto Dionísio de Andrade.



6. SINERGY Júnior – Consultoria e Projetos: Empresa Júnior coordenada pelo Prof. André Pedro Fernandes Neto, que presta serviços a micro e pequenas empresas.
7. Ramo Estudantil do IEEE – UFERSA: Sob coordenação do Prof. Victor de Paula Brandão, envolve atividades humanitárias e científicas.
8. Fórmula SAE E-cactus: Coordenado pelo Prof. Olympio Cipriano da Silva Filho, foca no desenvolvimento de veículos elétricos.
9. Engenharia Elétrica em Foco: Ação de marketing e parcerias coordenada pelo Prof. Isaac Barros Tavares da Silva.
10. IEEE/PES/UFERSA 2024 – Capítulo estudantil Power And Energy Society: Coordenado pela Profa. Melinda Cesianara Silva da Cruz.
11. IEEE WiE (Women in Engineering) UFERSA – Mossoró: Iniciativa sob a coordenação da Profa. Samanta Mesquita de Holanda para atrair mulheres para a área STEM.
12. IEEE AP-S (Antennas and Propagation Society) UFERSA – Mossoró: Coordenado pelo Prof. Isaac Barros Tavares da Silva, foca em comunicações 5G/6G.
13. Mulheres que Inspiram: Evento coordenado pela Profa. Samanta Mesquita de Holanda.
14. Semana de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica: Atualmente sob coordenação do Prof. Idalmir de Souza Queiroz Júnior, permutando a cada ano, a coordenação com o curso de Engenharia Mecânica.

Engenharia Mecânica: Competição e Consultoria. A Engenharia Mecânica destaca-se por seus projetos competitivos de renome nacional e suporte industrial:

1. Programa de Educação Tutorial – PET Mecânica & Energia: Coordenado atualmente pelo Prof. Francisco Edson Nogueira Fraga, promove cursos, monitorias, ciclos de palestras e visitas técnicas desde 2013, fazendo parte dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica.
2. Cactus Baja: Coordenado por Zoroastro Torres Vilar, utiliza protótipos para incentivar o ensino de física e engenharia em escolas.
3. PegAzuls Aerodesign: Sob coordenação de Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras, envolve o projeto e manufatura de aeronaves.
4. PAFEM - Práticas Auxiliares de Formação Complementar de Engenharia Mecânica: Coordenado por Francisco Edson Nogueira Fraga, com foco em vivência técnica industrial.
5. Mechanics Consultoria e Serviços: Empresa júnior coordenada por Romulo Pierre Batista dos Reis, focada em pequenas empresas locais.
6. Semana de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica (SEMEE): Semana de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica: Atualmente sob coordenação do Prof. Idalmir de Souza Queiroz Júnior, permutando a cada ano, a coordenação com o curso de Engenharia Mecânica.

A força da extensão na UFERSA reside na indissociabilidade entre ensino, pesquisa e prática. Projetos como os destacados anteriormente não apenas qualificam o futuro engenheiro para o mercado, mas também levam inovação gratuita e acessível para a comunidade de Mossoró e região.



Atenciosamente,

Mossoró, 22 de dezembro de 2025.

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior

Editor Chefe da R4EM

ARTIGO CONVIDADO

PROJETO FÓRMULA SAE EQUIPE E-CACTUS: DESAFIOS, IMPACTO E OPORTUNIDADES



Prof. Dr. OLYMPIO CIPRIANO DA SILVA FILHO
Docente da Universidade Federal Rural do Semi-Árido/UFERSA
Doutor em Eng. Elétrica pela Universidade Federal do Ceará/UFC
Graduação em Eng. Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande/UFCG
E-mail: olympio.cipriano@ufersa.edu.br

O Fórmula SAE surgiu em 1981 como uma competição entre estudantes universitários com objetivo de construir um veículo tipo fórmula com motores a combustão. Devido ao crescimento da relevância da eletrificação, o Fórmula SAE Elétrico surgiu como uma evolução natural do Fórmula SAE a combustão. A competição precursora da modalidade elétrica ocorreu em 2007 nos EUA com a criação do Formula Hybrid, que muito embora não fosse 100% elétrica foi a primeira a utilizar motores elétricos como propulsão. A primeira competição 100% elétrica ocorreu na Alemanha, que já contava com a prestigiada categoria própria, a Formula Student, e introduziu em 2010 a competição Formula Student Electric. Em 2013, os EUA oficializaram a categoria elétrica nas suas competições com o Formula SAE Elétrico.

O Brasil acompanhou de perto o cenário mundial através do incentivo da SAE Brasil (Sociedade dos Engenheiros Automotivos do Brasil) diretamente à FEI em 2011 (Fundação Educacional Inaciana), uma faculdade privada de São Bernardo do Campo - SP, para a construção do primeiro protótipo elétrico nacional. Em 2012 a categoria Formula SAE Elétrico debutou no território nacional.

Atualmente, existe um circuito de competições que ocorrem em diversos países do mundo como EUA, Alemanha, Reino Unido, Itália, Austrália, Japão, Áustria, etc. Nesses países as competições regionais e nacionais seguem os regulamentos da FSAE ou o regulamento da Formula Student (derivado da FSAE e mantido pela Alemanha e seguido por outros países europeus). Muito embora os regulamentos dessas duas categorias sejam diferentes há uma compatibilidade de aproximadamente 90% entre eles, o que muitas vezes faz com que os termos FSAE e Formula Student sejam encarados como intercambiáveis em muitos casos.

Na UFERSA (Universidade Federal Rural do Semi-árido), a primeira equipe foi formada em 2019, inspirada nas equipes européias alemãs, que já possuem uma forte tradição na modalidade e estão entre as melhores do mundo.



De lá para cá, mais de 70 alunos participaram do projeto na UFRSA, provenientes na sua grande maioria dos cursos como Bacharelado em Ciência e Tecnologia (CeT), Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica. Durante a vivência destes estudantes no projeto eles tiveram a oportunidade de desenvolver uma série de habilidades técnicas e não técnicas (*soft skills*) que não são desenvolvidas em sala de aula, mas que são muito valorizadas no mercado de trabalho destes futuros profissionais.

As habilidades não técnicas são desenvolvidas, em grande parte, pela forma como a equipe é organizada. O próprio regulamento da competição faz com que os membros do time se organizem como uma empresa, dividindo a força de trabalho entre áreas técnicas,

administrativas, marketing, etc. Desta forma, eles têm que trabalhar em equipe e, para isso, devem desenvolver uma comunicação assertiva. Também precisam ser capazes de delegar tarefas, liderar pessoas e gerir o tempo de forma adequada entre as demandas do projeto e as disciplinas da universidade. Como no mercado de trabalho e na vida, eles precisam apresentar resiliência e ser capazes de gerir as frustrações das falhas, dos erros dos colegas, dentre outras situações de estresse que surgem naturalmente no andamento de um projeto deste tipo.

Com relação às habilidades técnicas, muitas delas são desenvolvidas pelos alunos antes mesmo do conhecimento teórico ser obtido nas disciplinas. Isso ocorre porque boa parte dos membros do projeto são de CeT. Isso, no entanto, não é empecilho para a realização das tarefas necessárias, uma vez que o processo de entendimento do problema, busca por conhecimento para resolvê-lo faz parte do mundo da engenharia e inevitavelmente os alunos enfrentam este tipo de situação. Os alunos participantes do projeto têm a oportunidade reforçam no projeto conhecimentos adquiridos nos cursos, mas também tem a necessidade de obter conhecimentos avançados em engenharia automotiva, que não são ministrados em nenhum dos cursos da universidade. Essa lacuna de conhecimento é preenchida através de cursos rápidos ministrados pelos professores dos cursos de Engenharia Elétrica e Mecânica e também de orientação acerca da melhor solução para os problemas que eles enfrentam. Outro aspecto importante a ser ressaltado é que os integrantes que cursam um determinado curso têm que ter conhecimento básico sobre outras áreas que não fazem parte do seu currículo de formação, mas que interferem em seu trabalho dentro da equipe, propiciando a vivência na multidisciplinaridade na prática.

O projeto, apesar de todas essas vantagens, enfrenta desafios quanto à sua execução. A construção de um veículo elétrico é muito mais intensiva em recursos financeiros do que sua contraparte a combustão. Isso ocorre, por que o Brasil não possui uma indústria de autopeças desenvolvida para veículos elétricos, fazendo com que boa parte de materiais essenciais na construção deste tipo de veículo como, chaves especiais, contatos de uso automotivo, precise ser importada elevando consideravelmente o custo de produção. Para amenizar esse problema e não depender apenas do financiamento da UFRSA, o que inviabilizaria a construção do protótipo, a equipe sempre está em busca de patrocínios de empresas nacionais e internacionais. Já foram estabelecidas parcerias com grandes empresas nacionais a exemplo da fabricante de motos Yamaha, que forneceu todo o sistema de freios utilizados atualmente pela equipe e com a fornecedora de peças e materiais elétricos TE Connectivity, que já forneceu inúmeros itens necessários para o veículo economizando milhares de reais na sua construção.

Apesar do investimento elevado, as oportunidades são inúmeras para os diversos atores envolvidos. Do ponto de vista da universidade, esta alcança visibilidade através da participação das equipes em eventos



nacionais alçando-se como uma instituição que possui cursos de engenharia de excelência. O projeto também permite a produção científica através da orientação de trabalhos de conclusão de curso, orientações de trabalhos de mestrado e produção de artigos para congressos e revistas. Além disso, um projeto deste porte torna mais fácil a produção de desenhos ou soluções específicas que podem resultar em pedidos de patente, registros de software ou registros de desenhos técnicos, elevando os indicadores da instituição.

Do ponto de vista dos discentes participantes, além das habilidades técnicas e o conjunto de soft skills, e a prática de conhecimentos de sala de aula em um problema real, a participação no projeto se torna um diferencial procurado por muitas empresas no currículo, diferenciando o membro dos demais profissionais que não tiveram essa experiência.



EDITORES-CHEFE

Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga
Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior

EDITORES-ADJUNTOS

José David de Araújo
Mateus Pereira da Silva

EDITORIAÇÃO

Gabriel Marcos De Oliveira Meira
Joao Pedro Lopes Gois
Matheus Henrique Medeiros de França
Pedro Gabriel Cosme dos Santos

CONSELHO EDITORIAL

Dr. Adelson Menezes Lima (UFERSA/Campus Pau dos Ferros)
Dra. Adiana Nascimento Silva (UFERSA/Campus Caraúbas)
MSc. Danilo de Souza (IFRN/Campus Mossoró)
Dra. Fabiana Karla de Oliveira M. Varella (UFERSA/Campus Mossoró)
Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga (UFERSA/Campus Mossoró)
Dr. Francisco Ilson da Silva Junior (UFC)
Dr. Glauco Fontgalland (UFCG)
MSc. Herick Talles Queiroz Lemos (IFPE/Campus Pesqueira)
Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior (UFERSA/Campus Mossoró)
Dr. José Hilton Ferreira da Silva (UFCG)
Dr. Kleiber Lima de Bessa (UFRN)
Dr. Taciano Amaral Sorrentino (UFERSA/C&T Mossoró)
Dr. Zoroastro Torres Vilar (UFERSA/Campus Mossoró)

DESIGN EDITORIAL

Matheus Henrique Medeiros de França

APOIO

Universidade Federal Rural do Semi-Árido



Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica
ISSN 2763-5325 | DOI: <https://doi.org/10.21708/issn27635325>



Av. Francisco Mota, 572. Bairro Costa e Silva, Mossoró-RN.

EDITORA

EDUFERSA

*Av. Francisco Mota, 572. Bairro Costa e Silva. Mossoró-RN, UFRSA Campus Leste,
Centro de Convivência. E-mail: edufersa@ufersa.edu.br*

AUTOR CORPORATIVO

PET MECÂNICA E ENERGIA

*Programa de Educação Tutorial dos Cursos de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica
Av. Francisco Mota, 572. Bairro Costa e Silva. Mossoró-RN, UFRSA Campus Leste / Centro
de Engenharias / Departamento de Engenharia e Tecnologia.
E-mail: r4em@ufersa.edu.br*



SUMÁRIO

Descarte de módulos fotovoltaicos no Brasil: logística reversa e crescimento do setor.....1

Emylle Cristine Alves e Silva, Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella

Bancada didática para controle de nível e temperatura: Integração do CLP FX3U com o sistema SCADA Elipse.....12

Caio Henrique Vieira Alves, João Victor da Silva Fernandes, Geronimo Barbosa Alexandre

Artigo

Descarte de módulos fotovoltaicos no Brasil: logística reversa e crescimento do setor

Emylle Cristine Alves e Silva ⁽¹⁾ e Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal Rural do Semi-árido; emylle.silva@alunos.ufersa.edu.br

⁽²⁾ Universidade Federal Rural do Semi-árido; fkv@ufersa.edu.br

Recebido: 21/05/2025;

Aceito: 19/11/2025;

Publicado: 22/12/2025.

Resumo: O crescimento da energia solar fotovoltaica é nítida em diversas pesquisas e levantamentos energéticos. Em paralelo a isto, vem sendo discutido o descarte dos módulos fotovoltaicos presentes nos sistemas e quais as consequências do fim de sua vida útil. Desse modo, estudos sobre a gestão de resíduos fotovoltaicos mostram a opção da reciclagem dos módulos para recuperação de mais de 90% do seu material e reutilizá-lo. Logo, o referido artigo tem como objetivo identificar e avaliar o cenário da energia solar fotovoltaica no Brasil, desde as políticas praticadas atualmente no setor; a importância da logística reversa no descarte dos módulos FV (fotovoltaicos) e, por fim, realizar uma estimativa média de descarte de módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil, mediante legislação vigente. Para isso, a metodologia foi baseada em uma revisão na literatura acerca do panorama atual da energia fotovoltaica no país, em conjunto com o crescimento do setor e a legislação em vigor para o descarte correto dos módulos fotovoltaicos. Na sequência, foi analisada uma estimativa dos módulos a serem descartados mediante o crescimento do setor a partir de 2018, conforme a potência instalada dos respectivos anos em estudo. Por fim, foi apontada a necessidade em ter uma legislação voltada para logística reversa dos módulos FV, mediante a estimativa encontrada dos módulos fotovoltaicos a serem despesados ao final de sua vida útil.

Palavras-chave: resíduos fotovoltaicos; reciclagem; logística reversa.

Disposal of photovoltaic modules in Brazil: reverse logistics and sector growth

Abstract: The growth of photovoltaic solar energy is clear in various research and energy surveys. In parallel to this, the disposal of photovoltaic modules present in the systems and the consequences of the end of their useful life have been discussed. Therefore, studies on photovoltaic waste management show the option of recycling modules to recover more than 90% of their material and reuse it. Therefore, this article aims to identify and evaluate the scenario of photovoltaic solar energy in Brazil, from the policies currently practiced in the sector; the importance of reverse logistics in the disposal of PV (photovoltaic) modules and, finally, carrying out an average estimate of the disposal of photovoltaic modules at the end of their useful life, according to current legislation. For this, the methodology was based on a literature review about the current panorama of photovoltaic energy in the country, together with the growth of the sector and the legislation in force for the correct disposal of photovoltaic modules. Subsequently, an estimate of the modules to be discarded due to the growth of the sector from 2018 onwards was analyzed, according to the installed power of the respective years under study. Finally, the need to have legislation focused on the reverse logistics of PV modules was highlighted, based on the estimated number of photovoltaic modules to be removed at the end of their useful life.

Key-words: photovoltaic waste; recycling; reverse logistic.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, aproximadamente, 50% de sua matriz energética é voltada em recursos hídricos para geração de energia elétrica [1]. Mesmo que uma notória porcentagem de sua matriz seja proveniente de uma fonte renovável, é preciso uma maior diversificação evitando assim um comprometimento do seu desenvolvimento em função, por exemplo, da escassez de chuvas.

Sendo assim, o país passou a investir maciçamente em fontes de energia mais limpas e menos invasivas ao meio ambiente, dentre estas, encontra-se a que será destacada no presente artigo, no caso, o aproveitamento da energia solar. Segundo dados de [2], a energia solar fotovoltaica já ultrapassou a faixa dos 35 GW de capacidade instalada no Brasil, entre sistemas de geração centralizada, ou seja, as unidades de grande porte, e assim como na geração distribuída, as usinas instaladas em residências, comércio, indústria e outros.

Vale destacar que a energia solar FV [2] cresce exponencialmente, representando um total de 35 GW de energia instalada em território brasileiro, onde 24 GW representa a capacidade instalada de geração distribuída, sendo liderada pela classe de consumo residencial, representando 11,8 GW, em sequência as classes comercial, rural e industrial, com 6,9 GW, 3,5 GW e 1,7 GW, respectivamente. Como também, a geração centralizada atinge 10,68 GW de capacidade instalada, com seus principais empreendimentos no estado de Minas Gerais, 3,5 GW e na região Nordeste, 4,67 GW.

Como observado, o desenvolvimento da energia solar cresce em ritmo acelerado. Sendo assim, o descarte dos módulos fotovoltaicos acaba não sendo proporcional a sua instalação, onde as políticas públicas referentes ao seu descarte são prematuras. Neste contexto, é importante mencionar que o descarte indevido dos módulos fotovoltaicos pode levar a contaminação do solo e dos lençóis freáticos, como também a morte da fauna e flora por toxicidade, visto que são os metais causadores do maior impacto ambiental.

Diante o exposto, como alternativa para sanar um possível dano ambiental, a reciclagem dos módulos FV é tida como uma solução. Sendo assim, é essencial que haja uma discussão acerca da logística reversa dos módulos fotovoltaicos para os cenários atuais e futuros.

O referido artigo tem como objetivo identificar e avaliar o cenário da energia solar fotovoltaica no Brasil, desde as políticas praticadas atualmente no setor; a importância da logística reversa no descarte dos módulos FV e, por fim, realizar uma estimativa média de descarte de módulos fotovoltaicos ao final de sua vida útil, mediante legislação vigente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção mostra o panorama atual do uso da energia solar fotovoltaica no Brasil, tanto para os sistemas distribuídos quanto para os sistemas centralizados. Tais informações são relevantes e contextualizam a temática aqui estudada.

2.1. Setor fotovoltaico no Brasil

De acordo com [3], conforme o Relatório de Status Global Renovável – REN21, em 2021, houve um aumento significativo de 27% em investimentos em energias renováveis em território nacional. Esse aumento superou o registrado durante o auge dos investimentos em biocombustíveis em 2008. Especificamente, o investimento em energia solar foi impulsionado, em parte, pelas baixas taxas de juros decorrentes da pandemia de COVID-19 e pelos preços elevados da eletricidade devido à pior seca em quase um século.

Por conta de sua posição geográfica, o país desfruta de elevados índices de incidência de radiação solar, os quais são uniformemente distribuídos em todo território nacional. Esse cenário possibilita o desenvolvimento de projetos viáveis em diversas regiões, transformando a energia solar, através de sistemas fotovoltaicos, uma alternativa competitiva para o fornecimento de energia [3]. Além disso, essa fonte energética pode colaborar com os compromissos nacionais de redução das emissões de gases de efeito estufa.

2.1.1. Sistemas fotovoltaicos distribuídos

A geração distribuída (GD) se tornou um marco nos modelos de consumo, a mesma permite que os consumidores assumam um papel ativo na geração de energia, instalando sistemas fotovoltaicos em suas residências para produção de energia elétrica, suprimindo sua demanda total ou parcialmente. Além disso, os consumidores podem abater o valor financeiro, do que foi gerado, em sua fatura de energia, valor este que seria pago à distribuidora de energia elétrica.

Desde 2020, a geração distribuída passou a duplicar o seu crescimento comparada à geração centralizada. No que refere a participação da energia solar fotovoltaica no Brasil, observa-se que em dezembro de 2023 a GD contava com 69% de potência instalada no país, enquanto a geração centralizada contribuía com 31% do montante.

Na Figura 1, os anos de 2009 a 2017 representam uma pequena quantidade de pontos de GD que, comparados ao crescimento atual, se tornam insignificantes. Vale ainda mencionar que somente no ano de 2012 entrou em vigor a primeira Resolução Normativa da ANEEL, nº 482, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil [4].

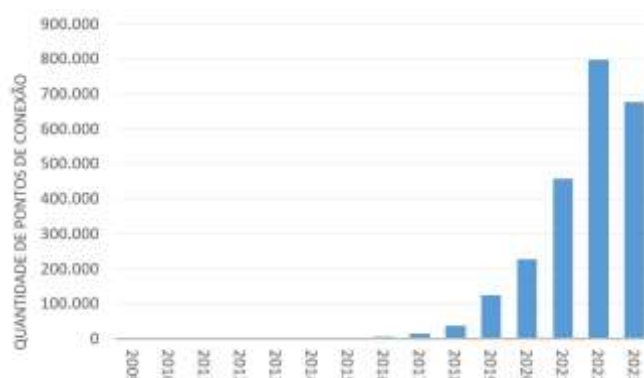


FIGURA 1. Histograma das conexões por ano. Fonte: Adaptado de [4].

A partir de 2018 as conexões passaram a serem mais relevantes, sendo de 36.329, o equivalente a 451,842 MW de potência instalada. Em sequência os anos de 2019 com 123.640 pontos, 2020 com 226.747 pontos, 2021 com 458.215 pontos, 2022 com 797.444 pontos e 2023 com 677.106 pontos, e suas potências instaladas de 1,631 GW, 2,998 GW, 4,745 GW, 8,312 GW e 8,277 GW, respectivamente. O ano atual, ou seja, 2024, não consta na Figura 1, pois a pesquisa aqui realizada encontra-se ainda no primeiro trimestre do vigente ano, porém, pode-se destacar que nos primeiros três meses do ano de 2024 já há 127.029 pontos de conexão e 1,382 GW de potência instalada [4].

As distribuidoras de energia elétrica responsáveis pelos projetos fotovoltaicos em território nacional são inúmeras, sendo mais de 100 distribuidoras, que somadas correspondem a 28,041 GW de potência instalada no Brasil [5]. No *ranking* estadual, os cinco estados que lideram a potência instalada são São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso, conforme Tabela 1.

TABELA 1. Potência instalada de GD por estado. Fonte: Adaptado de [4].

<i>Estados</i>	<i>Quantidade de GD</i>	<i>Potência instalada</i>	<i>Potência instalada [%]</i>
São Paulo	398.601	3,862	13,78
Minas Gerais	282.283	3,712	13,24
Rio Grande do Sul	296.914	2,703	9,64
Paraná	202.772	2,646	9,43
Mato Grosso	121.142	1,708	6,09

De acordo com a Tabela 1, é possível observar que as regiões sudeste e sul do país lideram o *ranking* dos estados de maior potência instalada, onde, apenas, os estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Paraná, correspondem quase a metade da potência outorgada no Brasil.

2.1.2. Sistemas fotovoltaicos centralizados

A geração centralizada (GC) consiste na produção de energia solar em larga escala por meio de usinas de grande porte, instaladas em áreas extensas com alto índice de irradiação solar, tendo como objetivo o consumo próprio ou a venda de energia.

No Brasil, há um total de 18.248 usinas fotovoltaicas de GC em operação [5] sendo responsável por um total de 12,757 GW de potência outorgada. Considerando os estados de potência instalada mais relevantes, tem-se: Minas Gerais, Bahia, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, São Paulo e Paraíba. O *ranking* dos estados que apresentam maior potência instalada é mostrado na Tabela 2.

TABELA 2. Potência instalada de GC por estado. Fonte: Adaptado de [5].

Como observado na Tabela 2, diferente da Tabela 1 de GD, a região que lidera o *ranking* dos estados com

<i>Estado</i>	<i>Número de usinas</i>	<i>Potência instalada</i>	<i>Potência instalada [%]</i>
Minas Gerais	121	4,205	32,98
Bahia	71	2,052	16,08
Piauí	52	1,514	11,87
Ceará	51	1,251	9,79
Rio Grande do Norte	39	1,100	8,62

maior potência instalada é a região Nordeste, correspondentes aos estados de Bahia, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, que, juntos, representam quase a metade de potência outorgada das usinas de GC em operação.

Além das usinas em operação, devem ser mencionadas as usinas em fase de construção e as que ainda não tiveram sua construção iniciada, que já se encontram outorgadas apenas aguardando a finalização e início de construção, respectivamente. Em fase de construção, encontram-se 169 usinas, distribuídas nos estados de Minas Gerais, Piauí, Rio Grande do Norte, Ceará, Paraíba, Bahia, São Paulo e Pernambuco, onde somadas representam uma potência outorgada de mais de 7 GW. Em contrapartida, há projetos com obras ainda não iniciadas para 2.828 usinas de GC, em 15 estados do país, estimadas em mais de 124 GW de potência [5].

3. METODOLOGIA

Considerando os dados impostos na seção dois, essa seção trata sobre a metodologia utilizada no desenvolvimento deste artigo, mostrando a gestão dos resíduos fotovoltaicos; a política nacional de resíduos sólidos; a problemática no setor fotovoltaico; e a logística reversa do setor.

Para atingir os objetivos e expor a problemática proposta, foi realizada uma revisão da literatura acerca do panorama atual da energia fotovoltaica no Brasil, em conjunto com o crescimento do setor e a legislação em vigor para o descarte correto dos módulos fotovoltaicos. Para isto, a metodologia foi dividida em sete etapas, como mostra a Figura 2.



FIGURA 2. Etapas do trabalho. Fonte: Autoria própria.

Detalhando as etapas da pesquisa:

(1) Definição da problemática: a primeira etapa foi a definição de uma problemática futura para servir como base em toda revisão bibliográfica. A problemática foi escolhida mediante o crescimento do setor fotovoltaico e quais problemas podem acarretar para a sociedade.

(2) Busca na literatura: a segunda etapa foi voltada para buscas por artigos, pesquisas, teses, normas, decretos e demais documentos considerados relevantes para agregar na pesquisa. As fontes de pesquisas foram

bases de dados científicas como SciELO e Google Acadêmico, sites governamentais e outros repositórios de dados.

(3) Gestão dos resíduos fotovoltaicos: a terceira etapa é explicada sobre a composição dos módulos fotovoltaicos, voltado para gestão dos seus resíduos ao fim de sua vida útil.

(4) Política Nacional de Resíduos Sólidos: a quarta etapa é voltada para legislação que rege os módulos FV e materiais presentes em sua composição.

(5) Problemática no setor fotovoltaico: na quinta etapa é mostrada a consequência no descarte incorreto dos módulos em decorrência da falta de políticas específicas para o setor.

(6) Logística reversa: na sexta etapa é explicado o conceito de logística reversa, além das ferramentas para ser empregada esta logística do setor FV.

(7) Análise e síntese do problema: na sétima, e última etapa, foi realizada uma análise a partir de todos dados obtidos mostrando, nos resultados, uma estimativa dos módulos descartados ao final de sua vida útil.

3.1. Gestão dos resíduos fotovoltaicos

Atualmente, a quantidade de módulos fotovoltaicos no fim de sua vida útil, no Brasil, são relativamente irrelevantes, em função de sua vida útil em torno de 25 anos a contar do período de sua instalação. Porém, espera-se que esse número aumente significativamente em um futuro próximo, suscitando preocupações sobre uma gestão adequada.

Os principais componentes utilizados para produções dos módulos fotovoltaicos convencionais são: as células fotovoltaicas (feitas de silício – Si), vidro, encapsulamento de EVA (acetato-vinilo de etileno), backsheet, caixa de junção e a moldura de alumínio [6], representada na Figura 3.

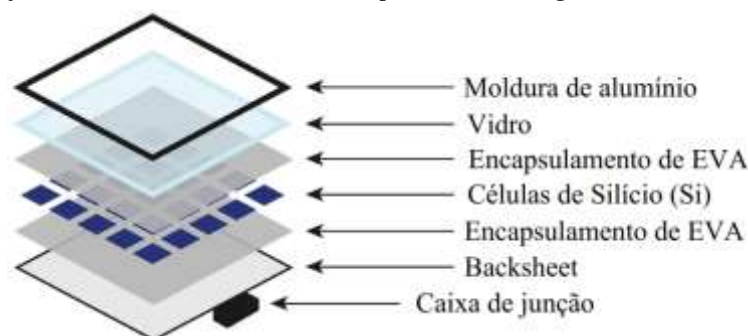


FIGURA 3. Diagrama das camadas de um módulo FV de silício convencional. Fonte: [6].

De acordo com [7], em junho de 2016, foi representada a projeção dos resíduos fotovoltaicos em vários países, no horizonte até 2050. No Brasil, foi estimado um montante acumulado de 300.000 toneladas, caso seja uma perda regular (ou seja, uma perda esperada em função da sua vida útil) dos módulos, e 750.000 toneladas, caso seja uma perda antecipada.

As principais tecnologias fotovoltaicas no mercado incluem: i) os módulos de silício (Si) cristalino de primeira geração, que detêm uma boa parcela do mercado fotovoltaico; ii) as tecnologias de filme fino de segunda geração; e iii) os módulos fotovoltaicos de terceira geração [8].

Atualmente, há uma preocupação em tornar essa fonte de energia mais eficiente e econômica em comparação com as demais, entretanto os impactos após o fim da vida útil desses equipamentos nem sempre são levados em consideração. Tais impactos, que serão expostos posteriormente, continuarão a existir se não houver uma mudança no paradigma da fabricação atual, que segue em um fluxo de material linear, desde a extração até a fabricação dos produtos, uso e descarte como resíduos em aterros. Este modelo, de ciclo de material em circuito aberto, está associado à economia atual de produção e gestão de resíduos [8].

Apesar da produção de energia solar ser reconhecida como ambientalmente benigna [9], a sustentabilidade a longo prazo dependerá, principalmente, da eficácia das soluções de processamento para reciclar o grande volume de módulos solares no fim de vida, que serão gerados em breve. Os resíduos provenientes dos módulos FV estão entre os fluxos de resíduos de crescimento mais acelerado na categoria de grandes resíduos eletrônicos, também conhecido como lixo eletrônico.

3.2. Política nacional de resíduos sólidos

A lei nº 12.305/2012 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), abordando seus princípios, metas e ferramentas, além de direcionar a gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos, incluindo os perigosos. A lei também define as responsabilidades dos geradores e do poder público, bem como os instrumentos econômicos aplicáveis [11]. A PNRS inseriu em suas seções a definição de logística reversa e responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos como meio de instrumento para sua política.

Dez anos mais tarde, em 2022, foi criado o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), estabelecido pelo decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022, e desempenha um papel fundamental como parte da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Este documento fornece um roteiro para alcançar os objetivos e concretizar essa política, através de diretrizes, estratégias, ações e metas destinadas a aprimorar a gestão de resíduos sólidos no país [10]. Vale ressaltar que os resíduos dos módulos fotovoltaicos, tidos como lixo eletrônico, também são regidos pela PNRS, visto que os componentes presentes no módulos se enquadram como resíduos sólidos.

A responsabilidade compartilhada é estabelecida por [12] como uma divisão de funções, onde o consumidor, enquanto cidadão, é encarregado de descartar os resíduos conforme as orientações e locais determinados pelos sistemas de logística reversa. Já o setor privado assume a responsabilidade pelo gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos, reintegrando-os à cadeia produtiva, adotando medidas que promovam benefícios socioambientais, utilizando os materiais de forma racional prevenindo a poluição ambiental. Por fim, o Poder Público tem o dever de fiscalizar o processo e, em conjunto com os demais responsáveis pelo sistema, conscientizar e educar os cidadãos.

3.3. Problemática no setor fotovoltaico

O impacto ambiental é descrito pela norma ABNT NBR ISO 14001 como qualquer alteração no meio ambiente, podendo ser positiva ou negativa, que ocorre total ou parcialmente devido aos aspectos ambientais de uma organização. Os aspectos ambientais referem-se aos elementos das atividades, produtos ou serviços dessa organização, que têm interações atuais com o meio ambiente [13].

Em uma pesquisa realizada pela *Green Eletron* [14], no ano de 2021, empresa especializada em logística reversa de eletrônicos, mostra que, anualmente, mais de 53 milhões de toneladas de equipamentos eletrônicos são descartados incorretamente. O Brasil ocupa o quinto lugar no *ranking* mundial e o primeiro na América Latina no descarte incorreto de eletrônicos [14]. Vale ressaltar que a pesquisa não leva em conta o descarte dos módulos FV, logo, se não forem pensados em modos e investir recursos para reciclagem e logística reversa dos módulos, a expectativa é que esse número cresça exponencialmente.

A maior preocupação relacionada à energia solar fotovoltaica ocorre durante o descarte dos componentes desativados. Os módulos atualmente em operação contêm elementos tóxicos e contaminantes potencialmente perigosos, que, se descartados de forma inadequada, podem contaminar o solo e os lençóis freáticos [15].

Como citado em tópicos anteriores, os módulos de silício cristalino de primeira geração são os mais difundidos no mercado [8]. Entretanto, podem surgir desafios na reciclagem desses módulos, já que contêm silício, prata e pequenas quantidades de elementos como estanho e chumbo, que, juntos, representam 4% da massa. Os painéis de segunda geração, com as tecnologias de filmes finos, são compostos por mais de 98% de vidro, polímero e alumínio, classificados como resíduos não perigosos. No entanto, também contêm quantidades modestas de cobre e zinco, totalizando cerca de 2% da massa, o que representa um potencial risco ambiental. Os mesmos também incluem semicondutores ou materiais considerados como perigosos, como índio, gálio, selênio, cádmio, telúrio e chumbo, necessitando assim de um tratamento especial [7].

Sendo assim, devido à rápida expansão do uso de tecnologias fotovoltaicas, em conjunto com o lamentável histórico de descarte inadequado de materiais, especialmente os contaminantes, surge uma preocupação quanto ao desequilíbrio entre as ações prejudiciais ao meio ambiente e as que visam garantir a qualidade de vida para as gerações futuras [15].

Vale ressaltar que, de acordo com [16], a principal dificuldade relacionada à quantidade de resíduos provenientes dos módulos fotovoltaicos é que, se não forem descartados e tratados de uma forma apropriada, podem desencadear impactos ambientais adversos ao meio ambiente e a saúde humana. Esses impactos são relacionados à lixiviação de chumbo e cádmio, à perda de recursos convencionais, como vidro e alumínio, e à escassez de metais raros, incluindo prata, índio, gálio e germânio.

Tal preocupação está presente no Plano Nacional de Energia (PNE) 2050, onde é imprescindível articular com os líderes governamentais e setoriais para direcionar a regulação relativa à devida reciclagem dos componentes fotovoltaicos. O local onde se deve reciclar os componentes não apresenta desafios tecnológicos significativos, porém requer colaboração com órgãos ambientais e instituições governamentais para estabelecer regulamentações de descarte que incentivem o desenvolvimento de uma cadeia industrial voltada para a logística de reciclagem de tais componentes [17].

3.4. Logística reversa

A logística reversa serve como instrumento para facilitar o recolhimento, a separação e a destinação apropriada de materiais que atingiram o final de sua vida útil, reintegrando-os à cadeia produtiva [12]. Os materiais envolvidos nesse processo percorrem uma sequência de etapas, que incluem coleta, seleção, classificação e reciclagem. Possibilitando que uma variedade de itens seja reaproveitada em diversas aplicações [15].

Mediante o cenário atual do setor fotovoltaico no Brasil, o país passou a criar diversos programas e a legislação passou a se adaptar a sua evolução, de modo a incentivar o uso desta fonte de energia. O alto custo, por exemplo, era um dos principais impedimentos para obtenção de um sistema de geração solar fotovoltaica, onde a legislação atual é conforme a Lei nº 14.300/2022¹.

Mediante a tais adequações foi criado o decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, que estabelece diretrizes para a implementação de logística reversa obrigatória para produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e suas partes constituintes. Os módulos fotovoltaicos estão presentes na lista de relação dos objetos de logística reversa. Logo, torna-se obrigação dos fabricantes, fornecedores e comerciantes, disponibilizarem um ponto de coleta para os consumidores para que, posteriormente, seja feita a reciclagem dos módulos, arcando assim com toda a logística reversa. Assim, caso haja privatização de responsabilidade, o transgressor será penalizado mediante sanções previstas em lei [18].

A implementação e estruturação do decreto nº 10.240 [18] ocorrerá em duas fases. A fase I foi iniciada na data de publicação do decreto com previsão para ser finalizada dia 31 de dezembro de 2020. Esta primeira fase tem como intuito a criação do grupo de acompanhamento de performance, sendo ele formado pelas entidades que farão parte do referido sistema, desde os fabricantes nacionais até os comerciantes, onde eles devem acompanhar e divulgar a sua implementação. Além da criação do grupo, tais participantes devem demonstrar adesão às entidades gestoras do sistema, como também os órgãos governamentais, sendo eles o Ministério do Meio Ambiente e o Ibama. É instituído o mecanismo financeiro para sustentar a operação de logística reversa, onde será repassado pelas empresas através de pagamentos diretos às entidades gestoras, de tal modo que todas as fases do sistema serão contempladas, como também será destinado de um modo diferenciado para cada tipo de produto eletroeletrônico, mediante critérios técnicos e econômicos. Por fim, o grupo de acompanhamento de performance realiza a estruturação do mecanismo para realizar o monitoramento e acompanhamento do sistema pelos órgãos responsáveis.

Sendo a fase I mais voltada para a gestão das partes, a fase II [18], iniciada dia 1 de janeiro de 2021, contempla a aptidão dos prestadores de serviço dispostos a aderir o decreto, a divulgação do sistema de logística reversa para despertar o interesse em gestores municipais, demonstrando assim o seu apoio, e, finalizando, a criação de pontos de coleta. Em sua implementação, foram criadas metas anuais do percentual que será coletado anualmente, conforme Tabela 3.

TABELA 3. Cronograma para atendimento de meta percentual a ser coletada e destinada anualmente. Fonte: Adaptado de [18].

Ano	2021	2022	2023	2024	2025
Percentual	1%	3%	6%	12%	17%

Entretanto, é importante mencionar que o decreto nº 10.240 atua apenas nos módulos residenciais [18], sendo estes pertencentes apenas à geração distribuída, e não há ainda legislação em vigor que opere sobre os módulos das usinas de grande porte, ou seja, integradas na geração centralizada. Isso se torna uma preocupação agravante, tendo em vista que a geração pioneira da energia solar fotovoltaica foi a geração centralizada, levando em consideração que, a partir da Figura 1, a GD teve um início significativo em 2018, em um período onde já havia usinas de GC em operação, levando em consideração que, no ano de 2017, já havia 1 GW de capacidade instalada de geração centralizada [1]. Logo, será na GC onde os primeiros módulos irão chegar ao fim de sua vida útil. Acarretando em uma grande massa de PVs em desuso por não haver uma legislação específica para sua regulamentação.

3.4.1. Reciclagem dos módulos fotovoltaicos

¹ Legislação que instituiu o Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída, a “taxação do sol”, como ficou popularmente conhecida, se refere à cobrança do fio B, uma tarifa paga referente às linhas de transmissão de energia da concessionária, sendo cobrado em cima da energia elétrica ativa compensada.

Como explicado e mostrado, detalhadamente, em [19], é necessário inicialmente compreender a estrutura e composição dos módulos fotovoltaicos, antes de tratar sobre a sua reciclagem. Vale salientar que cada modelo de módulo FV tem um material mais específico em sua fabricação, mas todos partem de uma base para produção, que será representado na Tabela 4.

TABELA 4. Composição geral de um modulo fotovoltaico. Fonte: Adaptado de [20].

<i>Insumos</i>	<i>Massa [%]</i>	<i>Recuperação [%]</i>
Vidro	74	100
Polímero	~6,5	0
Alumínio	10	100
Silício	~3	90
Cobre	0,6	100
Prata	<0,006	100
Estanho	0,12	100
Chumbo	<0,1	100

Conforme [21], um módulo FV tem, em média, 23kg, e aproximadamente 97% do seu material pode ser aproveitado. Entretanto, os sistemas fotovoltaicos são conhecidos por apresentarem uma alta durabilidade, e de acordo com [22], a vida útil dos módulos FV pode chegar, em média, de 25 a 35 anos. Para os modelos de alta eficiência no mercado, essa expectativa aumenta para os 40 anos.

Todavia, não são todos módulos que cumprem com sua total utilidade, há fatores que podem acarretar a redução de vida útil, sendo eles, o incorreto manuseio dos módulos durante a instalação; o projeto mal dimensionado em suas proteções; dano durante a logística entre as importadoras até o produtor final; assim como a limpeza indevida [22].

De acordo com [21], os módulos passam por cinco etapas durante o processo de reciclagem, conforme Figura 4, e apresentam três métodos de separação. Os métodos são o mecânico, onde é destinada a trituração e separação do vidro, em sequência o químico, onde os metais pesados são separados, podendo acarretar na recuperação das células fotovoltaicas, e, por fim, o térmico, designado a remoção dos polímeros.

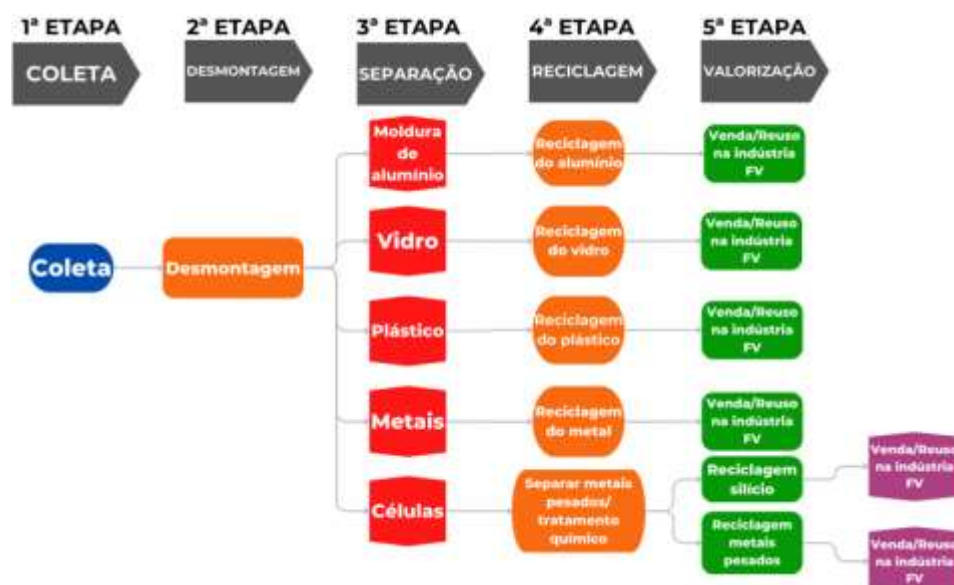


FIGURA 4. Fluxograma da reciclagem dos módulos fotovoltaicos. Fonte: Adaptado de [21].

O estágio fundamental da reciclagem é a etapa da separação, onde os materiais recebidos passam inicialmente por uma triagem. Após essa avaliação preliminar, o processo inicia com a remoção mecânica do quadro de alumínio, conectores e caixa de junção. Posteriormente, partem para remoção do vidro e, em seguida, o restante é submetido à incineração e tratamento químico para separação dos outros metais.

Depois de coletados e separados, os materiais são enviados para compradores correspondentes, geralmente empresas especializadas em reciclagem e processamento de materiais puros. Tais empresas transformarão os materiais coletados em matérias-primas com as propriedades necessárias para atender às exigências de cada setor industrial [21].

A reciclagem dos módulos fotovoltaicos ainda é pouco desenvolvida em território brasileiro, a empresa pioneira, e única, nesse segmento no Brasil é a SunR, localizada no interior de São Paulo. A empresa faz um processo intermediário da reciclagem dos módulos FV, sem o uso de processos químicos ou térmico, sendo realizados apenas procedimentos mecânicos, onde o que não é possível reciclar localmente é enviado para o exterior [23].

Comparado a outros países, onde os módulos já estão perto do fim de sua vida útil, em função dos sistemas fotovoltaicos terem sido instalados há mais de 20 anos, tem-se a União Europeia que utiliza um modelo de reciclagem bastante eficiente e pode ser empregado no Brasil. Segundo [23], no país é exigido que 75% do material utilizado no módulo FV seja reciclado, de tal modo que o custo da reciclagem está incorporado ao preço do produto no momento da compra. Isso significa que tanto os usuários quanto os empresários envolvidos nessa cadeia não percebem os custos do descarte. Vale ressaltar que é obrigação da empresa de reciclagem fazer a coleta desses materiais dos clientes.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Por meio da literatura pesquisada e mostrada na seção 2, assim como a metodologia de pesquisa mostrada na seção 3, a presente seção trata sobre a reciclagem dos módulos fotovoltaicos e realiza uma estimativa do descarte dos módulos FV em um horizonte de 2018 a 2023.

4.1. Estimativa do descarte dos módulos fotovoltaicos

Conforme dados de [4], é possível obter o crescimento e, mais precisamente, a potência instalada a cada ano da GD no Brasil. Análogo a potência outorgada foi realizada uma estimativa da quantidade de módulos a serem descartados, levando em consideração o seu descarte natural, ou seja, o fim de sua vida útil, sendo este em torno de 25 anos.

Para isto, foi utilizada a Figura 1, presente no referido artigo, onde os anos considerados na análise foram de 2018 a 2023, pois neles há o notório crescimento da GD no país, tornando-se assim os anos de maior relevância. Para estimar a quantidade de módulos descartados, foi atribuído um determinado valor de potência dos módulos FV, sendo estas as potências de referência. Do ano de 2018 a 2019, foi empregada a potência de 370Wp e, de 2020 a 2023, foi empregada a potência de 560Wp². Houve essa necessidade de atribuir uma potência padrão diferente aos respectivos intervalos de anos, mediante o crescimento do setor fotovoltaico, tendo em vista que entre os anos de 2018 e 2019, houve a transição dos módulos FV na faixa de 200Wp para os módulos de potência na faixa de 300Wp. Essa transição foi recorrente para os demais anos, onde entre os anos de 2020 a 2021, foi estabilizado os módulos FV de 560Wp no mercado. Para alcançar os resultados, previstos da Tabela 5, foi considerada a potência instalada em cada ano de análise (todos na unidade de *Watts*) e dividido pela respectiva potência do módulo, mediante intervalo determinado.

TABELA 5. Estimativa de descarte dos módulos fotovoltaicos de 2018 a 2023 no horizonte de 25 anos.
Fonte: Autoria própria.

<i>Ano</i>	<i>Potência instalada [MW]</i>	<i>Módulos descartados [milhões]</i>
2018	451,841	1.221.494
2019	1.631,464	4.409.081
2020	2.998,501	5.353.929
2021	4.745,573	8.472.816
2022	8.312,363	14.855.324
2023	8.277,622	14.783.233

Vale salientar que o descarte dos módulos fotovoltaicos ocorrerá após o fim de sua vida útil, ou seja, depois de 25 anos. Os resultados obtidos são referentes ao descarte dos módulos FV levando em consideração

² Valores estimados a partir de uma verificação realizada do mercado para os referidos anos em análise.

a potência instalada dos anos utilizados para análise, assumindo que todos os módulos instalados, nos respectivos anos, atinjam o fim de sua vida útil na mesma média de tempo.

5. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o presente artigo cumpriu com o seu objetivo, a partir das análises e pesquisas realizadas de como se encontra o mercado de energia solar fotovoltaica, geração distribuída e centralizada, identificando as políticas atuais que norteiam o setor, como também a importância da logística reversa e gestão adequada de resíduos no âmbito da energia solar fotovoltaica.

Conforme a Tabela 5, é possível observar a importância e urgência em ter uma legislação mais específica para o setor fotovoltaico. Tendo como base o ano de 2018, onde, após o fim da vida útil dos módulos FV instalados no referido ano, a partir do ano de 2043 mais de 1 milhão módulos fotovoltaicos serão descartados, sem levar em consideração o descarte precoce, podendo neste ter um descarte de mais módulos FV em um período de tempo mais curto. Em contrapartida, o decreto nº 10.240, atua apenas para os módulos residenciais, ou seja, não existe legislação em vigor, nos dias atuais, que imponha um correto descarte aos milhares de módulos FV presentes nas usinas de geração centralizada, como também não há um órgão que fiscalize a gestão dos resíduos dos módulos fotovoltaicos.

A reciclagem dos módulos fotovoltaicos oferece vantagens ambientais significativas, como também colabora para a conservação de recursos energéticos. Esse processo promove a utilização mais eficiente dos materiais, minimizando a presença de resíduos dos módulos no meio ambiente, como a sua deposição em aterros sanitários. Vale ressaltar, que o reaproveitamento dos materiais contribui para a redução da extração de minérios, evitando assim a sua escassez.

Uma legislação rigorosa da gestão dos resíduos fotovoltaicos, construída a partir do conceito de logística reversa, é essencial para o descarte apropriado dos módulos FV, tendo a separação de todos materiais presentes nos módulos, valorizando cada parte para, posteriormente, ser reintegrado no mercado. Isso traz benefícios socioeconômicos e ambientais para sociedade, atuando no aumento da geração de empregos e mão-de-obra especializada, assim como menos impactos ambientais e proporcionando a economia circular.

Por todo o exposto, sugere-se para futuros trabalhos uma pesquisa acerca da real quantidade de módulos descartados a partir de 2043, se foram equivalentes aos resultados deste trabalho, como também à existência de um novo cronograma de coleta dos módulos FV, tal qual presente na Tabela 3, referente ao decreto nº 10.240, realizando uma análise da quantidade de módulos fotovoltaicos descartados e coletados. Uma pesquisa fazendo um levantamento de dados tal qual o presente artigo, sendo levado em consideração o descarte dos módulos fotovoltaicos com defeitos e quebrados antes do fim de sua vida útil. Por fim, sugere-se também uma pesquisa aprofundada sobre a legislação que deve atuar na geração centralizada, tendo em vista que estas usinas apresentam uma grande quantidade de módulos fotovoltaicos e não há lei de logística reversa atualmente atuando na mesma.

REFERÊNCIAS

- [1] ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**: infográfico. Infográfico. 2024. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 11 dez. 2023.
- [2] ABSOLAR. **Energia solar supera 35 GW de capacidade instalada no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-supera-35-gw-de-capacidade-instalada-no-brasil/>. Acesso em: 11 dez. 2023.
- [3] RÖNNAU, Martina. **Cadeia produtiva do setor solar fotovoltaico no Brasil: tendências de inovação**. 2023. 20 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Gestão de Energia, Departamento Interdisciplinar, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tramandaí, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/264239>. Acesso em: 06 mar. 2024.
- [4] ANEEL. **Geração Distribuída**. 2024. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWl3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiJ9&disablecdnExpiration=1692927503>. Acesso em: 24 fev. 2024.
- [5] ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL SIGA**. 2024. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQyYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiJ9>. Acesso em: 28 fev. 2024.
- [6] FARRELL, C. et al. Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 128, p. 109911, 2020.

- [7] IRENA and IEA-PVPS (2016), “End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels,” International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems.
- [8] BRITO, José Luiz Romero de; SANTOS, Mario Roberto dos; SHIBAO, Fabio Ytoshi. **GESTÃO E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA. Revista Contemporânea**, [S.L.], v. 3, n. 9, p. 16062-16083, 28 set. 2023. South Florida Publishing LLC. <http://dx.doi.org/10.56083/rcv3n9-136>.
- [9] ISLAM, Md Tasbirul *et al.* Reverse logistics network design for waste solar photovoltaic panels: a case study of new south wales councils in australia. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S.L.], v. 39, n. 2, p. 386-395, 6 out. 2020. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x20962837>.
- [10] SINIR. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. 2022. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- [11] BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Lei Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 18 fev. 2024.
- [12] SINIR. **O que é a logística reversa**. Disponível em: <https://sinir.gov.br/perfis/logistica-reversa/logistica-reversa/>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001: Sistemas de gestão ambiental - Requisitos com orientações para uso**. Rio de Janeiro, 2015. 53 p.
- [14] GREEN ELETRON. **Resíduos eletrônicos no Brasil - 2021**. 2021. Disponível em: <https://greeneletron.org.br/pesquisa>. Acesso em: 17 fev. 2024.
- [15] SILVA, Cristiano Cruz da; OLIVEIRA, Wemerson Franklyn Araujo de. **Gestão dos resíduos e reciclagem de módulos fotovoltaicos**. 2022. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Gestão de Energia e Eficiência Energética, Faculdade de Tecnologia de Campinas, Campinas, 2022.
- [16] GHIZONI, Joana Pauli. **Sistemas fotovoltaicos: Estudo sobre reciclagem e logística reversa para o Brasil**. 2016. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- [17] EPE. **Plano Nacional de Energia 2050**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- [18] DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. . 31. ed. Seção 1. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.240-de-12-de-fevereiro-de-2020-243058096>. Acesso em: 20 fev. 2024.
- [19] MAIA, Antonio Gabriel Fernandes; VARELLA, Fabiana Karla de Oliveira Martins. Potencial de conservação de energia a partir do descarte de módulos fotovoltaicos no Brasil. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, Mossoró, p. 66-76, 30 jun. 2022. Editora da Universidade Federal Rural do Semi-Arido - EdUFERSA. <http://dx.doi.org/10.21708/issn27635325>.
- [20] SÃO PAULO. IEMA. . **Sistemas Fotovoltaicos na Amazônia Legal: Avaliação e proposição de políticas públicas de universalização de energia elétrica e logística reversa**. 2023. Disponível em: https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/04/IEMA_UniversalizacaoAmazonia20230427.pdf. Acesso em: 02 ago. 2023.
- [21] JOI. Enrges. **Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos. É Possível?** 2020. Disponível em: <https://enrges.com.br/reciclagem-de-modulo-fotovoltaicos-e-possivel/>. Acesso em: 20 fev. 2024.
- [22] LUIZ FELLIPE CARDOSO. Lumus Engenharia Elétrica. **Reciclagem de módulos fotovoltaicos**. Disponível em: <https://lumusengenharia.com.br/blog/reciclagem-de-modulos-fotovoltaicos/>. Acesso em: 20 fev. 2024.
- [23] REY, Juan Pablo. **Reciclagem de painéis é desafio ambiental para energia solar**. 2021. Disponível em: <https://projetocolabora.com.br/ods7/reciclagem-de-paineis-e-desafio-ambiental-para-energia-solar/>. Acesso em: 21 fev. 2024.
- [24] SILVA, E. C. A.; VARELLA, F. K. O. M. **Logística reversa no setor fotovoltaico**. 2024. 10 f. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2024.



Artigo

Bancada didática para controle de nível e temperatura: Integração do CLP FX3U com o Elipse E3 SCADA

João Victor da Silva Fernandes ^[1], Caio Henrique Vieira Alves ^[2], Geronimo Barbosa Alexandre ^[3]

^[1] Instituto Federal da Paraíba; Graduando em Engenharia de Controle e Automação; jv.xpll@gmail.com

^[2] Instituto Federal da Paraíba; Graduando em Engenharia de Controle e Automação; caio.vieira@academico.ifpb.edu.br

^[3] Instituto Federal da Paraíba; Prof. EBTT; M. Sc. Engenharia Elétrica; geronimo.alexandre@ifpb.edu.br

Recebido: 31/10/2025;

Aceito: 31/10/2025;

Publicado: 22/12/2025;

Resumo: Este artigo visa o desenvolvimento e a implementação de uma plataforma didática de baixo custo para o controle de nível e temperatura em um sistema de tanques acoplados, aplicável a processos industriais comuns nos setores de petróleo, gás e alimentício. A metodologia abrange a montagem do protótipo com o CLP FX3U, o projeto e a validação do controle liga-desliga de nível com o aquecimento temporizado, além da construção do sistema de supervisão e operação da bancada. O diferencial do trabalho está no baixo custo, na supervisão local dos dados e na replicabilidade do protótipo por outras instituições de ensino. A estratégia de controle liga-desliga implementada conseguiu gerenciar o nível do tanque, comandando as bombas de encher e esvaziar por meio dos sensores. O sistema de monitoramento local mostrou-se confiável e eficiente nas medições, permitindo a supervisão das variáveis do processo em tempo real pela aplicação SCADA, com uma baixa taxa de latência (4 segundos), adequada em comparação com a dinâmica do processo que se desenrola em minutos, foram desenvolvidas três telas, cadastro de usuários, geração de alarmes e exportação dos dados operacionais em formato de planilhas para melhor operação do processo.

Palavras-chave: processos térmicos; controle liga-desliga; controle PID; instrumentação; bancada didática.

Didactic platform for level and temperature control: Integration of the FX3U PLC with the SCADA Elipse E3

Abstract: This paper aims at the development and implementation of a low-cost didactic platform for level and temperature control in a coupled tank system, applicable to common industrial processes in the petroleum, gas, and food sectors. The methodology encompasses the prototype assembly with the FX3U PLC, the design and validation of the on-off level control with timed heating, in addition to the construction of the supervision and operation system for the bench. The project's differential lies in its low cost, the local data supervision, and the replicability of the prototype by other educational institutions. The implemented on-off control strategy successfully managed the tank level, commanding the fill and empty pumps via sensors. The local monitoring system proved to be reliable and efficient in measurements, allowing for the real-time supervision of the process variables through the SCADA application, with a low latency rate (4 seconds), which is adequate when compared to the process dynamics that unfold over minutes. Three screens were developed: user registration, alarm generation, and the export of operational data in spreadsheet format for better process operation.

Keywords: thermal processes; on-off control; PID control; instrumentation; educational platform.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de controle bem projetados podem ajudar a evitar paradas inesperadas, acidentes e diminuir o tempo de *startup* (tempo necessário para colocar a planta em operação, após uma parada) do processo. Deste modo, desenvolver sistemas de controle automático, traz ganhos econômicos, sociais e ambientais contribuindo para a chamada operação e manutenção inteligente da planta industrial [1].

O gerenciamento das variáveis de processo torna-se uma atividade indispensável para a operação e manutenção da planta industrial, trazendo ganhos econômicos consideráveis, melhoria da estabilidade dinâmica, redução do consumo de energia e da emissão de substâncias tóxicas [2]. Neste contexto destacam-se os sistemas de comando e supervisão local e remoto, existindo inúmeros *softwares* tanto comerciais (Eclipse SCADA, Elipse E3, CX-Supervisor, SIMATIC WinCC, FactoryTalk View) e livres (ScadaBR, SCADA LAquis, VTScada LIGHT, Haiwell Cloud SCADA) que irão auxiliar na qualidade, na redução de custos e em um maior desempenho da produção.

A integração entre o Controlador Lógico Programável (CLP) e o sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) possibilita o monitoramento em tempo real, a coleta de dados operacionais e ajustes dinâmicos dos parâmetros de controle, o que resulta em maior eficiência e controle sobre o processo [3] e [4]. Os sistemas SCADA são essenciais para o monitoramento e controle em tempo real de processos industriais, facilitando a automação e garantindo a eficiência dos processos, bem como a detecção precoce de falhas [5].

Assim, instituições de ensino de Engenharia vêm buscando desenvolver plantas pilotos com o objetivo de familiarizar seus estudantes com os diversos tipos de sistemas de controles e supervisão encontrados no meio industrial. Contudo, a excelência na formação de engenheiros e técnicos na área de Automação Industrial enfrenta um desafio prático: o alto custo das plantas didáticas de escala industrial disponíveis no mercado.

Esta limitação restringe a experiência prática dos estudantes, impactando diretamente na qualificação da mão de obra. Em resposta a esta problemática, a comunidade científica tem dedicado esforços consideráveis ao desenvolvimento de bancadas didáticas de baixo custo e alta replicabilidade, buscando simular em escala laboratorial os processos industriais para fins educacionais, a exemplo dos trabalhos [6], [7] e [8].

Neste cenário, o presente trabalho propõe o desenvolvimento e a implementação de uma plataforma didática de baixo custo para o controle de nível e temperatura em tanques acoplados, integrando *hardware* de cunho industrial e *software* de supervisão. O diferencial metodológico reside na combinação de características que buscam superar as limitações das bancadas didáticas tradicionais. Em contraste com soluções que utilizam microcontroladores para simplificar o custo, como sugerido em [6] e [7], optou-se pela utilização do CLP Mitsubishi FX3U, conferindo à bancada uma autenticidade industrial inegável e alinhando a experiência de aprendizado com os equipamentos de chão de fábrica [9].

A validação inicial da bancada focou na estratégia de controle liga-desliga (ON/OFF) para o nível e o controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo) para a malha de temperatura. Essa etapa demonstrou a capacidade do sistema em gerenciar o nível e temperatura do tanque de forma eficaz. Além disso, a arquitetura de supervisão foi construída sobre uma aplicação SCADA, utilizando o Elipse E3 DEMO. Ao contrário de plataformas que oferecem apenas monitoramento básico, o sistema desenvolvido aqui apresenta uma funcionalidade robusta que inclui cadastro de usuários, geração de alarmes e, crucialmente, a exportação de dados operacionais em formato de planilhas. A implementação de uma *interface* SCADA rica em recursos e com uma baixa taxa de latência (4 segundos), validada para a dinâmica lenta do processo, posiciona o trabalho para futuras análises de desempenho e otimização de processo, conforme preconizado pelas tendências de integração de dados na indústria [4].

Por fim, as principais contribuições deste artigo para o ensino da Automação Industrial e o avanço da pesquisa são: (1) A confecção de uma bancada didática de nível e temperatura de baixo custo com alta replicabilidade; (2) A integração bem-sucedida de um CLP industrial (FX3U) em uma solução educacional, elevando o realismo do aprendizado; e (3) A implementação e validação de um sistema de supervisão SCADA local eficiente, com recursos de análise de dados essenciais para o avanço das atividades de ensino e pesquisa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados a metodologia usada no trabalho, os materiais usados para a confecção do protótipo didático, o diagrama elétrico do CLP e a lógica *Ladder* implementada para as estratégias de controle usadas no processo de nível e temperatura.

2.1. Metodologia

A pesquisa a ser realizada é do tipo pesquisa de campo com natureza exploratória e descritiva com abordagem qualitativa. A pesquisa de campo, “consiste na observação de fatos e fenômenos tal como ocorrem

espontaneamente, na coleta de dados a eles referentes e no registro de variáveis que se presume relevantes, para analisá-los” [10].

As abordagens do problema nas pesquisas científicas são caracterizadas por dois tipos: a pesquisa quantitativa e pesquisa qualitativa. Nesta pesquisa, optou-se por uma abordagem qualitativa, pois segundo [11] "esse tipo de abordagem proporciona melhor visão e compreensão do problema". A pesquisa buscou a confecção de um produto, integrando teoria e prática, em que os alunos-pesquisadores são os protagonistas do processo de desenvolvimento.

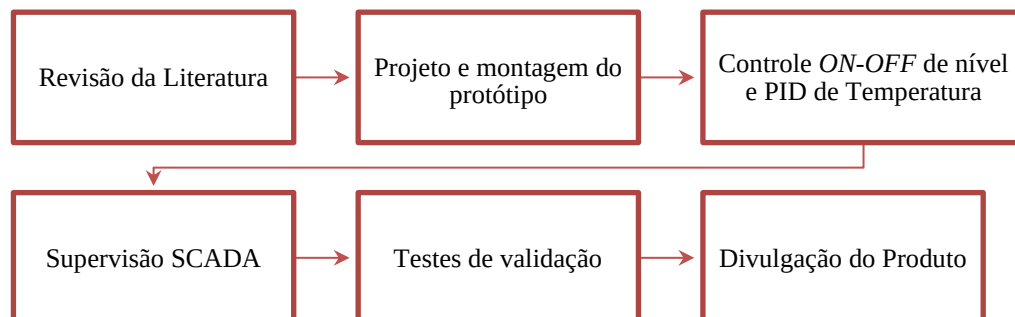


FIGURA 1. Processo metodológico da pesquisa (autoria própria).

Os passos metodológicos implementados para alcançar os objetivos estão dispostos no fluxograma da Figura 1. Inicialmente foi feita a revisão bibliográfica nas seguintes plataformas acadêmicas: *IEEE Explorer Digital Library*, *ScienceDirect*, *ResearchGate*, Periódico Capes e Google Acadêmico, dessa pesquisa foram escolhidos alguns artigos que serviram de base do projeto [2], [12] e [13]. Desta forma o trabalho trata-se de uma pesquisa quali-quantitativa com apresentação de um produto.

Após a revisão do estado da arte, foram elaborados os desenhos 2D e 3D do protótipo, bem como a lista de material com o respectivo orçamento. O projeto estrutural, hidráulico e elétrico do sistema de tanques acoplados foi idealizado a partir dos protótipos desenvolvidos em [2], [12] e [13], bem como no processo de aquecimento e controle de nível de um laticínio local, mapeado durante visitas técnicas as unidades fabris do sertão paraibano.

Na sequência foi confeccionada a bancada de aquecimento, instalação da instrumentação e desenvolvimento dos sistemas supervisórios. Com o produto confeccionado foram feitos os testes de avaliação do controle liga-desliga experimental.

2.2. Materiais Usados na Confeção do Protótipo Didático

Os materiais utilizados para confecção do protótipo experimental estão dispostos na Tabela 1. O custo total do protótipo foi baixo (R\$ 727,15) quando comparado a uma bancada didática comercial similar (R\$ 15.000,00).

TABELA 1. Materiais utilizados no protótipo V1.0 e orçamento (autoria própria).

Equipamento	Quantidade	Valor* (Varejo)
Sensor de nível	2	R\$ 54,00
Tanques de acrílico 5L	2	R\$ 50,00
CLP FX3U24MR	1	R\$ 250,00
Mangueira 1/2	2m	R\$ 10,00
Bomba d'água 24V 19W	1	R\$ 107,00
Bomba d'água 12V	2	R\$ 64,90
Resistência elétrica de 800W	1	R\$ 30,00
Relé de interface 24V/220V	1	R\$ 24,30
Conversor RS485 para USB	1	R\$ 20,00
Sensor PT-100 + Transmissor 4-20mA	1	R\$ 84,70
Relé de Estado Sólido	1	R\$ 32,25
Total		R\$ 727,15

*Cotação feita em 2025.

Para viabilizar o controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo), foi adicionada a placa Arduino UNO R3, um relé de estado sólido (SSR - 40A) conectado ao ebulidor, permitindo a variação contínua da temperatura através da saída analógica de 0-10V do CLP, além do sensor de temperatura PT 100 e o seu transmissor.

Os materiais foram adquiridos em lojas físicas da região do sertão paraibano, bem como em lojas virtuais. O CLP FX3U-24MR (saída a relé) foi escolhido por dois motivos: (1) por apresentar baixo custo em comparação com outros fabricantes e (2) por apresentar seis entradas analógicas (sendo três de tensão 0-10V e três a corrente 4-20mA) e duas saídas analógicas de 0-10V o que facilita o controle em malha fechada.

2.3. Diagrama Elétrico e Lógica de Programação do CLP FX3U

O CLP FX3U funciona como o cérebro do processo recebendo as medições dos sensores, que informam o estado do processo e atua fornecendo energia para o comando das bombas (atuadores elétricos). Para organizar a integração entre o controlador e os componentes de campo, foi definida uma alocação de endereços de *hardware*. A Tabela 2 detalha as entradas e saídas digitais do CLP.

TABELA 2. Entradas e saídas digitais do CLP (autoria própria).

Componente	Entrada	Componente	Saída
Sensor Boia (Alto)	X0	Bomba e Sinaleiro (Esvaziar)	Y0
Sensor Boia (Baixo)	X1	Bombas (Encher)	Y4
Botão Liga	X2	Ebulidor	Y3
Botão desliga	X3	Sinaleiro (Encher)	Y1

Para a implementação do PID utilizamos as mesmas entradas, o diferencial está na utilização das entradas e saídas analógicas conforme descrito na Tabela 3.

TABELA 3. Entradas e saídas Analógicas do CLP (autoria própria).

Componente	Entrada	Componente	Saída
Transmissor de Temperatura	AD3	Arduino Uno	DA0

A Figura 2 ilustra o diagrama de ligações das entradas e saídas do CLP para o controle liga-desliga de nível e o controle PID de temperatura.

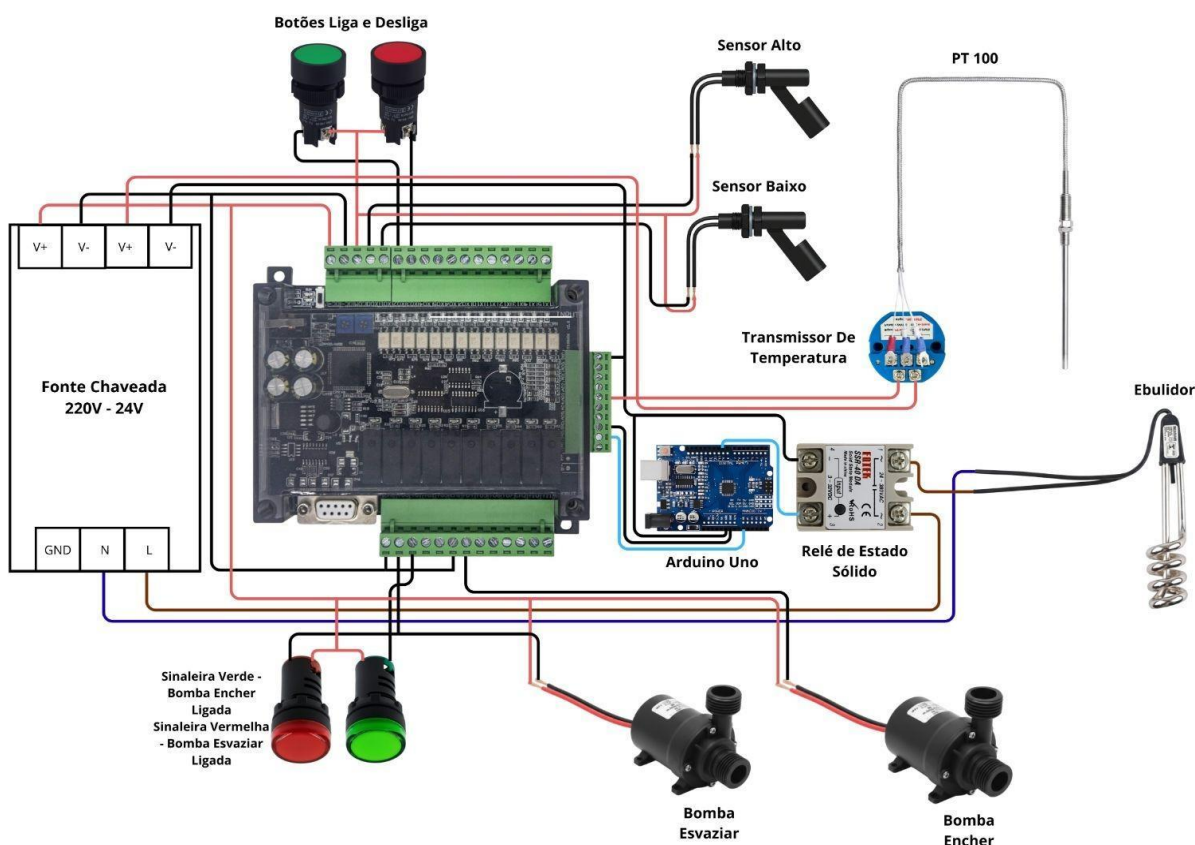


FIGURA 2. Diagrama elétrico do CLP para o ON-OFF de nível e o PID de temperatura (autoria própria).

O controle de temperatura é feito por meio da regulação da potência elétrica entregue pelo ebulidor, este está conectado ao relé de estado sólido, já o relé de estado sólido está conectado a saída Y3 e a saída a PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*) da placa Arduino (pino 9). A placa Arduino UNO R3 foi usada para a gestão do PWM que varia a tensão entregue ao relé de estado sólido. Desta forma o sinal de 0-10V do CLP é convertido em um sinal PWM.

A modulação por largura de pulsos é usada para controlar a tensão aplicada ao relé de estado de sólido (SCR, do inglês, *Silicon Controlled Rectifier*), desta forma controlando a potência elétrica da lâmpada. Devido o CLP ser de saída a relé, este não possui saída analógica a PWM, para contornar este problema foi usado um divisor de tensão que alimenta a porta A0 do Arduino UNO R3, este mapeia o nível de tensão e aciona o PWM (pino 9), este está ligado ao relé de estado sólido.

As entradas (botões e sensores) são endereçadas por X e as saídas (sinaleiros, bombas e ebulidor) são endereçadas por Y, conforme norma IEC 61131-3 (padronizar as linguagens de programação utilizadas em CLP's). Para alimentar o CLP foi utilizada uma fonte chaveada 220V/24V/10A protegida por um disjuntor de 10A. Para a comunicação RS232 do CLP com o computador foi utilizado um cabo DB9 macho-USB (*Universal Serial Bus*), com instalação do *driver* CH340. A partir do *software* GX Works2 seleciona-se a porta USB do computador que está conectado o CLP FX3U, feita a programação ladder, na sequência faz-se o *upload* do código para a memória do CLP.

O código Ladder implementado no GX Works 2 foi estruturado em etapas. Inicialmente, foi realizada a configuração do protocolo de comunicação *Modbus RTU (Remote Terminal Unit)*, definindo o CLP para operar no modo "*Slave*" (escravo). A taxa de transmissão dos dados usada na CPU do CLP FX3U foi de 38,4 Kbps na comunicação serial, já o "*Baud Rate*" definido no Elipse E3 foi de 19.200 sem *bit* de paridade. Esta configuração é crucial para permitir que o sistema de comando e supervisão, atuando como "*Master*" (mestre), possa ler e escrever nos registradores e memórias do controlador em tempo real.

A lógica de operação para o ON-OFF é iniciada por três condições que podem ativar o sistema: (1) a memória M8, que funciona como um "selo" para manter o ciclo perpétuo após o primeiro ciclo (encher e esvaziar) operacional; (2) a memória M1, que representa o botão virtual 'LIGA', é acionado remotamente pelo supervisório; (3) a entrada física X2, correspondente à botoeira 'LIGA' no painel da bancada.

Estas condições de partida (início do processo) possuem um intertravamento de segurança feito por um contato da entrada X1 (sensor de nível baixo), garantindo que o ciclo de enchimento só possa começar se o tanque 1 estiver efetivamente vazio. Uma vez que uma das condições de partida é satisfeita e o tanque está vazio, o CLP ativa a saída Y4 (ligando as bombas de enchimento) e a saída Y1 (sinalizando o enchimento).

O processo de enchimento continua até que o nível da água atinja o sensor de nível alto, ativando a entrada X0. O sinal de X0 desliga imediatamente as bombas (Y4) e a sinaleira de enchimento (Y1). Simultaneamente, o CLP ativa a saída Y3, que aciona o relé de *interface* do ebulidor, iniciando o aquecimento. Um temporizador (T0) é disparado e configurado para 60 segundos.

Após a contagem de 60 segundos, o contato do temporizador T0 desliga o ebulidor (Y3). Em seguida, com o intertravamento do sensor X0 (garantindo que o tanque está cheio), o sistema ativa a saída Y0 (bomba de esvaziamento) e a sinaleira de esvaziamento.

A bomba Y0 permanece ligada, esvaziando o tanque, até que o nível caia abaixo do sensor de nível baixo (X1). No programa, um contato normalmente fechado (NF) de X1 é usado para desativar a saída Y0 assim que o sensor indica que o tanque está vazio. A desativação de X1 encerra esta etapa e, para garantir o ciclo automático, a ativação da saída Y0 também "seta" a memória M8, preparando o sistema para reiniciar o ciclo assim que as condições de partida forem satisfeitas novamente, porém para isso X1 tem que estar desativado, ou seja, o tanque 1 já tem que estar vazio.

A implementação do controle PID para a temperatura substitui o ciclo temporizado fixo por uma atuação em malha fechada. O CLP regula o processo com base na comparação contínua entre a temperatura medida (PV) e o *setpoint* (SP) definido via *interface* SCADA, sendo os parâmetros de sintonia armazenados em registradores dedicados junto da medição de temperatura (Tabela 4). A lógica de atuação foi estruturada a partir de comparadores:

1. Aquecimento ($SP > PV$): Ativa-se a memória auxiliar M8, que habilita a modulação PWM do ebulidor para elevar a temperatura;
2. Resfriamento ($SP < PV$): Acionam-se simultaneamente as bombas de enchimento e esvaziamento, gerando um fluxo contínuo de circulação para reduzir a temperatura do fluido;
3. Estabilidade ($SP = PV$): Ativa-se a memória M7, responsável pelo intertravamento do sistema quando o alvo é atingido.

TABELA 4. Mapeamento dos registradores no CLP (autoria própria).

Parâmetros	Registrador
<i>Setpoint</i>	D20
Temperatura	D14
Kp	D21
Ki	D24
Kd	D25

Para otimizar a comunicação com o Elipse E3, foram utilizadas memórias internas (M) como "espelhos" das variáveis de processo (*status* de bombas, sensores e botões virtuais). Esta abordagem facilita o gerenciamento de dados pelo supervisor desenvolvido no Elipse E3, associando as “Tags” aos respectivos endereços de memórias para as entradas e saídas, conforme detalhado na Tabela 5.

TABELA 5. Mapeamento das memórias no CLP (autoria própria).

Componente	Memória
Y0	M6
Y1	M5
Y3	M3
Y4	M4
Botão Liga (virtual)	M1
Botão desliga (virtual)	M2

No Elipse E3 foi configurado o driver “*modbus.dll*” a partir do “*Organizer*”, na sequência foi criado os botões e sinaleiros virtuais, com os respectivos endereços de memória. O “*Organizer*” permite uma visão simples e organizada de toda aplicação, ajudando na edição e configuração de todos os objetos envolvidos através de uma árvore hierárquica de opções.

A escolha pelo Elipse E3 deu-se devido ser uma solução padrão na indústria brasileira, apresentando os seguintes prós: escalabilidade (projetos de pequeno, médio e grande porte), suporte local (a *Elipse Software* é uma empresa brasileira, documentação em português e muitos integradores), altíssima customização e robustez comprovada. Como contras destacamos o custo da licença e a curva de aprendizagem para configurar inicialmente.

3. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os detalhes físicos do protótipo confeccionado, o SCADA local que faz a gestão do processo (comando e supervisão) e os resultados experimentais do controle PID de temperatura implementado no tanque superior.

3.1. A bancada Didática de Nível e Temperatura

As Figuras 3 e 4 ilustram o protótipo didático confeccionado pelos pesquisadores do IFPB Campus Cajazeiras, instalado no Laboratório de Controle e Automação (LCA - IFPB). A estrutura física é composta por dois baldes plásticos que simulam os tanques (Tanque 1 e Tanque 2). O sistema de enchimento do Tanque 1 utiliza um conjunto de duas bombas de 12V ligadas em série, garantindo o fluxo necessário para transferir a água a partir do Tanque 2. O esvaziamento do Tanque 1, com o retorno da água ao Tanque 2, é realizado por uma bomba dedicada de 24V. O monitoramento dos níveis máximo e mínimo é feito por dois sensores de nível tipo boia.

O núcleo do sistema é o Controlador Lógico Programável (CLP) FX3U, que executa toda a lógica de automação e controle. A alimentação dos componentes (bombas e sensores) é fornecida por uma fonte chaveada que converte a tensão CA (corrente alternada) da rede para 24V CC (corrente contínua). Para o controle da malha de temperatura, um ebulidor é utilizado como atuador de aquecimento. Dado que o ebulidor opera com tensão da rede (CA), foi implementado um relé de *interface*, permitindo que a saída digital de tensão CC do CLP possa acionar esta carga de potência com total segurança.

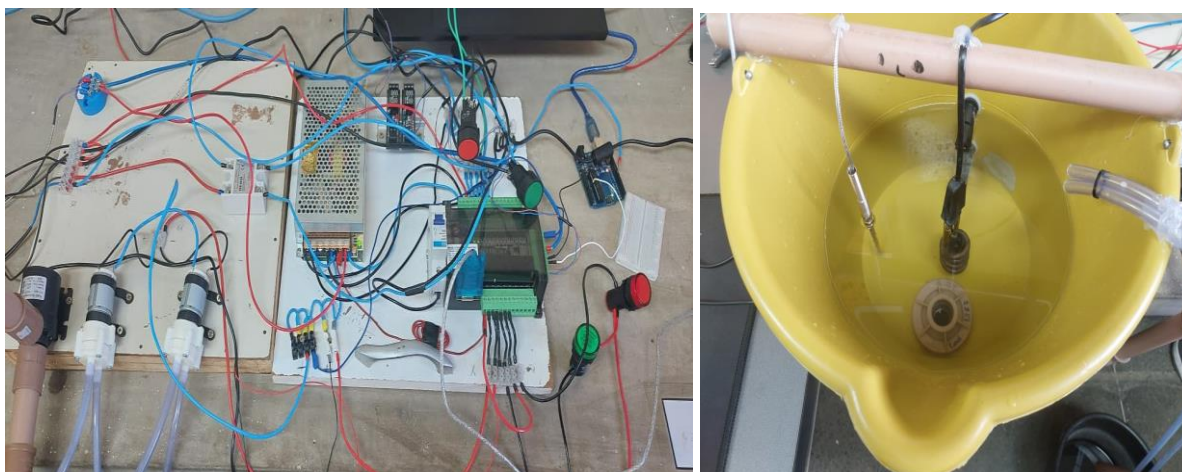


FIGURA 3. Detalhes dos sistemas de bombeamento, nível e aquecimento (autoria própria).

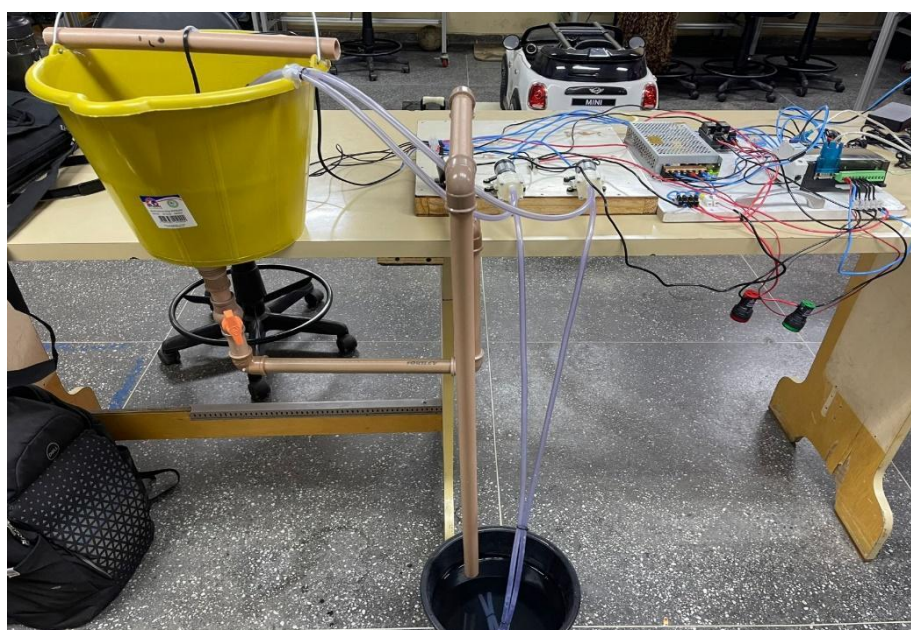


FIGURA 4. Visão geral da bancada (autoria própria).

A operação manual foi implementada com duas botoeiras (Liga/Desliga) e duas sinaleiras visuais. Estas sinaleiras fornecem *feedback* imediato ao operador, indicando quando as bombas de enchimento estão ativas e quando a bomba de esvaziamento está em funcionamento.

3.2. Interface SCADA de Comando e Supervisão

Além da lógica de controle no CLP, foi desenvolvido o sistema de supervisão e operação remota, cumprindo um dos objetivos específicos do projeto. A plataforma utilizada foi o *software* Elipse E3, que atua como mestre da rede *modbus*.

O sistema supervisor é iniciado por uma tela de *menu* (Figura 5), que apresenta as informações da instituição e dos elaboradores do projeto. Esta tela também gerencia o controle de acesso de usuários (cadastro e acesso), permitindo as funções de “Login” e “Logout”, indicando o operador logado no momento e possuindo um botão para fechar a aplicação com segurança.

Para gerenciar o acesso ao SCADA, o cadastro de novos operadores é realizado através da janela “Adicionar Usuário” conforme ilustrado na Figura 6(a). Esta é uma função nativa de administração do próprio Elipse E3. Nela, o administrador define o “Nome” (utilizado para o *login*), o “Nome completo” e a “Senha” do operador. O “Tipo de autenticação” é mantido como “Autenticação do Elipse E3”, indicando que o próprio supervisor é responsável pela validação.

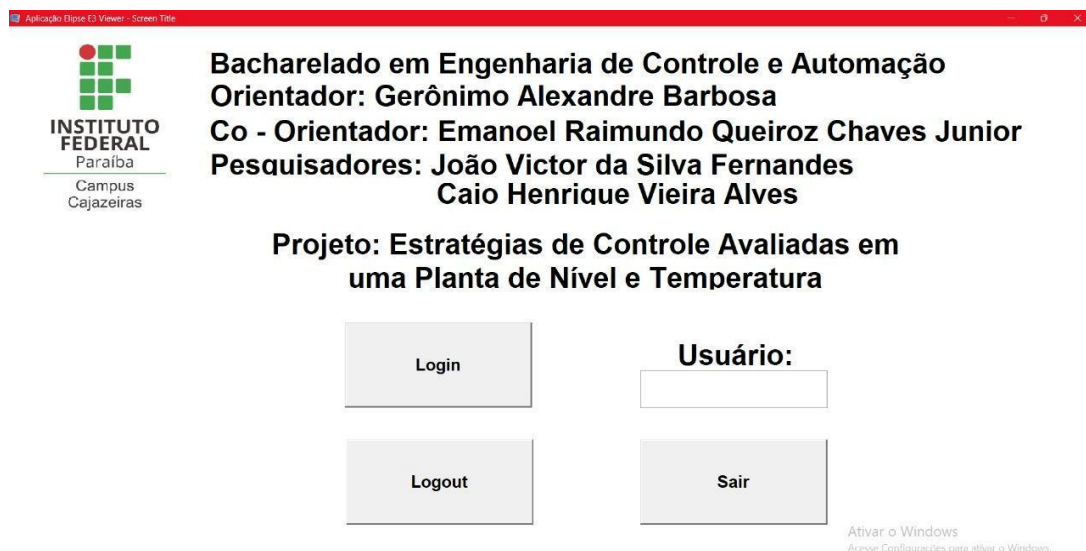


FIGURA 5. Tela de *menu* do SCADA (autoria própria).

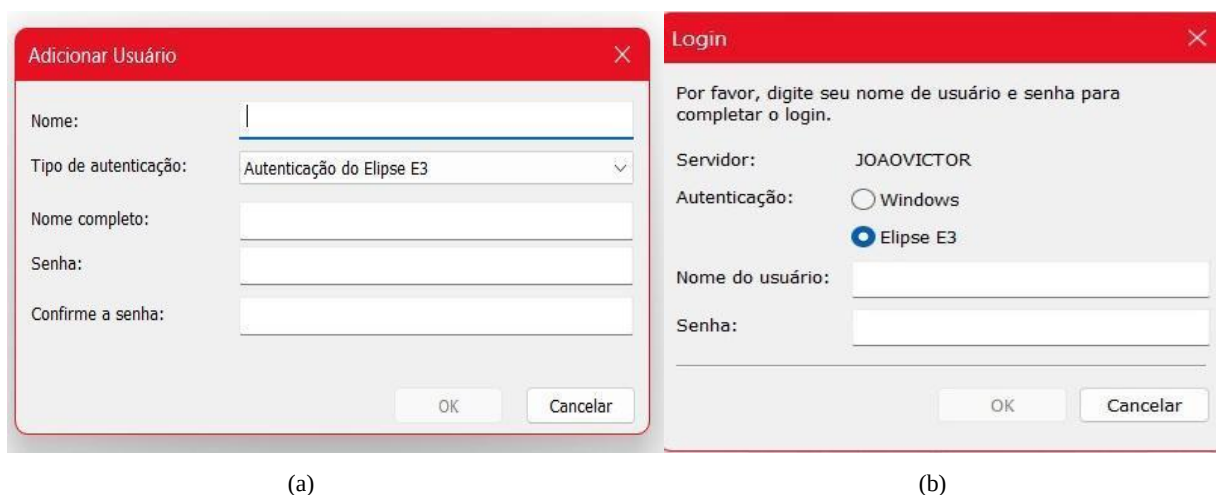


FIGURA 6. (a) Tela para adicionar usuário. (b) Tela para efetuar o “login” (autoria própria).

Diferente dos dados de processo, que podem ser armazenados em bancos de dados externos, as credenciais de usuário são salvas de forma segura diretamente no arquivo de configuração do domínio da aplicação. Posteriormente, o operador utiliza essas credenciais ao clicar no botão “Login” da Figura 5, sendo direcionado para a janela ilustrada na Figura 6(b), onde insere seu “Nome do usuário” e “Senha”, selecionando a “Autenticação: Elipse E3” para acessar o sistema.

Após o “Login” ser efetuado, o operador é direcionado à tela de comandos, supervisão e alarmes (Figura 7) do processo. Nesta tela, é possível monitorar todo o processo de forma gráfica, visualizando o estado de cada atuador (bombas e ebulidor) e o *status* dos sensores (indicando se estão ativos ou não). A tela também exibe o temporizador referente ao tempo de aquecimento do ebulidor e disponibiliza os botões virtuais ‘LIGA’ (M1) e ‘DESLIGA’ (M2), que permitem o acionamento e a parada remota do ciclo. Nesta mesma tela ainda é possível retornar a tela de “Menu”.

Na interface SCADA da Figura 7 o usuário pode alterar os parâmetros K_p , K_i e K_d do controlador PID de temperatura, bem como o valor de *setpoint* de temperatura em tempo real. Na Tela é possível visualizar o gráfico da temperatura e o valor instantâneo. Outras funcionalidades inseridas na interface SCADA, são: (a) a gestão de alarmes (aba inferior ao gráfico da temperatura), para informar ao operador qualquer anormalidade no processo e (b) a criação de relatórios e exportação do histórico operacional em formatos compatível com Excel, PDF e TXT.

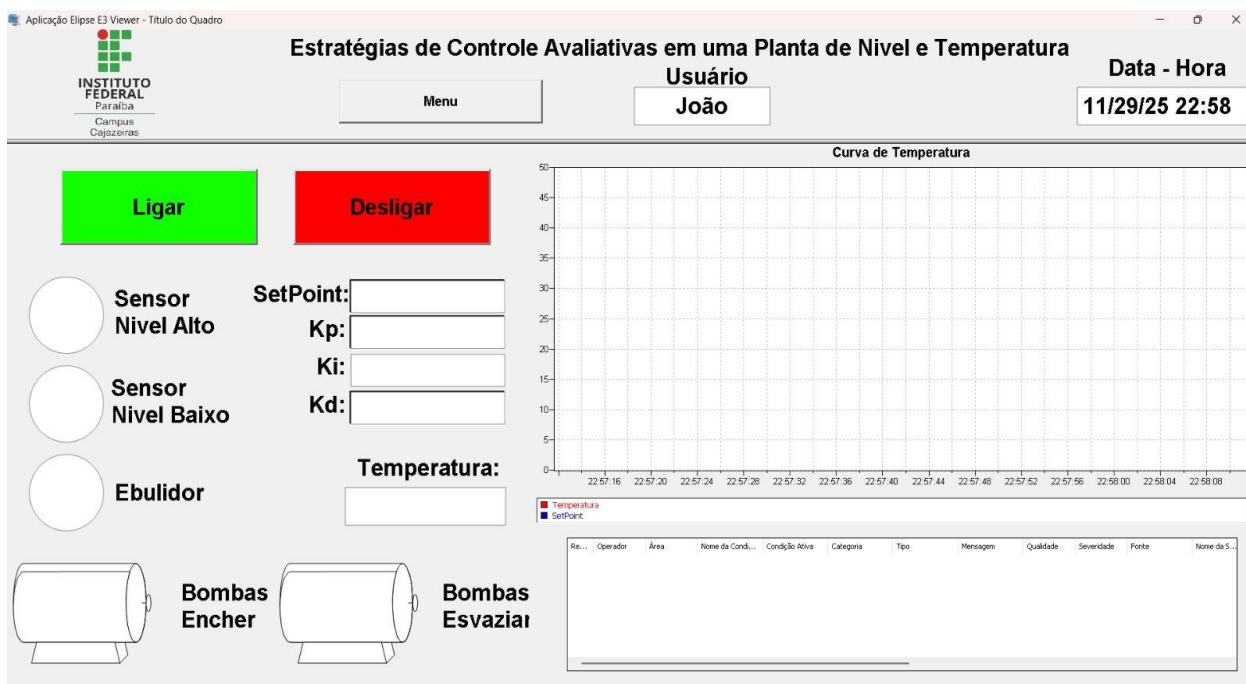


FIGURA 7. Tela comado, supervisão e alarmes do processo (autoria própria).

O registro de alertas/alarmes funciona como um histórico de eventos, registrando em tempo real todas as ações relevantes do processo, como o momento em que um processo é ativado, o estado de um atuador, e a data e hora exata de cada ocorrência.

Durante os testes experimentais de validação da aplicação SCADA na operação do processo didático foi observado um atraso (latência) no envio / recebimento dos dados de aproximadamente 4 segundos, sendo um tempo insignificante quando comparado com a dinâmica de encher e esvaziar dar-se em minutos.

3.3. Resultados Experimentais do Controle PID de Temperatura

O controle de temperatura da bancada foi implementado utilizando o algoritmo PID interno do CLP FX3U. O experimento consistiu na aplicação de degraus de referência (*setpoint*) para avaliar a resposta transitória e estacionária do sistema. Inicialmente, o sistema partiu da temperatura ambiente (25°C) com *setpoint* ajustado para 30°C. Após a estabilização, aplicou-se um segundo degrau para 35°C.

Os dados operacionais foram registrados através do sistema supervísório Elipse E3 e exportados para um arquivo CSV (*Comma-Separated Values*). O registro no arquivo ocorreu em intervalos de 1 segundo. As Figuras 8 e 9 ilustram as curvas de resposta da temperatura em relação aos *setpoints* definidos. Na Figura 10 é ilustrado o comportamento da temperatura ao sair de 25°C para 35°C (os dois degraus aplicados) ao longo do tempo.

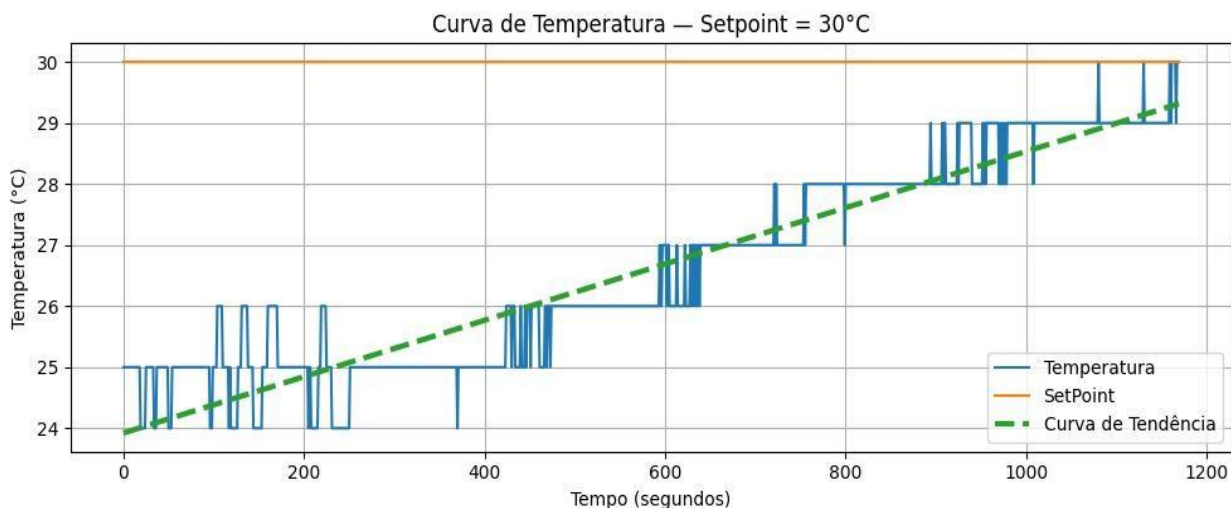


FIGURA 8. Curva da temperatura para um setpoint de 30°C (autoria própria).

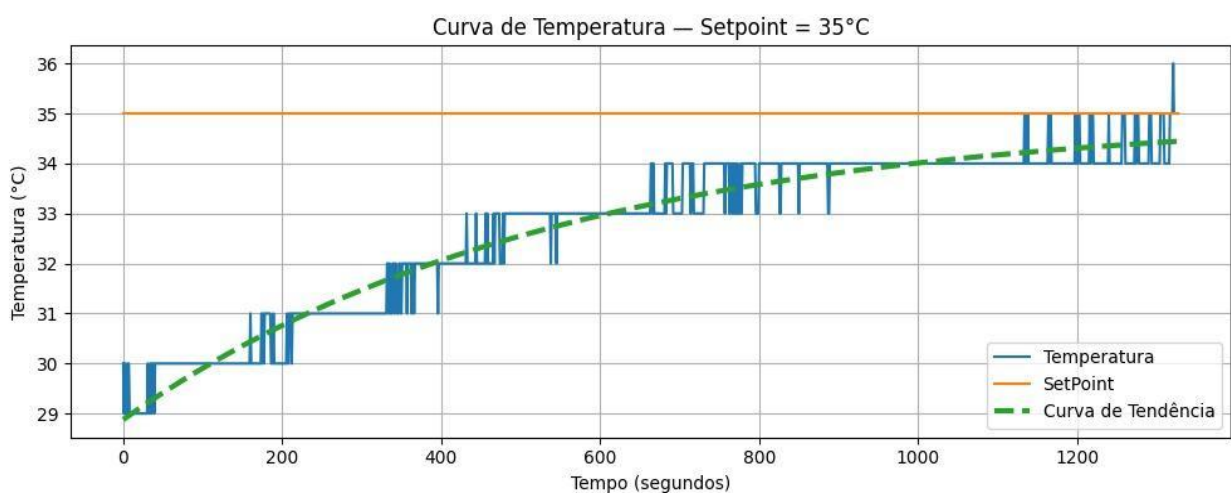


FIGURA 9. Curva da temperatura para um setpoint ajustado em 35°C (autoria própria).

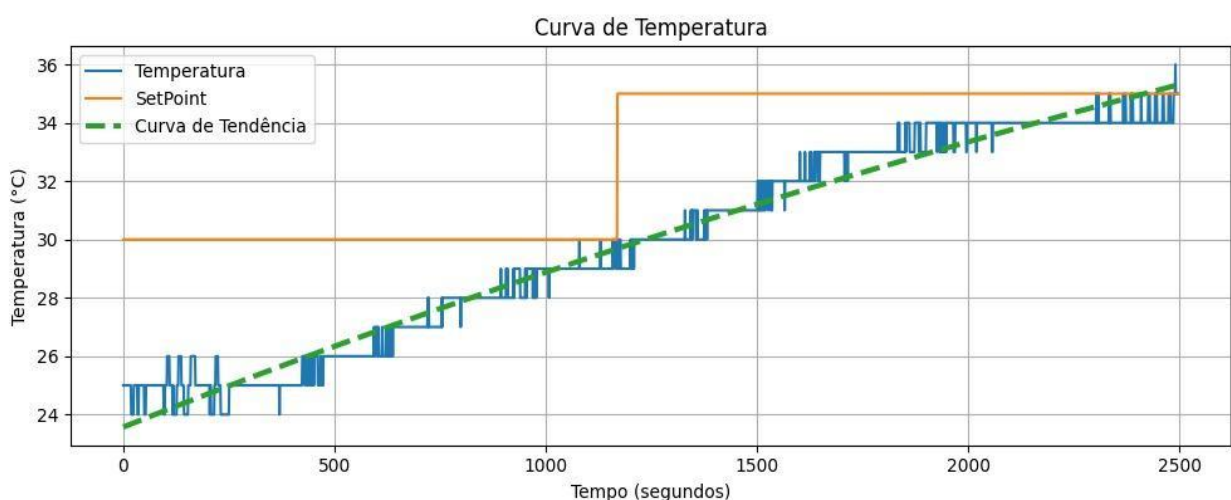


FIGURA 10. Curva da temperatura ao sair de 25°C para 30°C e depois de 30°C para 35°C (autoria própria).

A quantificação do desempenho da malha de controle baseou-se nos critérios clássicos de engenharia de controle, conforme definido em [14]: tempo de subida, tempo de acomodação, sobressinal (*overshoot*) e erro em regime permanente (*offset*). A Tabela 6 sumariza os resultados obtidos para os dois pontos de operação.

TABELA 6. Parâmetros de desempenho do controlador PID (autoria própria).

Setpoint	Tempo de Subida	Tempo de Acomodação	Overshoot	Offset
30°C	790s	1169s	0%	1.04°C
35°C	504s	1327s	2.9%	0.85°C

Os ganhos do controlador sintonizado pelo método de Ziegler e Nichols (e refinados experimentalmente) e avaliados no cenário da Figura 10, foram $K_P=5000$, $K_I=1$ e $K_D=100$, percebe-se que o sistema é estável e bem comportado em malha fechada, mostrando que a lei de controle consegue levar a saída controlada (temperatura) a seguir as referências de controle, com erro em regime permanente nulo.

A Figura 11 ilustra o sinal do erro para os cenários de degraus de temperatura descritos na Figura 10 (de 25°C para 30°C e, posteriormente, para 35°C). O erro é definido como a diferença entre o *setpoint* (referência) e o valor medido da temperatura. Nas regiões de transição, é possível observar que ocorre um pico de erro positivo (6,0°C), na variação de 25°C para 30°C, neste intervalo o PID interno do CLP, está otimizando (ajustando a frequência e amplitude) o sinal PWM entregue ao relé de estado sólido.

Após cada transição, o erro decresce exponencialmente e converge para próximo de zero, demonstrando a eficiência do controlador PID em estabilizar a temperatura no valor desejado. Em estado estacionário, o erro residual é mínimo, com oscilações inferiores a 1,3°C, evidenciando a precisão e a robustez do sistema no controle da temperatura.

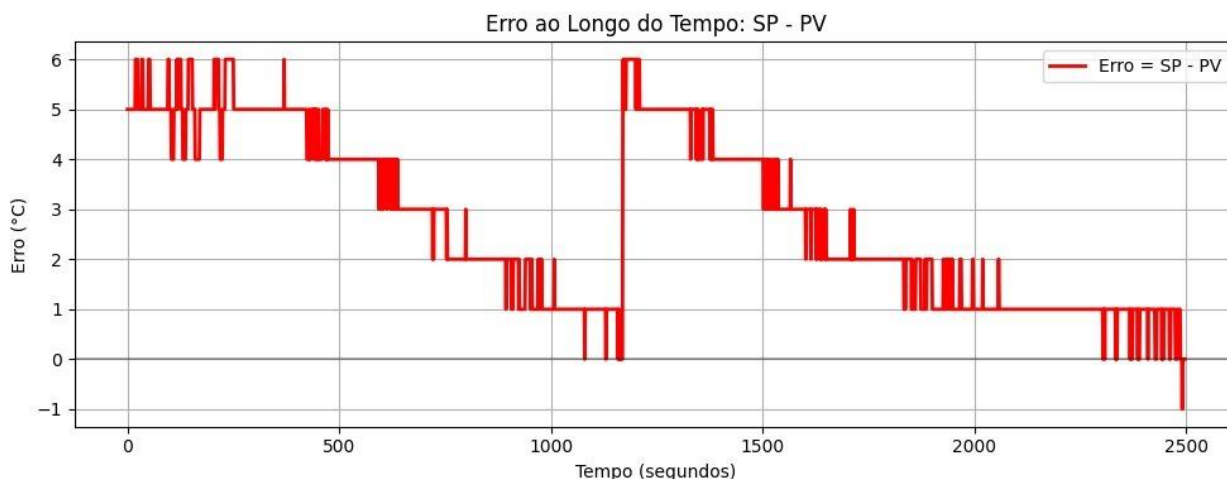


FIGURA 11. Gráfico do sinal de erro frente as mudanças operacionais no processo.

Os parâmetros de desempenho do controlador podem ser avaliados na ótica do tempo (Tabela 6), bem como na ótica do erro. Para isso, são utilizados critérios de desempenho baseados em integrais de erro, que quantificam a qualidade da resposta do sistema ao longo do tempo. Entre os principais critérios, estão o ISE (*Integral of Squared Error*), ITAE (*Integral of Time-weighted Absolute Error*), IAE (*Integral of Absolute Error*) e ITSE (*Integral of Time-weighted Squared Error*).

Conforme [15], os critérios de desempenho ISE, ITAE, IAE e ITSE são métricas que avaliam a resposta do sistema em termos do erro entre o valor desejado (setpoint) e o valor atual da variável controlada. Eles são calculados como integrais ao longo do tempo, ponderando o erro de diferentes maneiras para enfatizar aspectos específicos do desempenho, como a magnitude do erro, a duração do erro ou a influência do tempo.

Na Figura 12 é ilustrado os parâmetros de desempenho do controlador na ótica da integral do erro (ISE, ITAE, IAE e ITSE) para o cenário de degraus de temperatura. Percebe-se que o erro converge para zero em regime permanente em todos os cenários, mostrando a eficácia da ação integral.

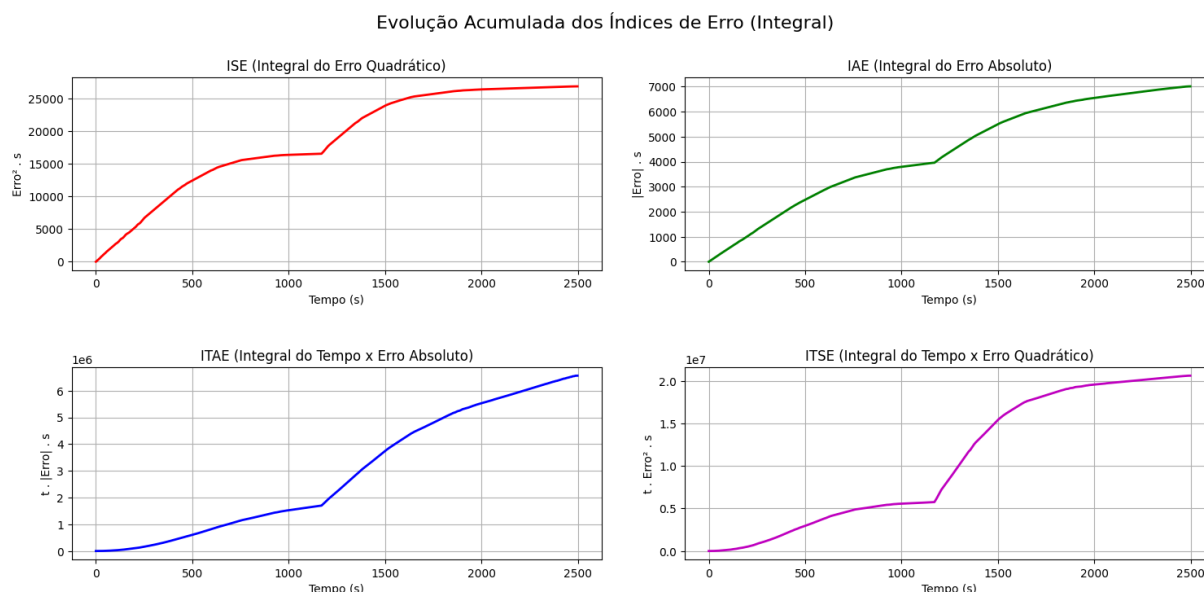


FIGURA 12. Evolução dos índices de desempenho na ótica do erro.

Na Tabela 7 são apresentados os índices de desempenho acumulado na ótica do erro para o cenário de mudanças operacionais na temperatura (degrau de 25°C - 30°C e 30°C - 35°C) da Figura 10.

TABELA 7. Índices de desempenho na ótica do erro (autoria própria).

ISE (°C . s)	IAE (°C² . s)	ITAE (°C . s²)	ITSE (°C² . s²)
26.888,50	7.012,50	6.562.758,00	20.622.316,00

3.4. Discussão dos Resultados

A implementação prática, utilizando o CLP em conjunto com o sistema supervisório SCADA, permitiu o monitoramento em tempo real dos parâmetros do processo. Esse acompanhamento contínuo ofereceu um *feedback* mais imediato e detalhado, possibilitando ajustes rápidos e aprimorando a robustez e a segurança do controle.

A bancada didática confeccionada será útil para as práticas de laboratório das disciplinas da área de controle do Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, destacamos alguns experimentos que serão realizados na bancada: Modelagem matemática do processo, caracterização de sensores e atuadores, linearização da planta em um ponto de operação, projeto e sintonia de controladores PID, projeto de controladores avançados e supervisão local / remota de dados. Para complementar a bancada será desenvolvida uma rede de comunicação remota para comunicar com o sistema supervisório SCADA e com outros processos.

Além do protótipo desenvolvido foi confeccionado um guia (manual) descrevendo o passo-passo da programação e ligação dos sensores ao CLP FX3U para uso por outros alunos e /ou Instituições de Ensino, o guia está disponível na página eletrônica do Orientador do Trabalho.

O Trabalho em tela não é apenas uma repetição de trabalhos existentes; ele representa uma síntese moderna e de alto valor didático das tendências publicadas em artigos e conferências do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) nos últimos 3 anos, disponíveis na *IEEE Xplore digital library*. Destacamos três pontos fundamentais de comparação, a saber:

Vantagem Industrial - O trabalho do IFPB opta por um CLP em vez de um microcontrolador (Arduino ou Raspberry Pi), e por um SCADA industrial em vez de uma *interface web* simples, o que oferece uma formação mais direta para o mercado de trabalho.

Rigor Acadêmico - Aborda um processo MIMO (Múltiplas Entradas, Múltiplas Saídas) complexo (nível-temperatura) e planeja implementar estratégias de controle avançado (cascata) que são temas centrais de conferências recentes do IEEE.

Visão de Futuro - O projeto está posicionado exatamente na transição entre a automação industrial clássica (integração do CLP com o SCADA local) e as tendências emergentes (IIoT – *Industrial Internet of Things*), como R4EM, v. 7, n. 2, p. 12-25, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21708/issn27635325.v7n2.a15010.2025>

indicado pela proposta de trabalhos futuros para supervisão remota.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho culminou no desenvolvimento e na implementação bem-sucedida de uma planta didática para controle de nível e temperatura, constituindo uma ferramenta de ensino de automação industrial de baixo custo e alta replicabilidade. A principal contribuição do protótipo reside na sua viabilidade econômica, apresentando um custo total de R\$ 727,15, o que o posiciona como uma alternativa altamente acessível e eficaz em comparação com soluções comerciais similares, que podem alcançar R\$ 15.000,00.

As estratégias de controle implementadas conseguiram rastrear/mapear com eficácia as referências frente às saídas controladas com bom desempenho dinâmico e estabilidade em malha fechada, em termos das mudanças operacionais de funcionamento da planta, bem como no compromisso da estratégia de controle na redução de tempo e na qualidade do produto final.

O diferencial metodológico foi alcançado pela integração do CLP industrial FX3U com o sistema SCADA Elipse E3, elevando o realismo do aprendizado. Tal arquitetura permitiu a supervisão local dos dados e a realização de medições em tempo real das variáveis de processo. Com isso, a bancada didática se estabelece como um recurso pedagógico valioso e essencial para as práticas de laboratório das disciplinas de Controle do Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação.

Como trabalhos futuros sugere-se: (a) Construir uma *interface* da supervisão remota dos dados via *web site*; (b) Realizar a sintonia e validação dos controles PID para a malha de nível; (c) Desenvolver e validar uma estratégia de controle em cascata; (d) adicionar um módulo de simulação de falhas (falha no sensor, curto-circuito), ampliando a profundidade didática dos experimentos.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa recebeu apoio financeiro do IFPB para uma bolsa de pesquisa de nível superior e despesas de custeio por meio da Chamada Interconecta IFPB - Edital N° 01/2025. Agradecimentos ao IFPB Campus Cajazeiras pela disponibilização da estrutura laboratorial durante a condução dos testes de validação da bancada didática.

REFERÊNCIAS

- [1] OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5ª Edição, Editora Pearson, 2010.
- [2] ALEXANDRE, G. B. Controle liga-desliga e supervisão de dados em uma estufa. **Anais**. Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia. Goiânia – GO, 2022.
- [3] OLIVEIRA, *et al.* Automação nos processos industriais: processo de implementação e o papel do gestor de tecnologia da informação. **Revista Prospectus** - Fatec Itapira, v. 6, n.1, p. 153-203, Jan/Jun, 2024. DOI: 10.5281/zenodo.12719343.
- [4] ARAÚJO, *et al.* Sistema inteligente de supervisão e controle de capacidade em processos industriais: integração de SCADA, IA e aprendizado de máquina. **ARACÊ**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 16090–16112, 2024. DOI: 10.56238/arev6n4-295.
- [5] SHAW, W. T. **Cybersecurity for industrial SCADA systems**. S.L.: PennWell Books, 2006.
- [6] VIDAL, J. N. **Bancada didática de baixo custo para o ensino de teoria de controle**. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.
- [7] MARTINS, A. A.; FIGUEIREDO, B. R.; ROCHA, R. R. Proposta de bancada didática para instrumentação e controle de nível e vazão – P&ID e DCP. **Anais**. 52º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE 2024). Vitória - ES, 2024. DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.5091
- [8] VOLZ, A.K.; OLIVEIRA, J.A. Elaboração de uma bancada didática para controle de temperatura e medição de vazão. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 41, p. 373-384, 2022.
- [9] PINESSO, R.G.S. **Desenvolvimento de function blocks para implementar datalogger em CLP**. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação), Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau - SC, 2024.
- [10] MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados**. 5ª edição. São Paulo: Atlas, 2002.
- [11] MALHOTRA, N. **Pesquisa de marketing: foco na decisão**. 3ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2011.
- [12] PINHEIRO, J. K. P. **Controle liga-desliga de temperatura e supervisão de dados em uma estufa didática**. Monografia (Tecnologia em Automação Industrial), Instituto Federal da Paraíba, Cajazeiras-PB, 2023.
- [13] SILVA NETO, A. M; SANTOS, N. A. **Sistemas de controle e supervisão de dados em uma estufa didática**. Monografia (Engenharia de Controle e Automação), Instituto Federal da Paraíba, Cajazeiras-PB, 2024.
- [14] DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Moderno**. 8ª Edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001.
- [15] LI, Y.; ANG, K. H.; CHONG, G.C.Y. PID control system analysis, design, and technology. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**. Vol. 13, Issue 4, page 559-576, 2005. DOI: 10.1109/TCST.2005.847331