SCIENCOMM
REVISTA ONLINE



ESG EM Igrejas

15ª Ed.
NOV.2026 - ANO QUINZE
ISSN 2237-3330

Editorial

Prezados leitores e leitoras,

Enquanto discutíamos a capa da revista SCIENCOMM 15, no grupo de edição, buscando soluções estéticas para a cruz em marca-d'água que ilustra o tema "ESG em Igrejas", revivia a mensagem que este símbolo cristão pode trazer aos rincões deste País, onde houver uma igreja, pequena que seja, com seus membros convertidos que creem na força do Evangelho de nosso Senhor Jesus Cristo. Confesso que me emocionei quando vi a solução desenvolvida pelo nosso designer, e agora, ao escrever estas linhas, sei que este meio cumprirá novamente seu papel de comunicar a importância dos artigos científicos, para uma sociedade ávida por experimentos baseados na ciência, em qualquer das suas vertentes, seja ela história, automação, engenharias ou administração.

E é exatamente isso que estamos mostrando ao mundo, com estes artigos estampados em nosso conteúdo. É bom fazer parte disso: o artigo cujo tema está em destaque foi apresentado, como exigência para conclusão do meu curso de Teologia – mas esta é uma outra história: a de um TCC.

Em nome de nossa aguerrida e brilhante equipe: Vanessa, Leandro, Renato e eu, quero agradecer aos concluintes e seus orientadores, que depositaram sua confiança neste veículo, que, mais uma vez, dirá a que veio, quanto a seu propósito e missão: tornar relevantes artigos científicos, que serão luzes na escuridão da falta de ideias, e água na seca do deserto de experimentos e inovação, nesta quadra que vive a nação.

Portanto, que a SCIENCOMM 15 seja isso, repito: luz na escuridão, e que mate a sede de muitos, por tecnologia para a prática da sustentabilidade ESG em famílias, empresas, escolas, poder público e igrejas.

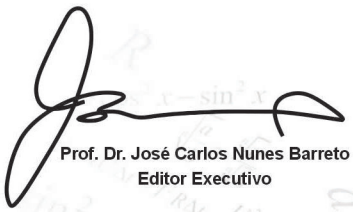
E que nosso Senhor Jesus Cristo – que não está mais na Cruz (aleluia!) – nos abençoe e guarde nesta jornada.

Amém e amém!

Boa leitura!

Editor Executivo
Prof. Dr. José Carlos Nunes Barreto

Editor Executivo adjunto
Prof. Dr. Leandro Aureliano da Silva



Prof. Dr. José Carlos Nunes Barreto
Editor Executivo

SCIENCOMM é um site de relacionamento da comunidade científica, que visa à formação de uma rede de integração entre pesquisadores por meio do referenciamento entre autores.
A redação de documentos dirigidos ao público não acadêmico é um objetivo secundário da comunidade, como forma de difusão de seu conhecimento.

www.sciencomm.com.br

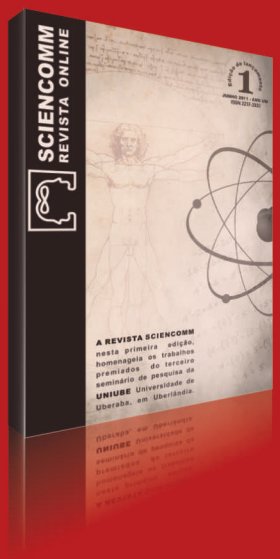
15ª

NOV. 2026 - ANO QUINZE
ISSN 2237-3330

SCIENCOMM
REVISTA ONLINE

Conselho Editorial

Dra. Hanny Angeles Gomide - UNIESSA
Dr. José Carlos Nunes Barreto - IFET/SP
Dr. José Augusto Della Coleta - UFU
Dr. Leandro Aureliano Silva - UNIUBE
Dr. Alexsandro Silva Sólon - UFTM
Dr. Euclides Antônio de Lima - UNIUBE
Dr. Janaínna G. Pacheco Olegário - FACTHUS
Dr. Álisson Rocha Machado - PUCPR
Dra. Luciana Cezarino - FAGEN/UFU
Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva - FEMEC/UFU
IN MEMORIAN Dr. Wisley Falco Sales - FEMEC/UFU



Criação e Edição

José Carlos Nunes Barreto
Milton Renato Miller Pimenta
Bruno Gomes

Revisão Final

Vanessa Augusta Ferreira

Debatef
Soluções e Conhecimento

SCIENCOMM
REVISTA ONLINE

Índice

NOVEMBRO 2026 - ANO QUINZE



Sumário/Indice

4 ..... ECOTEOLOGIA, ECOÉTICA E ESG: UM MODELO AVANÇADO DE GESTÃO SUSTENTÁVEL APLICADO ÀS IGREJAS

15 ..... INTEGRAÇÃO DE NORMAS ISO E NRS EM PROCESSO PRODUTIVO METALÚRGICO

26 ..... PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO CLIMÁTICA DE BAIXO CUSTO BASEADA EM ARDUINO E IOT PARA IRRIGAÇÃO AUTOMÁTICA

34 ..... USO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA NO CULTIVO HIDROPÔNICO

40 ..... ANÁLISE DA ADEQUAÇÃO DE MÁQUINA DE GRAVAÇÃO A LASER ÀS EXIGÊNCIAS DAS NR 10 E NR 12

52 ..... PROJETO DE AUTOMAÇÃO PARA MONITORAMENTO E BOMBEAMENTO DE VINHAÇA EM USINA DE CANA-DE-AÇÚCAR

68 ..... ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA USINA FOTOVOLTAICA DE MICROGERAÇÃO

ECOTEOLOGIA, ECOÉTICA E ESG: UM MODELO AVANÇADO DE GESTÃO SUSTENTÁVEL APLICADO ÀS IGREJAS

BARRETO, José Carlos Nunes, FTSA (Faculdade de Teologia Sulamericana) – Londrina/PR, josecarlosnunesbarreto@gmail.com
TEIXEIRA, Mauro Sergio Rota, FTSA (Faculdade de Teologia Sulamericana) – Londrina/PR, mauro@ftsa.edu.br

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo propor um modelo de gestão sustentável aplicável às instituições religiosas, mediante a integração dos fundamentos da ecoteologia, da ecoética e dos princípios ESG (Environmental, Social and Governance), considerando as particularidades da missão e da identidade cristã. Parte-se da compreensão de que as igrejas, além de sua dimensão espiritual, constituem organizações que administram recursos humanos, financeiros e patrimoniais, produzindo impactos sociais e ambientais que demandam responsabilidade, planejamento e transparência. Metodologicamente, a pesquisa caracteriza-se como qualitativa, exploratória e bibliográfica, com abordagem interdisciplinar, articulando conhecimentos da teologia, da ética, da administração e da gestão ambiental. Como resultado, apresenta-se o framework ESG-EcoChurch, estruturado nos pilares ambiental, social e de governança, com indicadores, metas e diretrizes para sua implementação e monitoramento. A proposta contempla práticas como o uso racional dos recursos naturais, a gestão de resíduos, o fortalecimento de projetos sociais, a transparência administrativa, a prestação de contas e a prevenção de riscos institucionais. O estudo também apresenta uma aplicação prática a partir da experiência da Igreja Presbiteriana Central de Uberlândia. Conclui-se que a integração entre ecoteologia, ecoética e ESG constitui uma alternativa consistente para o aperfeiçoamento da gestão eclesiástica, fortalecendo a mordomia cristã, o cuidado com a criação e a responsabilidade comunitária, sem comprometer a identidade espiritual das igrejas.

Palavras-chave: Ecoteologia. Ecoética. ESG. Gestão sustentável. Igrejas. Governança eclesiástica.

1. INTRODUÇÃO

A crescente intensificação das crises ambientais, sociais e institucionais que marcam a contemporaneidade tem exigido das organizações humanas respostas cada vez mais integradas, éticas e sustentáveis. Nesse cenário, as igrejas, enquanto instituições de relevância espiritual, social e comunitária, não podem permanecer alheias aos desafios que envolvem o cuidado com a criação, a administração responsável dos recursos e a promoção do bem comum.

A reflexão teológica cristã, especialmente em sua vertente ecoteológica, oferece fundamentos consistentes para compreender a relação entre Deus, humanidade e mundo criado, reafirmando que o ser

humano não foi chamado à exploração predatória da criação, mas ao exercício da mordomia responsável, do cuidado e da preservação.

A partir dessa compreensão, este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo de aplicação da ecoteologia nas igrejas, integrando fundamentos bíblicos, princípios de ecoética e práticas contemporâneas de ESG (Environmental, Social and Governance), com vistas à construção de um *framework* avançado de gestão sustentável aplicável ao contexto eclesial.

Trata-se, portanto, de uma proposta que busca unir fé, ética e gestão, demonstrando que a espiritualidade cristã pode dialogar de modo consistente com instrumentos técnicos modernos de organização, planejamento, monitoramento e governança.

A relevância deste estudo decorre da constatação de que, embora muitas igrejas apresentem significativo crescimento institucional e ampliem sua presença social, nem sempre dispõem de modelos estruturados de gestão que lhes permitam utilizar, de maneira eficiente, ética e estratégica, os recursos físicos, humanos, financeiros e ministeriais que lhes são confiados.

À luz da tradição bíblica, especialmente da noção de mordomia cristã e da responsabilidade ensinada por Cristo em passagens paradigmáticas como a parábola dos talentos, compreende-se que a boa administração não constitui mero recurso instrumental, mas expressão concreta de fidelidade, sabedoria e responsabilidade diante de Deus e da comunidade.

Assim, a justificativa deste trabalho está na necessidade de oferecer às lideranças eclesiásticas, aos conselhos e às comunidades de fé um modelo que favoreça decisões mais conscientes, transparentes e sustentáveis, superando práticas improvisadas ou fragmentadas e promovendo uma cultura organizacional comprometida com a excelência, a integridade e a responsabilidade socioambiental.

Nesse sentido, a proposta ultrapassa uma leitura meramente empresarial do ESG, reinterpretando seus pilares à luz da missão da igreja e da ética cristã, de modo que as práticas ambientais, sociais e de governança não sejam vistas como modismos administrativos, mas como desdobramentos coerentes de uma cosmovisão bíblica comprometida com a vida, com a justiça, com a dignidade humana e com o cuidado da Casa Comum.

Do ponto de vista metodológico, a pesquisa caracteriza-se como qualitativa, exploratória e bibliográfica, fundamentando-se em uma abordagem interdisciplinar que articula contribuições da teologia, da ética, da administração, da gestão ambiental, da governança e da saúde ocupacional. Para a construção do referencial teórico, o estudo dialoga com autores que oferecem bases importantes para a compreensão da ecoteologia, da ecoética e da gestão sustentável, entre os quais Leonardo Boff (2012), Jürgen Moltmann (1993), Pierre Bourdieu (2001), Papa Francisco (2015), Ricardo Ribeiro Alves (2023), Paulo Baraldi (2004), Paul de Backer (2002), Etienne Grandjean (1998) e Barreto, J. C. N. (2000).

2. REVISÃO TEÓRICA GERAL

Além da revisão bibliográfica e sistemática, o percurso metodológico prevê o uso de estudos de caso, entrevistas semiestruturadas e análise documental, a fim de conferir maior densidade à proposta e

aproximá-la das realidades concretas das instituições religiosas.

O objetivo é não apenas discutir conceitos, mas propor um modelo prático de implementação, com indicadores, ferramentas de avaliação e diretrizes aplicáveis, permitindo que as igrejas possam estruturar ações sustentáveis nos eixos ambiental, social e de governança. Desse modo, este trabalho pretende contribuir academicamente para o campo da ecoteologia aplicada e, ao mesmo tempo, oferecer um instrumento útil e inovador para a gestão eclesiástica, conciliando fidelidade bíblica, responsabilidade ética e eficiência administrativa.

O desenvolvimento deste trabalho busca construir uma proposta teórico-prática de gestão sustentável aplicada às igrejas, articulando a ecoteologia, a ecoética e os princípios de ESG em uma estrutura conceitual e operacional coerente. A organização deste capítulo parte da compreensão de que a igreja, embora essencialmente voltada à missão espiritual, também se constitui como organização social dotada de patrimônio, recursos humanos, processos decisórios, atividades comunitárias e impactos concretos sobre a sociedade e o meio ambiente.

Por isso, sua atuação pode e deve ser pensada à luz de critérios de responsabilidade, planejamento, monitoramento e boa governança, sem que isso implique perda de sua identidade religiosa, mas, ao contrário, aperfeiçoamento de sua fidelidade institucional e ministerial.

Para atender a esse propósito, o desenvolvimento foi reorganizado em dois grandes eixos complementares. O primeiro reúne os fundamentos conceituais, bíblicos, teológicos, éticos e gerenciais que sustentam a proposta do estudo. O segundo apresenta o modelo aplicado, isto é, a estrutura do *framework* ESG-EcoChurch, seus instrumentos, indicadores, etapas de implementação e possibilidades de aplicação prática em igrejas. Com isso, o capítulo avança da fundamentação para a operacionalização, preservando unidade argumentativa e permitindo que o trabalho tenha consistência acadêmica, clareza estrutural e viabilidade prática.

2.1. Ecoteologia: conceito e campo de estudo

A ecoteologia pode ser compreendida como o campo da reflexão teológica que analisa a relação entre Deus, a criação e o ser humano, reconhecendo que o mundo criado possui valor por sua origem divina e por permanecer sob a soberania do Criador.

Essa perspectiva amplia a compreensão tradicional da teologia ao demonstrar que a criação não constitui tema periférico, mas realidade diretamente relacionada à revelação, à responsabilidade humana e à missão da igreja. Boff publicou em 2012 o texto “Não há sustentabilidade sem o cuidado” e, no mesmo ano, publicou o livro *O cuidado necessário*, dedicado à vida, saúde, educação, ecologia, ética e espiritualidade.

No texto de 2012, Boff estabelece explicitamente uma relação entre sustentabilidade e cuidado, afirmando que o cuidado deve acompanhar a ação humana diante das consequências ambientais e sociais. Seu campo de estudo abrange temas como criação, mordomia, cuidado com a terra, crise ecológica e responsabilidade cristã diante dos desafios contemporâneos, propondo uma espiritualidade que una fé,

cuidado e responsabilidade histórica (BOFF, 2012; MOLTMANN, 1993).

2.2. Bases bíblicas da ecoteologia

As bases bíblicas da ecoteologia encontram-se em textos que relacionam criação, cuidado e responsabilidade humana diante de Deus. Em Gênesis 2:15, o homem recebe a incumbência de cultivar e guardar o jardim, o que indica uma vocação de cuidado e administração; em Salmos 24:1, afirma-se que a terra pertence ao Senhor, reafirmando a soberania divina sobre toda a criação; e, em Romanos 8, a própria criação aparece vinculada à esperança da redenção (BÍBLIA SAGRADA; TASKER, 2006).

Esses textos evidenciam que o cuidado com a ordem criada não é estranho à fé bíblica, mas desdobramento da doutrina da criação e da mordomia cristã, reforçando a responsabilidade da igreja perante o mundo criado.

2.3. Ecoteologia contemporânea

A ecoteologia contemporânea ganhou maior relevância à medida que a crise ambiental passou a ser compreendida não apenas como problema técnico, mas também como questão moral, espiritual e civilizatória. Nesse contexto, Leonardo Boff (2012) destaca a necessidade de uma espiritualidade do cuidado com a Casa Comum, enquanto Jürgen Moltmann (1993) desenvolve uma compreensão teológica em que a criação participa do horizonte da esperança e da restauração. Essas contribuições ajudam a deslocar a temática ecológica para o centro da reflexão cristã, mostrando que a fé deve dialogar com os desafios concretos da preservação da vida e da responsabilidade humana diante do planeta.

2.4. Ecoética: conceito e abrangência

A ecoética é o campo da reflexão moral que amplia a ética tradicional ao considerar os efeitos das ações humanas sobre o meio ambiente, a coletividade e as gerações futuras. Ela surge da percepção de que a atividade humana contemporânea produz impactos amplos e duradouros, exigindo critérios éticos que superem o plano meramente individual. Sua abrangência inclui responsabilidade institucional, uso de recursos, justiça ambiental, saúde coletiva e sustentabilidade, permitindo analisar de modo mais abrangente a conduta de organizações e comunidades. No caso das igrejas, a ecoética oferece base importante para avaliar práticas administrativas e comunitárias à luz do cuidado com a vida e da responsabilidade coletiva (JONAS, 2006; BOFF, 2012).

2.5. Princípios da ecoética

Entre os principais princípios da ecoética destacam-se a responsabilidade intergeracional, a prudência, o cuidado e a sustentabilidade moral. A responsabilidade intergeracional indica que a geração

presente não deve comprometer as condições de vida das gerações futuras; a prudência orienta a tomada de decisão diante de riscos e impactos complexos; o cuidado aponta para a proteção ativa da vida; e a sustentabilidade moral exige coerência entre os fins pretendidos e os meios empregados (JONAS, 2006; BOFF, 2012).

No contexto cristão, esses princípios podem ser articulados à noção de mordomia e ao dever de amar o próximo, fornecendo às igrejas critérios mais amplos para orientar sua atuação institucional e comunitária.

2.6. ESG: conceito, origem e estrutura

O ESG, sigla para Environmental, Social and Governance, consolidou-se como modelo de gestão voltado à sustentabilidade, à responsabilidade social e à integridade institucional. Seu desenvolvimento está relacionado à percepção de que o desempenho organizacional não pode ser avaliado apenas por resultados econômicos, devendo considerar também o impacto ambiental das atividades, a relação com a sociedade e a qualidade dos mecanismos de governança.

Uma Igreja ESG não deve apenas perguntar: “Que problemas ambientais temos?”. Ela deve perguntar: “Quais são os riscos e oportunidades ambientais, sociais e de governança que podem afetar nossa missão?”.

Ricardo Ribeiro Alves (2023) publicou, em 2023, o livro ESG: o presente e o futuro das empresas, pela ed. Vozes. A apresentação da obra descreve uma estrutura na qual E e S estão inter-relacionados e têm a governança como base, criando condições para uma adoção ética, transparente e eficaz do ESG.

O pilar ambiental trata do uso de recursos e da redução de impactos ecológicos; o social envolve relações humanas, inclusão e compromisso comunitário; e o de governança refere-se à ética, à transparência e ao controle institucional. Embora originado no ambiente corporativo, esse modelo pode ser adaptado ao contexto eclesial como instrumento de gestão responsável (ALVES, 2023).

2.7. ESG e sua relação com o ambiente eclesial

A relação entre ESG e ambiente eclesial torna-se evidente quando se reconhece que as igrejas também administram patrimônio, pessoas, projetos e recursos que geram efeitos sociais e ambientais. O eixo ambiental relaciona-se ao uso consciente de energia, água e materiais; o eixo social conecta-se à vocação assistencial, educativa e comunitária da igreja; e o eixo da governança responde à necessidade de transparência, ética e prestação de contas. Desse modo, o ESG pode ser reinterpretado à luz da missão cristã não como simples reprodução de práticas empresariais, mas como instrumento útil para fortalecer a mordomia, a responsabilidade e a integridade institucional no contexto religioso (ALVES, 2023).

2.8. Gestão de riscos, saúde, ergonomia e gestão integrada

A proposta de gestão sustentável para igrejas também requer atenção à saúde ocupacional, à ergonomia, à prevenção de riscos e à integração entre qualidade, meio ambiente e segurança. Muitas comunidades convivem com sobrecarga, improvisação e ausência de processos claros, o que pode gerar desgaste físico, emocional e organizacional.

Nesse contexto, a literatura sobre gerenciamento de riscos e ergonomia oferece subsídios importantes para pensar ambientes institucionais mais saudáveis e equilibrados. Segundo Baraldi (2004), "o gerenciamento de riscos deve ser compreendido de maneira integrada, relacionando riscos e oportunidades aos objetivos da organização e aos mecanismos de controle". O gerenciamento não constitui apenas uma reação aos acontecimentos adversos, mas um processo que contribui para orientar decisões e alcançar os objetivos organizacionais.

A perspectiva da gestão integrada, conforme Barreto (2000), fortalece essa abordagem ao reunir qualidade, segurança, meio ambiente e saúde em uma mesma lógica sistêmica, favorecendo maior estabilidade e melhor funcionamento organizacional. Para isso, Grandjean (1998) ainda defende que a ergonomia procura adaptar as condições de trabalho às características e necessidades do ser humano, considerando os aspectos fisiológicos, físicos e organizacionais da atividade. O trabalho deve ser concebido de modo a favorecer a saúde, a segurança, o conforto e a eficiência das pessoas, atendendo assim ao pilar S do ESG (OLIVEIRA; TSANHU, 2018).

2.9. Fundamentação da mordomia cristã e boa administração

A mordomia cristã constitui fundamento central deste trabalho, pois estabelece a ligação entre fé, responsabilidade e boa administração. Na perspectiva bíblica, os recursos, dons, pessoas e estruturas confiados à igreja devem ser administrados com fidelidade, sabedoria e zelo, e não com negligência ou desperdício. A parábola dos talentos reforça essa compreensão ao valorizar a administração responsável e censurar a omissão.

Assim, a boa gestão não representa concessão ao pragmatismo secular, mas expressão concreta de obediência, serviço e cuidado com aquilo que pertence a Deus. No contexto eclesial, isso significa organizar melhor os recursos e processos da igreja para que sua missão seja cumprida com maior responsabilidade e integridade (BÍBLIA SAGRADA; TASKER, 2006).

3. MODELO APLICADO DE GESTÃO SUSTENTÁVEL PARA IGREJAS: ESG-ECOCHURCH

3.1. Construção do *framework* ESG-EcoChurch

A construção do *framework* ESG-EcoChurch representa a etapa aplicada deste trabalho, pois traduz os fundamentos da ecoteologia, da ecoética e do ESG em uma proposta concreta de gestão sustentável para igrejas. O modelo parte da compreensão de que a igreja, além de comunidade de fé, também administra recursos, pessoas, espaços e processos, exigindo organização, planejamento e responsabilidade institucional. Assim, o *framework* não busca empresarializar a igreja, mas oferecer um instrumento de gestão coerente com sua missão, permitindo integrar espiritualidade, ética, cuidado com a criação e boa governança em uma estrutura prática de administração e acompanhamento.

3.2. Pilar ambiental do modelo ESG

O EcoChurch baseia-se na ideia de que a igreja deve assumir responsabilidade concreta pelo modo como utiliza os recursos naturais e organiza seus espaços físicos. Nesse eixo, incluem-se ações como uso racional de energia e água, gestão de resíduos, coleta seletiva, redução de desperdícios e avaliação de soluções mais sustentáveis, como energia solar. Mais do que reduzir custos, essas práticas reforçam a coerência entre fé e cuidado com a criação, contribuindo para formar uma cultura institucional de responsabilidade ecológica no ambiente eclesial.

3.3. Indicadores ambientais

Os indicadores ambientais são importantes porque permitem acompanhar de forma objetiva o desempenho ecológico da igreja e verificar se as práticas sustentáveis estão sendo efetivamente implementadas. Entre os indicadores possíveis estão o consumo mensal de energia, o uso de água, o volume de resíduos reciclados e a redução de desperdícios, além de estimativas simplificadas de emissão de carbono quando isso for viável. Seu objetivo não é burocratizar a gestão, mas fornecer parâmetros concretos para planejamento, monitoramento e melhoria contínua das ações ambientais da instituição.

3.4. Pilar social do modelo

O pilar social do modelo parte do entendimento de que a missão da igreja possui dimensão comunitária e deve gerar impacto concreto na vida das pessoas. Por isso, o *framework* propõe que ações assistenciais, educativas e comunitárias sejam organizadas de forma mais estruturada, com continuidade e critérios de acompanhamento. Programas de apoio social, segurança alimentar, inclusão e educação ambiental podem ser integrados a esse eixo, fortalecendo o papel da igreja como agente de cuidado,

acolhimento e promoção da dignidade humana no território em que atua.

3.5. Indicadores sociais

Os indicadores sociais permitem avaliar a efetividade das ações comunitárias desenvolvidas pela igreja e verificar se elas estão produzindo resultados consistentes. Entre os principais indicadores podem ser considerados o número de pessoas beneficiadas, a regularidade dos programas, o alcance territorial das iniciativas e o nível de participação gerado na comunidade. Esses dados ajudam a igreja a planejar suas ações de forma mais eficiente, a identificar fragilidades e a ampliar o impacto de seus projetos sociais, sem reduzir sua missão a mera quantificação.

3.6. Pilar de governança do modelo

O pilar de governança é responsável por assegurar que a igreja desenvolva suas atividades com transparência, ética, organização e responsabilidade. Muitas instituições religiosas enfrentam fragilidades nesse campo em razão da informalidade administrativa, da concentração de decisões e da ausência de mecanismos claros de supervisão. O modelo propõe, portanto, a criação de conselhos ou comissões de acompanhamento, códigos de ética, rotinas de prestação de contas e definição mais clara de funções, fortalecendo a credibilidade institucional e reduzindo riscos de desorganização e conflitos internos.

3.7. Indicadores e metas do modelo

A definição de indicadores e metas é fundamental para transformar o *framework* em instrumento efetivo de gestão. No eixo ambiental, podem ser estabelecidas metas de redução de consumo e desperdício; no eixo social, metas de ampliação do alcance dos programas; e, no eixo de governança, objetivos de transparência, regularidade documental e fortalecimento dos controles internos. Esses parâmetros permitem acompanhar a evolução da igreja, orientar decisões e promover ajustes ao longo do processo, tornando a gestão mais objetiva e consistente.

Alves (2023), portanto, fornece a arquitetura ESG, enquanto Boff (2012) fornece o fundamento ético, Baraldi (2004) fornece a gestão de riscos e controles, e Grandjean (1998) fornece uma base para o cuidado com as pessoas. Isso permite formular o Modelo ESG para Igrejas assim: Boff dá o “por quê”; Alves o “o que”; Baraldi o “como gerenciar”; e finalmente Grandjean ajuda a definir “como cuidar das pessoas”.

4. ESG EM IGREJAS – ESTUDO DE CASO DA PRESBITERIANA CENTRAL DE UBERLÂNDIA

Ambiental

- Energia da implantação de placas fotovoltaicas;
- Expectativa de melhoria na gestão de resíduos, após implantação da coleta seletiva.

Social

- Projetos comunitários: ajuda com 12 cestas básicas/ano à Casa de Recuperação – Jesus Nazareno;
- Inclusão social: consolidação de melhoria para o caixa da Casa Betesda (com a gestão junto à CEMIG para desconto de doações na conta de luz) e doação de 12 (doze) cestas básicas ao ano;
- Doação de mais 12 (doze) cestas básicas/ano para famílias carentes cadastradas através da diaconia da igreja.

Governança

- Relatórios e comissões sobre ESG;
- Auditoria.

4.1. Modelo Proposto: Framework ESG para Igrejas

Quadro 01: Indicadores.

Pilar	Indicador	Meta
Ambiental	Consumo de energia	-20%
Social	Projetos sociais	+30%
Governança	Transparência	100%

Fonte: Autores, 2026.

5. PLANO DE IMPLEMENTAÇÃO CONFORME METODOLOGIA (PMI/PMBOK)

Fases

1. Diagnóstico
2. Planejamento
3. Execução
4. Monitoramento
5. Encerramento

Quadro 02: Cronograma.

Fase	Duração
Diagnóstico	2 meses
Planejamento	2 meses
Execução	6 meses

Fonte: Autores, 2026.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho partiu da necessidade de refletir sobre a relação entre fé cristã, responsabilidade socioambiental e gestão institucional, propondo, para isso, uma articulação entre ecoteologia, ecoética e ESG aplicada ao contexto das igrejas. Inicialmente, foram examinados os fundamentos teóricos e conceituais do estudo, com destaque para a ecoteologia, como campo de reflexão sobre a relação entre Deus, a criação e a humanidade; para a ecoética, que amplia a responsabilidade moral diante da vida, do meio ambiente e das futuras gerações; e para o ESG, como modelo contemporâneo de gestão, orientado pelos pilares ambiental, social e de governança.

Em seguida, o trabalho desenvolveu a proposta do framework ESG-EcoChurch, estruturando seus eixos de atuação, seus indicadores, suas metas e seus mecanismos de acompanhamento, de modo a demonstrar que é possível traduzir princípios bíblicos e éticos em práticas institucionais concretas. Assim, o percurso do estudo avançou da fundamentação teórica para a proposição aplicada, mantendo unidade entre reflexão conceitual, coerência teológica e viabilidade administrativa.

Conclui-se que a integração entre ecoteologia, ecoética e ESG oferece uma base consistente para a formulação de um modelo de gestão sustentável voltado às igrejas, sem descaracterizar sua identidade espiritual, todavia, ao contrário, fortalecendo sua fidelidade à mordomia cristã, ao cuidado com a criação e à responsabilidade comunitária.

O estudo permitiu verificar que a adoção de práticas ambientais, sociais e de governança no ambiente eclesial não representa mera assimilação de linguagem empresarial, mas pode constituir importante instrumento de organização, transparência, prevenção de desperdícios e qualificação da ação institucional da igreja.

Quanto às possíveis aplicações, o modelo ESG-EcoChurch pode servir como referência para igrejas de diferentes portes e contextos, desde comunidades locais menores até instituições religiosas com estrutura administrativa mais ampla, sempre com as adaptações necessárias à sua realidade. Sua utilização pode favorecer a implantação de práticas como uso racional de recursos, gestão de resíduos, organização de programas sociais, fortalecimento da transparência institucional, criação de conselhos de acompanhamento e elaboração de relatórios internos de desempenho.

Além disso, o *framework* pode contribuir para a formação de lideranças mais conscientes quanto à importância da boa administração, da saúde organizacional, e da responsabilidade socioambiental, ampliando o papel da igreja como agente de transformação ética e comunitária. Nesse sentido, a proposta apresentada não se limita ao campo teórico, contudo, oferece uma possibilidade concreta de

aperfeiçoamento da gestão eclesial, promovendo uma atuação mais responsável, coerente e alinhada aos princípios cristãos de cuidado, serviço e fidelidade.

REFERÊNCIAS

ALVES, Ricardo Ribeiro. **ESG**: o presente e o futuro das empresas. Petrópolis, RJ: Vozes, 2023.

BACKER, Paul de. **Gestão ambiental:** a administração verde. Tradução de Heloísa Martins Costa. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

BARALDI, Paulo. **Gerenciamento de riscos**: a gestão de oportunidades, a avaliação de riscos e a criação de controles internos nas decisões empresariais. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

BARRETO, José Carlos Nunes. **As ferramentas da qualidade e seu uso no gerenciamento ambiental do Polo Sidero-petroquímico de Cubatão**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2000.

BÍBLIA. Português. **Bíblia Sagrada**. [s.l.: s.n.], [s.d.].

BOFF, Leonardo. **Ecologia**: grito da Terra, grito dos pobres. Petrópolis, RJ: Vozes, 2012.

BOFF, Leonardo. **O cuidado necessário**: na vida, na saúde, na educação, na ecologia, na ética e na espiritualidade. Petrópolis, RJ: Vozes, 2012.

BOURDIEU, Pierre. **O poder simbólico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

FRANCISCO, Papa. **Carta encíclica Laudato si'**: sobre o cuidado da casa comum. Vaticano, 24 maio 2015.

GRANDJEAN, Etienne. **Manual de ergonomia**: adaptando o trabalho ao homem. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 1998.

JONAS, Hans. **O princípio responsabilidade**: ensaio de uma ética para a civilização tecnológica. Rio de Janeiro: Contraponto, 2006.

MOLTMANN, Jürgen. **Deus na criação**: doutrina ecológica da criação. Petrópolis, RJ: Vozes, 1993.

OLIVEIRA, Ailton Luiz de; TSANHU, Oswaldo Ramos. **Gerenciamento do ciclo da qualidade**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2018.

TASKER, R. V. G. **Mateus**: introdução e comentário. São Paulo: Vida Nova, 2006.

INTEGRAÇÃO DE NORMAS ISO E NRS EM PROCESSO PRODUTIVO METALÚRGICO

BARRETO, José Carlos Nunes, josecarlosnunesbarreto@gmail.com
LEAL, Vanessa Augusta Ferreira, vanaferreira28@gmail.com

RESUMO

O setor metalúrgico reúne processos produtivos que envolvem riscos ocupacionais, ambientais, elétricos, mecânicos, ergonômicos e de qualidade. A gestão fragmentada desses fatores pode dificultar a prevenção de acidentes, o atendimento aos requisitos legais e a melhoria do desempenho organizacional. Este artigo apresenta uma proposta conceitual de integração das Normas Regulamentadoras brasileiras NR-01, NR-10, NR-12 e NR-17 com as normas ISO 31000, ISO 45001, ISO 9001 e ISO 14001, tendo como eixo estruturante um Sistema de Gestão Integrado (SGI) orientado por riscos e alinhado aos pilares ambiental, social e de governança (ESG). A abordagem contempla o mapeamento dos processos metalúrgicos, a identificação integrada de perigos e aspectos ambientais, a avaliação e o tratamento de riscos, a padronização documental, a capacitação dos trabalhadores, auditorias e indicadores de desempenho. Também são apresentados indicadores propostos no documento-base, entre eles o Índice Barreto de Exposição ao Risco Ocupacional (IBERO), cuja aplicação depende da definição de escalas, critérios e procedimentos de validação. Conclui-se que a integração normativa pode fortalecer a prevenção, a conformidade e a tomada de decisão, desde que adaptada às características reais da organização e acompanhada de avaliação contínua.

Palavras-chave: Sistema de Gestão Integrado; Normas Regulamentadoras; ESG e Risco Ocupacional.

1. INTRODUÇÃO

A atividade metalúrgica compreende operações como corte, conformação, usinagem, soldagem, fundição, movimentação de materiais, manutenção e tratamento de superfícies. Essas atividades podem expor trabalhadores a máquinas e equipamentos, instalações elétricas, fumos metálicos, ruído, calor, esforços físicos, agentes químicos e riscos associados à organização do trabalho. Paralelamente, o processo produtivo gera aspectos ambientais relacionados ao consumo de energia e água, às emissões atmosféricas e à geração de resíduos.

Nesse cenário, a gestão isolada da qualidade, do meio ambiente e da segurança e saúde no trabalho tende a produzir controles redundantes, lacunas documentais e dificuldades de priorização. A integração de sistemas de gestão permite tratar os riscos de maneira transversal, conectando objetivos estratégicos, processos operacionais, obrigações legais e expectativas das partes interessadas.

O objetivo deste artigo é apresentar uma proposta de integração das Normas Regulamentadoras

NR-01, NR-10, NR-12 e NR-17 com as normas ISO 31000, ISO 45001, ISO 9001 e ISO 14001 em um processo produtivo metalúrgico, articulando o Sistema de Gestão Integrado aos princípios ESG e a indicadores de desempenho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Gestão de riscos e estrutura integrada

A ISO 31000 (ABNT, 2018) fornece diretrizes para a gestão de riscos, compreendida como atividade integrada à governança, à estratégia e aos processos decisórios. Sua abordagem contempla o estabelecimento do contexto, a identificação, a análise, a avaliação e o tratamento dos riscos, além de comunicação, consulta, monitoramento e análise crítica (ISO, 2018). No SGI proposto, essa diretriz funciona como referência metodológica comum para comparar riscos de naturezas distintas.

2.2. Segurança e saúde no trabalho

A NR-01 estabelece disposições gerais e diretrizes para o Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO), operacionalizado por meio do Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR). O inventário de riscos e o plano de ação constituem elementos centrais para identificar perigos, avaliar riscos e definir medidas preventivas (BRASIL, 2025).

A NR-10 disciplina medidas de controle e sistemas preventivos relacionados às instalações e aos serviços em eletricidade (BRASIL, 2026). A NR-12 estabelece referências de segurança para máquinas e equipamentos, incluindo medidas de proteção e procedimentos (BRASIL, 2024). A NR-17 trata da adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, abrangendo aspectos ergonômicos da atividade (BRASIL, 2022). A ISO 45001 complementa esse conjunto ao estabelecer requisitos para um sistema de gestão de saúde e segurança ocupacional, com ênfase em liderança, participação dos trabalhadores, identificação de perigos, controle operacional e melhoria contínua (ISO, 2018).

2.3. Qualidade e gestão ambiental

A ISO 9001 orienta a estruturação de um sistema de gestão da qualidade baseado na abordagem por processos, no atendimento aos requisitos aplicáveis, na avaliação de desempenho e na melhoria. Para a consulta normativa em 2026, deve ser considerada a edição ISO 9001:2026, publicada em setembro de 2026.

A ISO 14001 estabelece requisitos para um sistema de gestão ambiental, com foco na gestão dos aspectos e impactos ambientais, no cumprimento das obrigações de conformidade e na melhoria do desempenho ambiental. A edição ISO 14001:2026 substituiu a edição de 2015, devendo ser considerada

em projetos de implantação ou atualização do sistema, porquanto publicada em abril de 2026.

2.4. ESG e governança

A perspectiva ESG organiza temas ambientais, sociais e de governança relevantes para a sustentabilidade e para a gestão corporativa. No contexto metalúrgico, o pilar ambiental envolve emissões, resíduos e uso de recursos; o social abrange saúde, segurança, ergonomia e condições de trabalho; e a governança compreende controles, rastreabilidade, conformidade, responsabilidades e decisões baseadas em evidências. A matriz de riscos corporativa pode conectar esses temas à estratégia e à operação.

3. METODOLOGIA

Trata-se de um estudo de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e caráter propositivo. O procedimento consistiu na organização e sistematização do conteúdo do documento-base, relacionando os requisitos e diretrizes normativas nele indicados a uma proposta de integração gerencial para processos metalúrgicos. Portanto, os benefícios e resultados descritos são potenciais e dependem de implementação e validação prática.

A proposta adota como referências metodológicas o pensamento baseado em riscos, a abordagem por processos, a integração documental e operacional e o ciclo PDCA (planejar, executar, verificar e agir).

4. PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO

4.1. Objetivo e escopo

O objetivo é implantar um SGI que harmonize requisitos de qualidade, meio ambiente, segurança e saúde no trabalho e gestão de riscos em um processo produtivo metalúrgico. O escopo proposto inclui:

- diagnóstico de conformidade legal, normativa e ambiental;
- mapeamento dos processos produtivos e de apoio;
- identificação integrada de perigos, riscos ocupacionais, aspectos e impactos ambientais;
- elaboração ou atualização do PGR, das avaliações ergonômicas, das análises de risco de máquinas e da documentação de instalações elétricas, conforme aplicabilidade;
- integração dos riscos em matriz corporativa orientada pela ISO 31000;
- definição de indicadores de SST, qualidade e meio ambiente;
- capacitação dos trabalhadores e lideranças;
- auditorias internas integradas e análise crítica pela direção.

O escopo proposto exclui obras civis de grande porte e aquisição de novas linhas produtivas, ressalvadas as adequações necessárias à segurança. A definição final do escopo deve considerar os limites organizacionais, as atividades terceirizadas, os requisitos legais aplicáveis e a influência da organização

sobre seus processos.

4.2. Etapas de implantação

- Diagnóstico inicial: levantamento de processos, requisitos legais, documentos existentes, incidentes, não conformidades e controles implementados.
- Mapeamento e avaliação: identificação de perigos, aspectos ambientais, riscos de qualidade e oportunidades de melhoria em cada etapa produtiva.
- Planejamento dos controles: priorização dos riscos segundo critérios definidos pela organização, seleção de medidas preventivas e elaboração de plano de ação com responsáveis e prazos.
- Integração documental: política integrada, procedimentos operacionais, registros, inventário de riscos, matriz integrada e critérios de controle de documentos.
- Implementação e capacitação: comunicação dos procedimentos, treinamento por função e participação dos trabalhadores na identificação de perigos e avaliação dos controles.
- Verificação e melhoria: monitoramento dos indicadores, inspeções, auditorias internas, análise crítica da direção e tratamento de desvios.

4.3. Entregáveis e partes interessadas

Os principais entregáveis são a política integrada de qualidade, segurança, saúde e meio ambiente (QSMS); a matriz integrada de riscos; os procedimentos operacionais padronizados; o inventário de riscos ocupacionais; o plano de ação priorizado; os indicadores e o relatório de auditoria interna. Participam do sistema a alta direção, engenharia, manutenção, produção, SESMT, trabalhadores, CIPA, clientes e órgãos reguladores.

5. INTEGRAÇÃO DO SGI AO PROJETO ESG COM BASE NA ISO 31000

A ISO 31000 (ABNT, 2018) atua como norma-mãe do sistema, fornecendo a estrutura de gestão de riscos que sustenta os pilares ESG. A Alta Direção assume papel central na definição do apetite ao risco, alinhando objetivos estratégicos, requisitos legais e compromissos ESG.

5.1. Pilar E – Environmental (ISO 14001 + ISO 31000)

Os aspectos ambientais do processo metalúrgico devem ser identificados e avaliados considerando condições normais, anormais e emergenciais, bem como a perspectiva do ciclo de vida quando pertinente. Entre os temas relevantes estão emissões de fumos metálicos e particulados, geração e destinação de resíduos perigosos, consumo de energia e água e prevenção de poluição. Os aspectos

significativos devem ser relacionados à matriz de riscos, aos controles operacionais, às obrigações de conformidade e aos objetivos ambientais.

5.2. Pilar S – Social (NRs + ISO 45001 + ISO 31000)

O pilar social incorpora os riscos à integridade física e à saúde dos trabalhadores que passam a compor o mapa de riscos sociais e humanos da organização. O PGR (NR-01), as análises de risco de máquinas (NR-12), a gestão de segurança elétrica (NR-10) e as avaliações ergonômicas e psicossociais (NR-17) constituem fontes de informação para a avaliação integrada. Indicadores como frequência e gravidade de acidentes, afastamentos, quase-acidentes, absenteísmo e postos avaliados ergonomicamente podem apoiar a prevenção (matriz corporativa ISO 31000 e insumos para avaliação de risco social, desde que definidos com critérios consistentes).

5.3. Pilar G – Governance (ISO 9001 + ISO 31000)

A governança é fortalecida pela definição de responsabilidades, padronização dos processos, controle de documentos, rastreabilidade das decisões, tratamento de não conformidades e auditorias. Os riscos de qualidade, legais, ambientais e ocupacionais podem ser consolidados em uma matriz corporativa (matriz única de riscos), sem perder a especificidade técnica exigida por cada norma ou obrigação legal (Auditorias internas integradas → mecanismo de governança).

5.4. Matriz integrada de riscos e indicadores ESG

Cada risco pode ser classificado sob dimensões estratégica, operacional, legal e ESG. A classificação permite priorizar ações segundo probabilidade, consequência, requisitos legais, materialidade e capacidade de controle. A matriz corporativa não substitui documentos técnicos específicos, como o inventário do PGR, análises de risco de máquinas ou avaliações ergonômicas; ela os articula para fins de gestão e decisão.

Como exemplos de indicadores, propõem-se: emissões por tonelada produzida e percentual de resíduos reciclados (ambiental); frequência e gravidade de acidentes e índice de riscos ergonômicos críticos (social); percentual de riscos críticos tratados e percentual de conformidade legal e normativa (governança). Cada indicador deve possuir fórmula, unidade, fonte de dados, periodicidade, responsável, meta e regra de validação.

5.5. Indicadores Integrados (KPIs ESG)

Ambiental:

- Emissões por tonelada produzida;

- Índice de resíduos reciclados.

Social:

- Taxa de frequência e gravidade de acidentes;
- Índice de riscos ergonômicos críticos.

Governança:

- % de riscos críticos tratados;
- % de conformidade legal e normativa.

5.6. Resultado Estratégico Final

A integração ISO 31000 + NRs + ISOs 9001, 14001 e 45001 transforma o SGI em um sistema de gestão de riscos ESG, permitindo:

- Tomada de decisão baseada em risco e materialidade;
- Redução de passivos legais, ambientais e trabalhistas;
- Atendimento a investidores, certificadoras e cadeias globais de suprimento;
- Alinhamento com boas práticas internacionais de sustentabilidade e governança.

6. UTILIZAÇÃO DOS INDICADORES BARRETO E KPIS (TESE USP – 2000)

6.1. Indicadores em níveis hierárquicos

Conforme defendido na tese de doutorado da USP de BARRETO (2000), os indicadores de desempenho devem ir além de métricas operacionais isoladas, constituindo um sistema integrado de indicadores capaz de refletir:

- Eficiência técnica;
- Robustez do sistema produtivo;
- Exposição a riscos;
- Sustentabilidade de longo prazo.

Os Indicadores Barreto partem do princípio de que desempenho, risco e governança são indissociáveis, organizados em três níveis.

No nível estratégico (governança), os indicadores sintéticos apoiam a alta direção, com foco em risco residual, conformidade e sustentabilidade. No nível tático (gestão), os indicadores acompanham controles e a eficácia dos sistemas de gestão. Já no nível operacional (processo), medem o desempenho físico, humano e ambiental dos processos e subsidiam ações corretivas.

A referência de Barreto (2000), por sua vez, aborda o emprego de ferramentas da qualidade no gerenciamento ambiental da indústria do polo sidero-petroquímico de Cubatão, oferecendo contexto

bibliográfico para a articulação entre qualidade e gestão ambiental.

A distinção entre indicadores antecedentes – sensor de risco (*leading*) e consequentes – medição de consequência (l*agging*) também é relevante. A taxa de quase-acidentes e o percentual de inspeções realizadas podem sinalizar condições que antecedem eventos; a taxa de acidentes e os dias perdidos registram consequências já ocorridas. O uso conjunto dos dois tipos permite avaliar prevenção e resultados.

6.2. Integração com KPIs ESG

Pilar E – Ambiental

- Consumo específico de energia (kWh/tonelada);
- Índice de reaproveitamento de resíduos metálicos;
- Emissões específicas por unidade produzida.

Pilar S – Social

- Índice Barreto de Exposição ao Risco Ocupacional (IBERO);
- Taxa de afastamentos por LER/DORT;
- Percentual de postos com AET implementada.

Pilar G – Governança

- Índice de Conformidade Sistêmica (ICS);
- Percentual de riscos críticos tratados;
- Grau de maturidade do SGI.

6.3. Matriz Indicador × Norma × ESG

Cada indicador é correlacionado simultaneamente a:

- ISO 31000 (risco);
- ISO 9001 (processo);
- ISO 14001 (impacto ambiental);
- ISO 45001 / NRs (SST);
- Pilar ESG correspondente.

Isso garante rastreabilidade, auditabilidade e governança.

6.4. Uso dos Indicadores na Tomada de Decisão

Segundo Barreto (2000), os indicadores devem:

- Antecipar falhas sistêmicas;

- Sustentar decisões estratégicas;
- Reduzir subjetividade gerencial.

No contexto metalúrgico, os Indicadores Barreto permitem:

- Priorização de investimentos;
- Justificativa técnica para CAPEX em SST e meio ambiente;
- Comunicação clara com *stakeholders* e investidores.

Portanto, a adoção dos Indicadores Barreto + KPIs ESG, ancorados na ISO 31000 (ABNT, 2018), transforma o SGI em um sistema inteligente de gestão de riscos e desempenho, alinhado às normas internacionais e às exigências contemporâneas de ESG.

6.5. IBERO – Índice Barreto de Exposição ao Risco Ocupacional

O indicador sintético da exposição global dos trabalhadores aos riscos ocupacionais possui a seguinte formulação conceitual:

$$IBERO = \Sigma (Ri \times Fi \times Ei) / N$$

Sendo:
Ri: corresponde ao nível de risco (probabilidade × severidade);
Fi: representa a frequência de exposição;
Ei: é descrito como eficácia dos controles;
N: corresponde ao número de postos avaliados.

A interpretação proposta é que valores mais elevados indiquem maior fragilidade do sistema produtivo. Entretanto, para que a fórmula seja matematicamente coerente com essa interpretação, a variável associada aos controles precisa ser operacionalizada como insuficiência ou ineficácia dos controles (ou transformada em escala inversa). Se Ei representar diretamente a eficácia — isto é, quanto maior o valor, melhor o controle — a multiplicação pode produzir interpretação contraditória. Também é necessário definir escalas, pesos, normalização, tratamento de dados ausentes e critérios de agregação. Assim, o IBERO deve ser tratado como proposta conceitual até que seja validado em aplicação empírica.

6.6. Índice de Conformidade Sistêmica

O ICS é proposto como indicador de governança associado à conformidade sistêmica, ao percentual de riscos críticos tratados e à maturidade do SGI. Contudo, o documento-base não apresenta fórmula, variáveis, pesos ou escala de interpretação para esse índice. Assim, este artigo mantém o ICS

como conceito proposto, sem atribuir-lhe uma equação não documentada. Sua operacionalização exige definição de dimensões, critérios de pontuação, fontes de evidência e método de validação.

6.7. Uso gerencial dos indicadores

Os indicadores devem apoiar a antecipação de falhas, a priorização de investimentos e a avaliação da eficácia dos controles. No contexto metalúrgico, podem subsidiar decisões sobre investimentos de capital (CAPEX) em segurança e meio ambiente, manutenção preventiva, adequações de máquinas, melhorias ergonômicas e eficiência energética. Para evitar distorções, os indicadores devem ser interpretados em conjunto, contextualizados por volume de produção e perfil de exposição e submetidos a análise crítica.

7. DISCUSSÃO

A principal contribuição da proposta está em conectar ferramentas que frequentemente são administradas em estruturas separadas. A ISO 31000 (ABNT, 2018) oferece linguagem e processo comuns para a gestão de riscos; as NRs estabelecem requisitos brasileiros específicos de segurança e saúde no trabalho; e as normas ISO de sistemas de gestão organizam práticas de qualidade, meio ambiente e SST. A integração pode reduzir duplicidades e ampliar a capacidade de identificar interdependências entre riscos.

A integração, entretanto, não significa substituir avaliações técnicas específicas por uma única matriz ou indicador agregado. Riscos de máquinas, eletricidade, ergonomia e exposição a agentes ambientais exigem métodos e profissionais competentes, além do cumprimento dos requisitos legais aplicáveis. Da mesma forma, a certificação em normas ISO não substitui a obrigação de cumprir a legislação brasileira.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração das Normas Regulamentadoras NR-01, NR-10, NR-12 e NR-17 com as normas ISO 31000, ISO 45001, ISO 9001 e ISO 14001 constitui uma alternativa estruturada para fortalecer a gestão de riscos em processos metalúrgicos. Ao articular segurança e saúde no trabalho, qualidade, meio ambiente e governança, o SGI pode contribuir para a prevenção de acidentes, a melhoria dos processos, a conformidade legal e o desempenho ESG.

A efetividade da proposta depende do comprometimento da alta direção, da participação dos trabalhadores, da qualidade das avaliações técnicas, da atualização normativa e do monitoramento contínuo. Os indicadores IBERO e ICS podem compor o modelo de gestão, mas requerem maior detalhamento metodológico e validação antes de serem utilizados como medidas consolidadas de desempenho ou como base exclusiva para decisões.

Como continuidade, recomenda-se aplicar a metodologia em uma unidade metalúrgica, testar

a matriz integrada, estabelecer linhas de base dos indicadores e avaliar os resultados ao longo de ciclos sucessivos de melhoria. Essa etapa permitirá verificar a utilidade prática do modelo e ajustar suas métricas às características do processo produtivo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 31000**: Gestão de riscos — Diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BARRETO, J. C. N. **As Ferramentas da Qualidade e seu uso no Gerenciamento Ambiental da Indústria no Polo Sidero-petroquímico de Cubatão**. 2000. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) - Universidade de São Paulo, 2000.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 1 (NR-01)**: Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-1. Acesso em: 1 nov. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 10 (NR-10)**: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-10-nr-10. Acesso em: 1 nov. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 12 (NR-12)**: Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/normas-regulamentadoras-nrs. Acesso em: 1 nov. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 17 (NR-17)**: Ergonomia. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/normas-regulamentadoras-nrs. Acesso em: 1 nov. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 45001:2018**: Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: ISO, 2018. Disponível em: https://www.iso.org/standard/63787.html. Acesso em: 1 nov. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9001:2026**: Quality management systems — Requirements. Geneva: ISO, 2026. Consultar catálogo oficial da ISO: https://www.iso.org/. Acesso em: 1 nov. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14001:2026**: Environmental management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: ISO, 2026. Disponível em:

https://www.iso.org/standard/14001. Acesso em: 1 nov. 2026.

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO CLIMÁTICA DE BAIXO CUSTO BASEADA EM ARDUINO E IoT PARA IRRIGAÇÃO AUTOMÁTICA

SOUZA, Pablo Augusto Alves de, UNIUBE – Uberaba/MG, pablo.agst2614@gmail.com
OLIVEIRA, Otávio de Souza, UNIUBE – Uberaba/MG, tavio12326@gmail.com
RIBEIRO, Aline Alves, UNIUBE – Uberaba/MG, aline.ribeiro@uniube.br
ASSIS, Leonardo Campos de, UNIUBE – Uberaba/MG, leonardo.assis@uniube.br
GOULART, Cleiton Silvano, UNIUBE – Uberaba/MG, cleiton.silvano@uniube.br
SILVA, Leandro Aureliano da, UNIUBE – Uberaba/MG, leandro.silva@uniube.br

RESUMO

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um protótipo para aquisição de dados ambientais e irrigação automática em pequenas estufas. A solução integra Arduino Uno, sensor AHT10 para temperatura e umidade relativa do ar, sensor capacitivo para o solo, módulo relé e uma aplicação Python com Flask e Socket.IO. A interface reúne as informações recebidas pela comunicação serial, atualiza o painel e registra as leituras com data e hora. A Figura 3 mostra a sequência de dados produzida pelo sistema, evidenciando o funcionamento da aquisição e do armazenamento. Nos testes relatados pelos autores, a bomba foi acionada quando o índice de umidade do solo ficou abaixo de 45% e desligada quando superou 70%, seguindo a lógica ilustrada na Figura 2. A solução pode auxiliar o acompanhamento de hortaliças, ervas e mudas em pequenas estufas instaladas em casas e apartamentos.

Palavras-chave: Irrigação automatizada; Monitoramento ambiental; Arduino; Internet das Coisas (IoT); Agricultura de precisão.

1. INTRODUÇÃO

Sensores conectados a sistemas embarcados permitem acompanhar variáveis ambientais e apoiar decisões de manejo. Na agricultura, a Internet das Coisas oferece caminhos para reunir medições, comunicação e atuação automática em uma mesma solução (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010; TZOUNIS et al., 2017). O desafio é construir sistemas acessíveis e suficientemente bem documentados para que seus resultados possam ser reproduzidos e avaliados.

A literatura sobre Internet das Coisas (IoT) oferece tanto modelos gerais quanto aplicações agrícolas específicas. Gubbi et al. (2013) descrevem a integração de aquisição, comunicação e processamento em sistemas IoT. Tzounis et al. (2017), em revisão sobre agricultura, analisam o emprego dessas tecnologias no monitoramento e na tomada de decisão, assim como barreiras para sua adoção. Esses trabalhos situam a arquitetura deste estudo, mas não avaliam o desempenho da montagem aqui

apresentada.

No controle da irrigação, Goap et al. (2018) desenvolveram um sistema baseado em IoT, tecnologias abertas e aprendizado de máquina para apoiar decisões com dados ambientais. Hilal et al. (2022) estudaram um sistema com Arduino e sensores ambientais para controlar parâmetros de uma estufa e compararam medições com métodos convencionais. A presente proposta é mais simples quanto à decisão: usa limiares de um índice obtido com o sensor de solo e histerese para acionar uma bomba. Essa escolha facilita a implementação e a explicação do algoritmo, mas não dispensa a comparação experimental com instrumentos de referência.

A confiabilidade do índice de umidade do solo depende da calibração. Okasha et al. (2021) projetaram e calibraram um sensor capacitivo de baixo custo integrado a uma unidade de monitoramento para irrigação em estufa, mostrando a importância de relacionar sua saída elétrica ao teor de água no solo estudado. Adla et al. (2020) avaliaram em laboratório os sensores capacitivos e resistivos de baixo custo e demonstraram que o desempenho dos dispositivos capacitivos melhora após calibração específica para o solo. Mais recentemente, Abdelmoneim et al. (2025) investigaram a calibração de um sensor capacitivo comercial para manejo da irrigação. Em conjunto, esses estudos indicam por que converter duas leituras extremas em uma escala de 0 a 100% exige uma calibração contextualizada para interpretar corretamente o índice do presente protótipo.

Quanto à apresentação das medições, Pimentel e Nickerson (2012) examinaram o uso de WebSocket na comunicação de dados em tempo real. Seu estudo fundamenta a escolha de uma interface com atualização contínua, mas seus tempos de transmissão não podem ser transferidos para o servidor Flask e Socket.IO empregado aqui. A contribuição pretendida neste artigo consiste em reunir aquisição do microclima, índice do solo, decisão de irrigação, painel e alertas em um protótipo de baixo custo, com fluxo de controle explicitado por um diagrama. Essa integração e sua utilidade precisam ser avaliadas com dados próprios de calibração, operação e custo.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma estação para medir temperatura e umidade relativa do ar com um AHT10 e estimar a umidade do solo com um sensor capacitivo. O Arduino Uno coleta as leituras e comanda um relé; um servidor local em Python disponibiliza as informações em um painel web. A solução também prevê alertas e acionamento da irrigação. O objetivo é descrever a integração entre hardware e software, explicitar a lógica de controle por meio de fluxograma e examinar o alcance das evidências experimentais apresentadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Monitoramento e irrigação

A qualidade das medições depende da seleção, instalação e calibração dos instrumentos, bem como das condições em que são utilizados (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2018). Em aplicações agrícolas, sensores e redes de comunicação podem auxiliar o acompanhamento das

condições locais e o controle de irrigação, embora seu desempenho dependa do cultivo, do solo e da estratégia de manejo (GOAP et al., 2018; TZOUNIS et al., 2017). O AHT10 mede propriedades do ar; a umidade do solo requer um sensor separado.

2.2. Arquitetura de comunicação

A arquitetura da Internet das Coisas combina dispositivos de aquisição, comunicação e serviços de processamento e apresentação (GUBBI et al., 2013). Processar dados em um servidor próximo ao protótipo é compatível com a abordagem de computação de borda descrita por Shi et al. (2016). O Socket.IO (SOCKET.IO, 2026) permite comunicação bidirecional e pode utilizar WebSocket, mas sua latência depende da implementação e da rede. Pimentel e Nickerson (2012) compararam WebSocket e consultas HTTP em outro contexto; seus resultados não constituem uma medição deste protótipo.

2.3. Componentes

O Arduino Uno Rev3 emprega o ATmega328P, com clock de 16 MHz, memória flash de 32 KB, SRAM de 2 KB e EEPROM de 1 KB; dispõe de entradas analógicas e interface I²C nos pinos A4 e A5 (ARDUINO, s.d.). O AHT10 fornece leituras de temperatura e umidade relativa do ar por I²C (ADAFRUIT, s.d.). O sensor capacitivo de solo entrega um sinal analógico que deve ser interpretado mediante calibração para o solo e a montagem utilizados. Uma conversão linear entre dois pontos de leitura não equivale, por si só, à determinação da umidade volumétrica do solo.

O relé permite comandar uma carga externa, desde que as características elétricas do módulo, da bomba e da alimentação sejam compatíveis. O isolamento entre controle e carga deve ser verificado no circuito efetivamente montado; a simples presença de um relé ou optoacoplador no módulo não comprova isolamento completo da instalação.

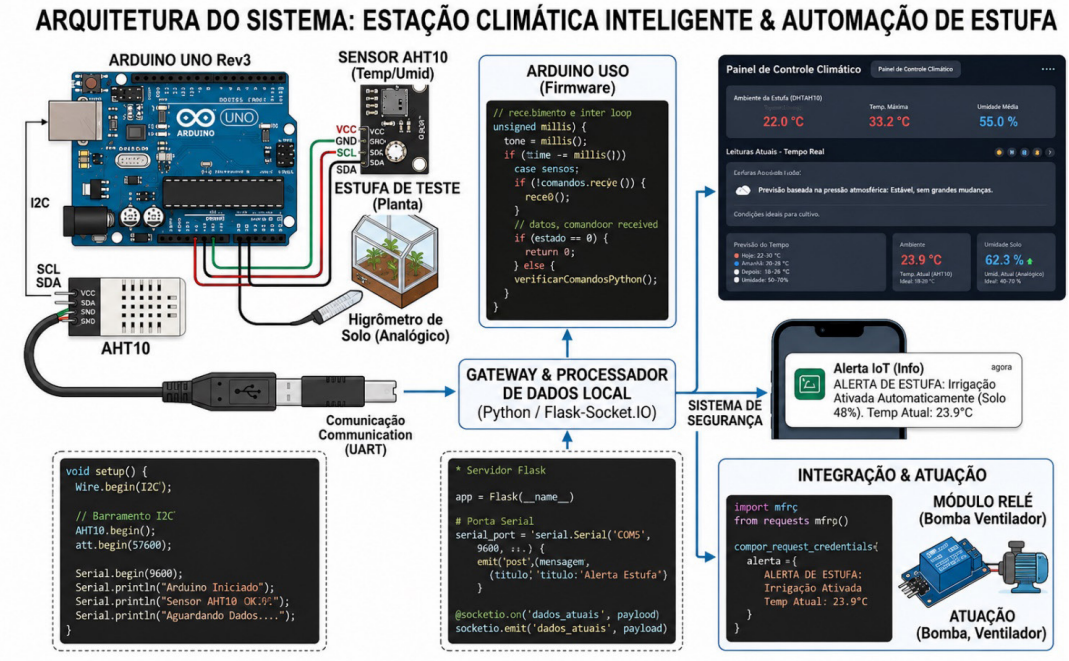
3. METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO

3.1. Arquitetura do sistema

A Figura 1 reúne sensores, Arduino, ligação serial, servidor local, painel e atuador. Trata-se de um esquema da arquitetura utilizada neste trabalho, na qual os valores obtidos são apresentados e mostrados no painel. Estes valores são também armazenados.

Na camada de aquisição, o AHT10 mede temperatura e umidade do ar, e o sensor capacitivo fornece a leitura associada à umidade do solo. O Arduino processa as entradas e envia os registros pela porta serial. No servidor, o painel organiza as leituras, armazena registros e pode gerar alertas. O relé integra o circuito de acionamento da bomba. A Figura 1 sintetiza essas conexões, mas não substitui um diagrama elétrico com alimentação, aterramento, proteção da carga e especificação dos componentes.

Figura 01: Esquema funcional do protótipo de monitoramento e controle.



Fonte: elaboração própria (2025).

3.2. Hardware e calibração

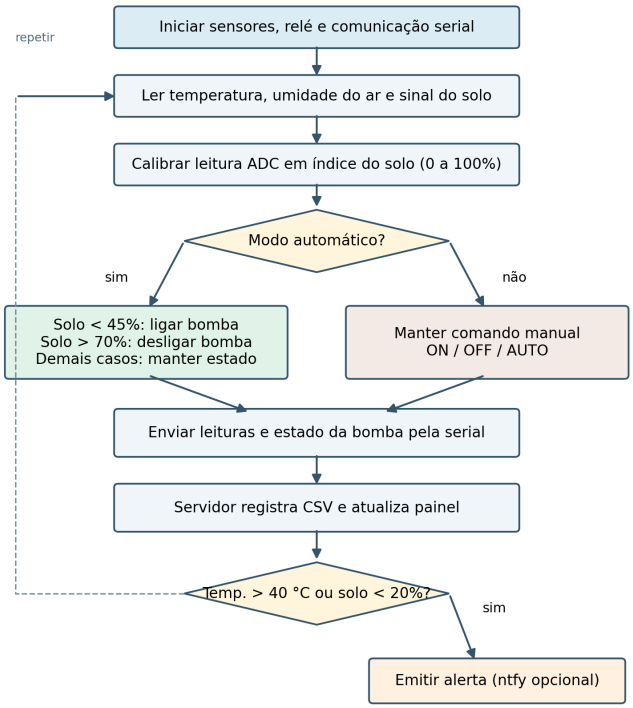
No arranjo descrito, o AHT10 foi ligado ao barramento I²C nos pinos A4 e A5 do Arduino Uno; o sensor de solo foi conectado à entrada A0, e o módulo de acionamento, ao pino digital 8. Foi realizada uma calibração por leitura de solo seco e saturado para mapear a saída analógica em uma escala percentual.

3.3. Firmware e controle

A Figura 2 apresenta o algoritmo empregado no protótipo. Após a inicialização, o Arduino lê o AHT10 e o sensor capacitivo de solo, converte a leitura analógica em um índice percentual e envia as informações pela porta serial ao servidor.

No modo automático, o comando da bomba depende dos limiares de umidade: abaixo de 45%, o relé aciona a bomba; acima de 70%, ocorre o desligamento. Entre esses valores, mantém-se o estado anterior, evitando alternâncias repetidas, estratégia usual no controle de sistemas embarcados (LEE; SESHIA, 2017). O servidor Python recebe as leituras, grava o histórico e atualiza a interface web. O fluxograma mostra a sequência dessas operações e os pontos em que o algoritmo toma decisões.

Figura 02: Fluxograma do algoritmo de aquisição, controle da irrigação, registro e alerta.



Fonte: elaboração própria (2025).

A diferença entre os limiares de 45% e 70% cria uma faixa de histerese. Nos testes, a bomba ligou ao atingir o limite inferior e desligou após a leitura ultrapassar o limite superior, conforme a decisão representada na Figura 2. O intervalo configurado entre comutações contribui para evitar acionamentos sucessivos. Os limiares podem ser ajustados de acordo com as necessidades do cultivo e com a calibração do sensor de solo.

3.4. Servidor e registros

O desenvolvimento da aplicação em Python ampliou a utilidade do protótipo ao reunir, em uma interface, as informações adquiridas pelo Arduino. O servidor recebe os pacotes pela comunicação serial, registra os valores com data e hora e usa Flask (FLASK, s.d.) e Socket.IO (SOCKET.IO, s.d.) para atualizar o painel sem recarregar a página. Assim, o usuário acompanha as condições da estufa em um computador conectado ao sistema e pode consultar o histórico das leituras. A Figura 2 situa essa etapa de recepção, registro e apresentação após a aquisição realizada pelo microcontrolador.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta linhas sucessivas do arquivo gerado pelo sistema, com carimbo de data e hora e valores ambientais. A continuidade dos registros durante o intervalo exibido indica que o Arduino transmitiu leituras e que a aplicação Python recebeu e armazenou essas informações. O arquivo constitui um histórico para acompanhamento das condições da estufa, enquanto o painel oferece sua visualização imediata.

Figura 03: Trecho do arquivo de leituras gerado pelo protótipo.



Fonte: registro do protótipo (2025).

Além da aquisição registrada na Figura 3, os testes mostraram o funcionamento do controle automático: quando o índice de umidade do solo chegou ao limiar inferior de 45%, a bomba foi ligada; quando ultrapassou o limiar superior de 70%, foi desligada. A Figura 2 ilustra a lógica responsável por essa resposta. O registro histórico e a interface em Python permitem acompanhar as condições que orientam a irrigação e consultar as leituras anteriores. Em uma pequena estufa doméstica, essa combinação pode facilitar o cuidado cotidiano com vasos, hortaliças, ervas e mudas, especialmente quando não é possível observar continuamente o substrato.

A Figura 1 identifica os componentes do protótipo; a Figura 2 mostra a lógica de aquisição e controle; e a Figura 3 apresenta os registros obtidos. Esses elementos, associados aos testes de acionamento relatados, demonstram o funcionamento integrado da coleta de dados, da interface e da resposta automática da bomba nas condições descritas. A aplicação em casas e apartamentos requer uma montagem compacta, proteção dos componentes contra água e uma alimentação adequada à bomba e ao circuito de controle, o que justifica a confecção desse protótipo que ficou por volta de R$ 170,00 (cento e setenta reais).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O protótipo reuniu aquisição de dados ambientais, registro e controle de irrigação. A Figura 3 mostra as leituras armazenadas com data e hora, e a interface desenvolvida em Python facilita sua consulta. Nos testes relatados, a bomba ligou e desligou automaticamente nos limiares de umidade definidos, cuja lógica está ilustrada na Figura 2. Dessa forma, o sistema apresenta uma aplicação possível para pequenas estufas em casas e apartamentos, onde o acompanhamento das condições do ar e do substrato pode apoiar o cuidado com as plantas.

Como continuidade do trabalho, recomenda-se documentar a duração e as condições dos testes, ampliar o período de observação e verificar a operação do conjunto em diferentes tipos de substrato. Para uso doméstico, a instalação também deve considerar a segurança elétrica e hidráulica e a proteção dos componentes contra umidade.

REFERÊNCIAS

ABDELMONEIM, A. A. et al. Calibration of low-cost capacitive soil moisture sensors for irrigation management applications. **Sensors**, v. 25, n. 2, art. 343, 2025. DOI: 10.3390/s25020343.

ADAFRUIT. **Adafruit AHT10 temperature and humidity sensor.** Disponível em: https://learn.adafruit.com/adafruit-aht10-temperature-humidity-sensor. Acesso em: 23 set. 2026.

ADLA, S. et al. Laboratory calibration and performance evaluation of low-cost capacitive and very low-cost resistive soil moisture sensors. **Sensors**, v. 20, n. 2, art. 363, 2020. DOI: 10.3390/s20020363.

ARDUINO. **Arduino UNO Rev3.** Disponível em: https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3. Acesso em: 23 set. 2026.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. **The Internet of Things:** a survey. Computer Networks, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.

FLASK. **Flask documentation.** Disponível em: https://flask.palletsprojects.com/. Acesso em: 23 set. 2026.

GOAP, A. et al. An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, p. 41–49, 2018. DOI: 10.1016/j.compag.2018.09.040.

GUBBI, J. et al. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013. DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010.

HILAL, Y. Y.; KHESSRO, M. K.; VAN DAM, J.; MAHDI, K. Automatic water control system and environment sensors in a greenhouse**. Water**, v. 14, n. 7, art. 1166, 2022. DOI: 10.3390/w14071166.

LEE, E. A.; SESHIA, S. A. **Introduction to Embedded Systems:** A Cyber-Physical Systems Approach. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 2017.

OKASHA, A. M. et al. Designing low-cost capacitive-based soil moisture sensor and smart monitoring unit operated by solar cells for greenhouse irrigation management. **Sensors**, v. 21, n. 16, art. 5387, 2021. DOI: 10.3390/s21165387.

PIMENTEL, V.; NICKERSON, B. G. Communicating and displaying real-time data with WebSocket. **IEEE Internet Computing**, v. 16, n. 4, p. 45–53, 2012. DOI: 10.1109/MIC.2012.64.

SHI, W. et al. Edge computing: vision and challenges. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 3, n. 5, p. 637–646, 2016. DOI: 10.1109/JIOT.2016.2579198.

SOCKET.IO. **Socket.IO documentation**. Disponível em: https://socket.io/docs/v4/. Acesso em: 23 set. 2026.

TZOUNIS, A. et al. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. **Biosystems Engineering**, v. 164, p. 31–48, 2017. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Instruments and Methods of Observation**. WMO-No. 8. Geneva: WMO, 2018.

USO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA NO CULTIVO HIDROPÔNICO

SANTOS, Mateus Rodrigo dos, UNIUBE – Uberaba/MG, rodrigo.ms78751@gmail.com
LUCAS, Marcelo, UNIUBE – Uberaba/MG, marcelo.lucas@uniube.br
RIBEIRO, Aline Alves, UNIUBE – Uberaba/MG, aline.ribeiro@uniube.br
SOUSA, Lidiana Mendes, UNIUBE – Uberaba/MG, lidiana.sousa@uniube.br
ELIAS, Marcelo Eustáquio Pereira, UNIUBE – Uberaba/MG, marcelo.elias@uniube.br
SILVA, Leandro Aureliano da, UNIUBE – Uberaba/MG, leandro.silva@uniube.br

RESUMO

Este artigo analisa as possibilidades de integração das fontes de energia solar fotovoltaica, eólica e de biomassa ao cultivo hidropônico, considerando requisitos de operação, viabilidade econômica e implicações ambientais. Adota-se uma revisão narrativa, de abordagem qualitativa, apoiada em publicações sobre hidroponia, conversão fotovoltaica, automação e geração renovável. A análise diferencia os fundamentos descritos nas fontes das aplicações propostas para os sistemas hidropônicos. A geração fotovoltaica constitui uma alternativa a ser avaliada conforme a disponibilidade de radiação e o perfil de consumo. A geração eólica depende da caracterização do vento no local, enquanto a biomassa requer disponibilidade regular de matéria-prima e infraestrutura de conversão. Não se estabelecem percentuais gerais de economia, autonomia ou prazos de retorno, pois não foi realizado dimensionamento de uma instalação específica. Conclui-se que a escolha deve conciliar demanda energética, recursos locais, custos ao longo da vida útil e continuidade do fornecimento, com atenção às cargas essenciais ao cultivo.

Palavras-chave: hidroponia; energia solar fotovoltaica; energia eólica; biomassa; sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A hidroponia compreende técnicas de cultivo sem solo nas quais os nutrientes são fornecidos por uma solução nutritiva. Seu funcionamento depende do manejo adequado da nutrição vegetal e das condições de cultivo, conforme discutem Bezerra Neto e Barreto (2011/2012). A adoção dessa técnica permite organizar a produção em ambientes protegidos, mas exige planejamento dos recursos necessários à operação.

Nos sistemas que utilizam bombeamento, a energia elétrica participa da circulação da solução nutritiva e do acionamento dos dispositivos de controle. Iluminação artificial e climatização também podem integrar a instalação, conforme o projeto. Por isso, não é adequado atribuir a todos os cultivos hidropônicos o mesmo nível de consumo: a demanda deve ser caracterizada para cada configuração.

A integração de fontes renováveis interessa tanto à gestão dos custos quanto à continuidade operacional. Entretanto, substituir parte da eletricidade adquirida não significa, por si só, reduzir o consumo energético do cultivo. A eficiência deve ser analisada separadamente da origem da energia, considerando o desempenho dos equipamentos e as condições de produção.

Diante desse contexto, formula-se a seguinte questão: quais condições favorecem a integração das energias solar fotovoltaica, eólica e de biomassa aos sistemas hidropônicos? O objetivo geral é analisar suas possibilidades de aplicação e suas limitações. Especificamente, busca-se identificar requisitos técnicos, discutir fatores econômicos e ambientais e comparar condições de uso, sem pressupor uma tecnologia universalmente superior.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Cultivo hidropônico e requisitos operacionais

Bezerra Neto e Barreto (2011/2012) descrevem diferentes técnicas de hidroponia, dentre elas a técnica do filme de nutrientes, conhecida como NFT. Nessa configuração, a solução percorre os canais de cultivo e retorna ao reservatório. A definição dos equipamentos deve acompanhar o tipo de sistema, a cultura e o manejo adotado.

O trabalho de Silva et al. (2018) aborda a automação do cultivo e o monitoramento de pH, temperatura e condutividade da água. Essa contribuição fundamenta a discussão sobre instrumentação, mas não constitui evidência de percentuais de economia obtidos com geração renovável. No planejamento energético, os dispositivos de medição e controle devem ser considerados junto aos demais equipamentos elétricos.

Menegaes et al. (2015) apresentam uma experiência de cultivo hidropônico com aproveitamento de água da chuva. O estudo contribui para a discussão da gestão hídrica, sem demonstrar, por esse motivo, a viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos ou eólicos. A sustentabilidade do cultivo deve reunir a análise de água, nutrientes, energia e resíduos.

2.2. Fontes renováveis e integração energética

Lima et al. (2020) apresentam os fundamentos físicos da conversão fotovoltaica, em que dispositivos semicondutores convertem a radiação incidente em eletricidade. Lopes (2013) dedica seu trabalho ao efeito do sombreamento nos painéis fotovoltaicos. Esses referenciais delimitam questões da tecnologia solar; a aplicação ao cultivo requer avaliação adicional da instalação e do perfil de demanda.

Para a geração eólica de pequeno porte, o *Department of Energy* dos Estados Unidos destaca a necessidade de avaliar o recurso eólico, o consumo e a economia do empreendimento (UNITED STATES, 2013). Assim, a presença de vento percebida no terreno não substitui a caracterização do recurso disponível para o aerogerador.

A biomassa pode fornecer calor ou ser convertida em combustíveis e eletricidade por diferentes processos. Entre as matérias-primas estão resíduos agrícolas e outros materiais orgânicos (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2026). A escolha da rota de conversão precisa distinguir demanda térmica de demanda elétrica e verificar a disponibilidade do insumo.

3. METODOLOGIA

O estudo caracteriza-se como uma revisão narrativa, de abordagem qualitativa e finalidade exploratória. O conjunto documental compreende os cinco trabalhos indicados na bibliografia de partida, relacionados à hidroponia, à automação, à conversão fotovoltaica e ao sombreamento, complementados por documentos institucionais sobre geração eólica e biomassa. Não se trata de revisão sistemática ou de levantamento exaustivo da produção científica.

A análise organiza as informações em quatro dimensões: requisitos de operação, disponibilidade do recurso energético, fatores de viabilidade econômica e implicações ambientais. As contribuições de cada fonte são empregadas de acordo com seu objeto de estudo. A discussão das aplicações ao cultivo hidropônico constitui uma síntese qualitativa e não um resultado experimental de uma unidade produtiva.

Não foram realizados ensaios de campo, medições de consumo, simulações de geração ou cálculos de retorno financeiro. Consequentemente, não são estimados percentuais de autonomia ou economia. A comparação permite identificar critérios de decisão e lacunas que deverão ser examinadas em estudos de dimensionamento, sem estabelecer uma classificação quantitativa entre as tecnologias.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Energia solar fotovoltaica

A conversão direta da radiação em eletricidade oferece uma possibilidade de abastecimento dos equipamentos do cultivo. Entretanto, os fundamentos apresentados por Lima et al. (2020) não autorizam inferir um percentual de atendimento da demanda de uma estufa específica. Como interpretação aplicada, propõe-se que a avaliação comece pelo levantamento dos equipamentos, das potências e dos períodos de funcionamento.

O posicionamento dos módulos também precisa ser compatível com o uso agrícola da área. O tema do sombreamento abordado por Lopes (2013) reforça a pertinência de examinar obstáculos e condições de instalação. No caso de estruturas associadas a estufas, a análise de projeto deve considerar ainda a luz disponível às plantas, evitando tratar a cobertura fotovoltaica como uma solução automaticamente adequada.

A estimativa econômica deverá incluir aquisição, instalação, manutenção e eventual substituição de componentes. O uso de armazenamento exige contabilizar também seus custos e suas limitações operacionais. Sem orçamento, perfil de consumo e previsão de geração, não é possível estabelecer um

prazo de retorno comum aos produtores ou garantir uma redução fixa da despesa com eletricidade.

4.2. Energia eólica

A fonte eólica deve ser examinada a partir da disponibilidade local do vento. O guia do *Department of Energy* relaciona a decisão de instalação às características do recurso, às necessidades de energia e à análise econômica (UNITED STATES, 2013). Para a hidroponia, esses critérios podem orientar a comparação com a alternativa solar, sem presumir equivalência de desempenho entre propriedades.

A geração em horários sem radiação solar pode favorecer uma combinação de fontes quando houver vento disponível. Essa possibilidade, contudo, não garante fornecimento contínuo. A complementaridade deve ser demonstrada por séries temporais de geração e consumo, incluindo períodos de baixa disponibilidade de ambos os recursos. Trata-se de uma recomendação de avaliação, e não de um desempenho medido neste estudo.

Na análise de implantação, recomenda-se verificar espaço, condições de montagem, acesso para manutenção e compatibilidade com o entorno. O dimensionamento deve considerar as características do equipamento escolhido. A classificação genérica da geração eólica como responsável por uma parcela fixa da demanda hidropônica não é sustentada pelo conjunto documental examinado.

4.3. Biomassa

A literatura institucional identifica a combustão, a conversão termoquímica e os processos biológicos entre as rotas de aproveitamento energético da biomassa (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2026). Para a aplicação proposta, é necessário definir qual produto energético será utilizado e se haverá demanda compatível para eletricidade, calor ou ambos.

A disponibilidade de resíduos, isoladamente, não demonstra viabilidade. Como critérios de projeto, devem ser levantados quantidade, regularidade, características do material, logística de transporte e armazenamento e exigências do processo de conversão. Não se pode presumir que os resíduos do próprio cultivo sejam suficientes para manter uma unidade geradora.

A queima de biomassa libera dióxido de carbono e pode produzir poluentes atmosféricos. A avaliação ambiental deve considerar o tipo de matéria-prima e o processo de uso, pois o caráter renovável não elimina todos os impactos (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, [2026?]). Portanto, a comparação com outras fontes exige delimitar o sistema avaliado e os procedimentos de controle ambiental.

4.4. Comparação e critérios de decisão

O Quadro 1 apresenta uma síntese qualitativa dos critérios discutidos. As condições propostas devem ser verificadas no projeto de cada unidade produtiva, considerando os recursos disponíveis e os

requisitos de operação do cultivo.

Quadro 01: Critérios para avaliar fontes renováveis no cultivo hidropônico

Fonte	Condição principal	Aspectos econômicos	Limitações a avaliar
Solar fotovoltaica	Radiação e área compatíveis com a instalação.	Investimento, manutenção e eventual armazenamento.	Variação da geração e sombreamento.
Eólica	Recurso eólico adequado no local.	Instalação, infraestrutura e manutenção.	Variabilidade do vento e compatibilidade com o entorno.
Biomassa	Matéria-prima regular e rota de conversão definida.	Logística do insumo e operação da unidade.	Emissões e compatibilidade entre geração térmica e elétrica.

Fonte: elaboração dos autores, com base em Lima et al. (2020), United States (2013) e U.S. Energy Information Administration (2026; [2026?]).

A comparação indica que a decisão deve partir do sistema produtivo e dos recursos disponíveis. Nenhuma das fontes pode ser considerada a mais eficiente ou econômica em todos os contextos. A conclusão aplicável a esta revisão é a necessidade de combinar critérios técnicos, econômicos e ambientais antes de escolher a configuração energética.

A continuidade do fornecimento deve receber atenção específica. Recomenda-se identificar as cargas essenciais e definir como serão atendidas em condições desfavoráveis de geração. A combinação de fontes, o armazenamento e outras formas de apoio podem ser avaliados, mas sua contribuição à confiabilidade depende do dimensionamento e da estratégia operacional.

Outra distinção necessária é entre economia financeira, autonomia energética e eficiência. Reduzir a compra de eletricidade não comprova menor consumo por unidade produzida. Para estudos futuros, recomenda-se acompanhar o consumo em relação à produção comercializável, registrar interrupções e contabilizar os custos durante a vida útil dos equipamentos. Esses indicadores não foram medidos nesta pesquisa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração de fontes renováveis ao cultivo hidropônico deve ser orientada pelas condições da unidade produtiva. A geração fotovoltaica requer compatibilidade entre disponibilidade solar, área e consumo; a eólica depende da caracterização do vento; e a biomassa exige oferta regular de matéria-prima e infraestrutura de conversão apropriada. A combinação dessas alternativas pode ser investigada sem presumir autonomia integral.

O objetivo de discutir possibilidades e limitações foi atendido no âmbito de uma revisão qualitativa. A ausência de medições e de dimensionamento impede concluir sobre percentuais de economia,

retorno financeiro ou superioridade universal de uma fonte. Os benefícios precisam ser demonstrados por avaliação específica, incluindo continuidade operacional e impactos ambientais.

Recomenda-se que pesquisas futuras realizem estudos de caso com levantamento das cargas, dados locais dos recursos energéticos, simulação temporal e análise dos custos ao longo da vida útil. A articulação dessas informações com os requisitos agronômicos permitirá verificar quais configurações oferecem condições adequadas de operação e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

BEZERRA NETO, Egídio; BARRETO, Levy Paes. As técnicas de hidroponia. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, Recife, v. 8/9, p. 107–137, 2011/2012. Disponível em: https://www.journals.ufrpe.br/index.php/apca/article/download/152/141/0. Acesso em: 16 out. 2026.

LIMA, Ariane A. et al. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, e20190191, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0191. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbef/a/zmFYrhnnhLQ8dMHk7CDmSfs/. Acesso em: 16 out. 2026.

LOPES, Ricardo Jorge Cabral. **Efeito do sombreamento nos painéis fotovoltaicos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: https://repositorio.ipl.pt/bitstreams/9865d0b1-cb1b-48a5-9ecd-cd9c2f70426d/download. Acesso em: 16 out. 2026.

MENEGAES, Janine Farias; FILIPETTO, Jorge Eugênio; RODRIGUES, Andrielle Magrini; SANTOS, Osmar Souza dos. Produção sustentável de alimentos em cultivo hidropônico. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 14, n. 3, p. 102–108, 2015. DOI: https://doi.org/10.5902/2236130818750. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/18750. Acesso em: 16 out. 2026.

SILVA, Francivaldo Balbino da; ARAÚJO, Artur Torres de; BARBOSA, Neílton Carlos; SOUSA, Moises Hamsses Sales de. Controle automatizado da água no cultivo hidropônico. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 3., 2018. **Anais [...]**. Campina Grande: Realize Editora, 2018. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2018/TRABALHO_EV107_MD1_SA28_ID193_28052018202925.pdf. Acesso em: 16 out. 2026.

UNITED STATES. Department of Energy. **Small wind electric systems: a U.S. consumer's guide**. [S. l.]: Department of Energy, 2013. Disponível em: https://www.energy.gov/cmei/systems/articles/small-wind-electric-systems-us-consumers-guide. Acesso em: 16 out. 2026.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Biomass and the environment**. [S. l.]: EIA, [2026?]. Disponível em: https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/biomass-and-the-environment.php. Acesso em: 16 out. 2026.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Biomass explained**. [S. l.]: EIA, 2026. Disponível em: https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/index.php. Acesso em: 16 out. 2026.

ANÁLISE DA ADEQUAÇÃO DE MÁQUINA DE GRAVAÇÃO A LASER ÀS EXIGÊNCIAS DAS NR 10 E NR 12

SILVA, Elias Reis da, UNIUBE – Uberaba/MG, eliasreis_2007@hotmail.com
LUCAS, Marcelo, UNIUBE – Uberaba/MG, marcelo.lucas@uniube.br
ELIAS, Marcelo Eustáquio Pereira, UNIUBE – Uberaba/MG, marcelo.elias@uniube.br
GOULART, Cleiton Silvano, UNIUBE – Uberaba/MG, cleiton.goulart@uniube.br
RIBEIRO, Aline Alves, UNIUBE – Uberaba/MG, aline.ribeiro@uniube.br
SILVA, Leandro Aureliano da, UNIUBE – Uberaba/MG, leandro.silva@uniube.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o diagnóstico e uma proposta de adequação de uma máquina de gravação a laser, com base nas NR 10 e NR 12, no recorte de 2025. A análise documental organizou os perigos ópticos, mecânicos e elétricos, e verificou a consistência das planilhas HRN. Os índices disponíveis não foram utilizados para comprovar a redução do risco, devido à ausência de justificativas para os fatores. A proposta prioriza contenção óptica, acesso intertravado e controle das energias perigosas, com critérios de verificação. O planejamento conserva 60 (sessenta) dias e a provisão histórica de R$ 25.000,00 (vinte e cinco mil reais). A comprovação da condição final requer execução e validação das medidas.

Palavras-chave: gravação a laser; segurança em máquinas; NR 10; NR 12; apreciação de riscos.

1. INTRODUÇÃO

A gravação a laser é utilizada na identificação e na rastreabilidade de componentes industriais. O processamento concentra energia sobre a superfície do material para produzir marcações, exigindo controle dos parâmetros de operação. Lima (2005) apresenta aplicações dessa tecnologia na fabricação e destaca sua integração a processos industriais. A precisão do processo, entretanto, não dispensa a avaliação dos perigos associados ao equipamento.

Este estudo examina uma máquina empregada na gravação de códigos em rotores. O diagnóstico descrito identifica deficiências em proteções, comandos, instalações elétricas, sinalização e procedimentos. A análise considera a interação entre operador, máquina e ambiente de trabalho, incluindo atividades de produção e manutenção.

A questão de pesquisa é: como estruturar a adequação da máquina a partir dos perigos identificados e dos requisitos de segurança aplicáveis? O objetivo geral é elaborar um diagnóstico técnico e uma proposta de adequação. Os objetivos específicos são organizar os cenários de perigo, avaliar a consistência da estimativa de risco disponível, definir medidas de proteção e estabelecer critérios para

verificar sua execução e eficácia.

A relevância do trabalho está na organização das evidências e das prioridades de intervenção. A instalação isolada de um dispositivo não comprova a segurança do conjunto. É necessário relacionar cada medida ao perigo que pretende controlar e verificar seu desempenho após a implantação. Nesse sentido, a revisão bibliográfica de Garcia, Jorge e Locastro (2024) contribui para a discussão da prevenção de acidentes com máquinas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Segurança elétrica e segurança em máquinas

A NR 10 estabelece medidas de prevenção para instalações e serviços com eletricidade. Para o recorte temporal do estudo, realizado em 2025, adota-se a redação consolidada em 2019 (BRASIL, 2019). A análise da máquina deve abranger suas condições elétricas e os procedimentos de intervenção, observando as atribuições dos trabalhadores envolvidos.

A NR 12 reúne requisitos relativos à segurança de máquinas e equipamentos, incluindo sistemas de proteção, comandos, manutenção e informações de uso (BRASIL, 2024). As duas normas possuem campos complementares: a avaliação elétrica não substitui a apreciação dos perigos mecânicos e da radiação, assim como as proteções físicas não dispensam a avaliação elétrica.

A definição das medidas deve partir da apreciação de riscos. A ISO 12100:2010 fornece princípios para identificar perigos, estimar riscos e orientar sua redução ao longo do ciclo de vida da máquina (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2010). O resultado deve ser documentado e revisto quando forem alteradas as condições de uso.

2.2. Perigos associados à gravação a laser

A avaliação distingue a emissão laser direta e refletida, o contato com partes móveis e superfícies aquecidas, os perigos elétricos e os contaminantes eventualmente produzidos pelo processamento. Cada cenário relaciona uma fonte de perigo, uma situação de exposição e uma consequência previsível. A mera ausência de um dispositivo comercial não caracteriza, isoladamente, o perigo: é necessário identificar a função de proteção que falta ao processo.

A ISO 11553-1:2020 aborda os perigos da radiação em máquinas de processamento a laser e as informações de segurança a serem fornecidas pelo fabricante (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2020). A classe do produto, o comprimento de onda, a emissão acessível e os modos de operação precisam ser conhecidos antes da especificação das proteções ópticas.

Para este caso, a avaliação das radiações não ionizantes integra o tratamento dos riscos adicionais previstos no capítulo 12.10 da NR 12, em conjunto com as normas específicas de laser (BRASIL, 2024). O projeto deve definir os materiais de contenção e os visores para o comprimento de onda e as

condições de emissão do equipamento. A classificação do produto deve seguir a IEC 60825-1:2014, sem deduzir a classe apenas da potência elétrica informada (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2014).

2.3. Estimativa de risco pelo método HRN

O método HRN combina fatores de exposição, frequência, gravidade da perda e pessoas expostas para apoiar a priorização de intervenções (DRUMOND, 2022). Trata-se de um índice dependente da escala e das premissas adotadas, o qual não determina, por si só, a arquitetura do circuito de segurança nem comprova atendimento normativo.

Adota-se a notação PE para probabilidade de exposição; FE para frequência de exposição; MPL para o fator de gravidade da perda máxima considerada; e NP para o fator associado às pessoas expostas. A escala deve ser única, documentada e aplicada ao mesmo cenário antes e depois da medida. Perigos distintos não devem compartilhar automaticamente a mesma gravidade ou o mesmo grupo de pessoas expostas.

3. METODOLOGIA

O trabalho apresenta um estudo de caso descritivo, apoiado em análise documental e nos registros de inspeção técnica da máquina de gravação de códigos em rotores. São examinados os dados de identificação, as deficiências relatadas, as planilhas HRN, as intervenções descritas e a estimativa preliminar de custos. A comparação normativa respeita o recorte de 2025, utilizando as versões de 2019 da NR 10 e de 2024 da NR 12.

O diagnóstico foi reorganizado por cenários de perigo e funções de proteção, mantendo a rastreabilidade dos sete grupos originalmente levantados. A falta de cortina de luz e de comando bimanual foi tratada como descrição de uma configuração, e não como infração automática. A análise concentrou-se na contenção da emissão, no acesso à zona perigosa, na segurança elétrica e nos procedimentos de operação e manutenção.

A análise tem natureza documental. As referências a instrumentos de medição não foram consideradas resultados de ensaio, pois os registros disponíveis não contêm valores medidos ou protocolos rastreáveis. O escopo compreende diagnóstico, verificação da consistência metodológica e definição das medidas propostas; a validação da máquina é uma etapa posterior de engenharia.

A Equação abaixo foi utilizada para conferir os índices das planilhas. A revisão verificou duas condições para sua utilização técnica: correspondência entre NP e a população efetivamente exposta e compatibilidade de MPL com a consequência de cada cenário. Como essas condições não estão demonstradas, não se atribuem novos índices nem se utilizam os valores anteriores para declarar redução do risco. A avaliação é apresentada por cenários e critérios de aceitação.

$$HRN = PE \times FE \times MPL \times NP$$

Sendo:
HRN: representa o índice de classificação do risco;
PE, FE, MPL e NP: são fatores adimensionais.

Para estimar um índice aplicável à máquina, devem ser documentados a tarefa, o perigo, a consequência, o grupo exposto e a justificativa de cada fator. O índice residual somente será calculado após a execução e a verificação da medida correspondente.

A proposta técnica foi organizada em funções de proteção e critérios de verificação. A análise econômica conserva as provisões do levantamento original, cuja soma foi conferida. O prazo de 60 (sessenta) dias é tratado como referência de planejamento, sem equivaler a prazo de liberação operacional. Não foram estimados retorno financeiro, redução de acidentes ou ganhos de produtividade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização do equipamento

O equipamento é empregado na gravação de códigos em rotores e tem alimentação informada de 220 V e potência declarada de 300 W. Esse valor não foi identificado como potência óptica e, portanto, não foi utilizado para classificar o laser ou dimensionar anteparos. O projeto executivo deverá registrar modelo, número de série, fabricação, características da fonte laser e modos de operação, a partir da placa e da documentação do fabricante.

A Figura 1 reproduz a imagem apresentada para caracterizar a condição inicial. Ela auxilia na compreensão da configuração física, mas não comprova, isoladamente, as condições internas do circuito, o funcionamento dos comandos ou o desempenho das proteções.

Figura 01: Máquina apresentada no diagnóstico inicial.



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

4.2. Diagnóstico e organização das intervenções

O Quadro 1 relaciona os sete grupos do levantamento com as funções de proteção correspondentes. Para a proposta, o controle da emissão e do acesso à zona de processamento constitui o eixo principal; os comandos e os procedimentos são integrados a essa proteção. A arquitetura final depende da apreciação de riscos e das características efetivas da máquina.

Quadro 01: Deficiências relatadas e medidas de adequação

Item	Condição relatada	Medida descrita ou proposta
1	Acesso à zona de processamento sem função de proteção demonstrada.	Priorizar contenção óptica e acesso intertravado; avaliar detecção complementar.
2	Comando bimanual ausente na configuração relatada.	Definir a necessidade pela tarefa; não o utilizar como substituto da contenção óptica.
3	Monitoramento insuficiente, interface de comando e seccionamento sem bloqueio.	Revisar circuito de segurança, proteção elétrica e bloqueio das energias.
4	Ausência de proteções fixas e móveis.	Especificar proteções mecânicas e ópticas e seus intertravamentos.
5	Sinalização e identificação de circuitos insuficientes.	Identificar riscos, restrições de acesso e pontos de intervenção.
6	Ausência de procedimento formal de manutenção.	Estruturar plano, registros e procedimento de bloqueio e etiquetagem.
7	Ausência de procedimento formal de operação.	Definir sequência de uso, resposta a falhas e capacitação.

Fonte: elaboração dos autores a partir dos registros do estudo de caso.

A solução proposta é uma zona de processamento fechada, com proteção óptica e acesso intertravado, associada ao circuito de segurança. A alimentação de peças deve ocorrer com a emissão perigosa inibida. A abertura de um acesso deve impedir a emissão e os movimentos perigosos abrangidos pela função, antes que a pessoa possa alcançar o perigo. O fechamento do acesso e o rearme não devem iniciar automaticamente um novo ciclo.

A cortina de luz poderá ser mantida como proteção complementar se o projeto demonstrar sua utilidade no controle de acesso. Ela não substitui a contenção óptica. O comando bimanual também será condicionado à tarefa e à apreciação de riscos, pois sua ausência não representa uma não conformidade universal. Nenhum desses recursos será considerado proteção suficiente contra a exposição de terceiros à radiação.

Os intertravamentos devem ser selecionados e integrados à função de segurança considerando os princípios da ISO 14119:2024 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2024). O nível de desempenho requerido e o desempenho atingido do sistema de comando deverão ser determinados no projeto conforme a ISO 13849-1:2023, sem inferi-los do HRN (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2023). A especificação óptica permanece vinculada às características de emissão e ao processamento descrito na ISO 11553-1:2020.

4.3. Correção da avaliação de riscos e critérios de validação

A conferência das planilhas confirma que os produtos 5 × 4 × 1 × 1, 10 × 4 × 1 × 1, 1 × 4 × 1 × 1 e 0,02 × 4 × 1 × 1 resultam em 20, 40, 4 e 0,08. Entretanto, todos usam NP = 1, sem caracterização da população exposta, e MPL = 1, mesmo quando são mencionadas consequências graves. Os índices posteriores foram, portanto, excluídos como evidência de eficácia.

O Quadro 2 substitui essa comparação por cenários de perigo e medidas verificáveis.

Quadro 02: Cenários de perigo e medidas técnicas propostas

Cenário	Consequência potencial	Medida de projeto	Prioridade de implantação
Emissão acessível durante o processamento	Lesão ocular ou cutânea por feixe direto ou reflexões.	Conter a emissão; especificar painéis e visores para o laser; intertravar acessos.	Antes de operar o modo com exposição não controlada.
Acesso a movimentos perigosos	Contato, aprisionamento ou esmagamento, conforme a mecânica existente.	Proteger pontos perigosos e impedir acesso antes de cessar o perigo.	Antes da operação do modo afetado.
Contato com circuito ou massa sob falha	Choque elétrico e efeitos térmicos.	Revisar proteção elétrica, isolamento e equipotencialização; verificar a instalação.	Antes da liberação elétrica.
Intervenção com energia disponível	Partida inesperada ou liberação de energia armazenada.	Isolar, bloquear, identificar e verificar a condição segura segundo procedimento.	Antes de cada intervenção abrangida.
Fumaças e produtos do processamento	Exposição a contaminantes e possibilidade de incêndio.	Caracterizar materiais e emissões; definir captação e prevenção conforme avaliação.	Antes de processar materiais não avaliados.
Falha de operação ou manutenção	Exposição por sequência inadequada, burla ou degradação.	Definir modos, instruções, capacitação e plano de manutenção rastreável.	Antes da liberação e durante o uso.

Fonte: elaboração dos autores com base no diagnóstico e nas funções de proteção propostas.

Nota: medidas de projeto; execução e eficácia não demonstradas por ensaios neste estudo.

A aplicação quantitativa futura do HRN deverá definir uma escala consistente, o número real de pessoas expostas e a consequência plausível para cada perigo. A redução de exposição não implica

redução automática da gravidade da lesão. Até que esses dados estejam disponíveis, não se atribui classificação de risco residual. O Quadro 3 estabelece os critérios de verificação da proposta, permitindo avaliar cada medida sem recorrer a números arbitrários.

Quadro 03: Critérios de verificação para a adequação proposta

Função ou medida	Critério de verificação	Registro para aceite
Contenção óptica	Demonstrar controle da emissão acessível nos modos avaliados e compatibilidade dos anteparos e visores.	Identificação da fonte, especificação óptica e avaliação/ensaios aplicáveis.
Acesso intertravado	Verificar inibição e interrupção das funções perigosas antes do acesso e ausência de reinício automático.	Protocolo de teste, avaliação dos tempos e registro dos modos de falha.
Comando de segurança	Definir desempenho requerido e demonstrar a integração e o desempenho da função especificada.	Especificação funcional, diagramas e documentação de validação.
Proteção elétrica	Comprovar adequação dos circuitos e das medidas contra choque e efeitos térmicos.	Diagramas finais, inspeção e resultados dos ensaios pertinentes.
Isolamento das energias	Verificar isolamento, bloqueio e controle das energias armazenadas para a intervenção.	Procedimento aprovado e registro da verificação.
Emissões e uso seguro	Demonstrar adequação ao material processado, ao modo de uso e à formação dos envolvidos.	Avaliação dos agentes, instruções, capacitação e plano de manutenção.

Fonte: elaboração dos autores. Os critérios integram a proposta de validação e não representam ensaios já executados.

4.4. Adequações elétricas e procedimentos

A proposta elétrica compreende revisão dos circuitos de potência e comando, proteção contra contato elétrico, identificação e seccionamento bloqueável. Os diagramas devem corresponder à instalação executada. O bloqueio e a etiquetagem devem abranger as energias perigosas identificadas e a energia armazenada, quando existente; pressionar a parada de emergência não equivale a isolar as fontes de energia.

Para a interface de operação, propõe-se adotar tensão de segurança compatível com os dispositivos e com a proteção contra choque. A solução executiva deve observar o ano de fabricação e as alternativas previstas nos subitens 12.4.13, 12.4.13.1 e 12.4.13.1.1, da NR 12 (BRASIL, 2024). Não se define um valor de alimentação ou uma arquitetura elétrica sem conferir os componentes existentes e as exigências do fabricante.

O procedimento de operação proposto abrange inspeção prévia das proteções, posicionamento da peça com o processo em condição segura, fechamento do acesso, comando deliberado de partida e retirada da peça após o término do ciclo seguro. Falhas de intertravamento ou de contenção devem impedir o uso do modo afetado até a correção. O detalhamento deve ser compatibilizado com a sequência real da máquina e com os modos de ajuste e manutenção.

A desenergização deve observar o procedimento aplicável, com impedimento de reenergização e verificação das condições de segurança. A NR 10 também disciplina qualificação, capacitação e autorização (BRASIL, 2019). O dimensionamento da equipe deve observar a atividade e seu enquadramento, sem generalizar exigências próprias de situações específicas para toda intervenção energizada.

4.5. Planejamento e estimativa de custos

O cronograma proposto distribui 60 (sessenta) dias em três fases: 15 (quinze) dias para levantamento executivo e intervenções elétricas; 30 (trinta) dias para proteções ópticas e mecânicas e integração das funções de segurança; e 15 (quinze) dias para documentação, treinamento e validação. A duração é uma estimativa gerencial. Cada fase depende da conclusão dos requisitos técnicos, e a liberação não ocorre apenas pelo vencimento do prazo.

A Tabela 1 consolida a provisão financeira de R$ 25.000,00 (vinte e cinco mil reais) do levantamento original. Os valores são mantidos como referência histórica, sem atualização de mercado. A verba originalmente agrupada para cortina de luz ou grade é tratada como provisão para controle de acesso, a detalhar segundo a função selecionada; esses dispositivos não são considerados equivalentes. Não se afirma que esse montante cubra todo o projeto.

Tabela 01: Provisões financeiras do levantamento original

Item	Valor estimado (R$)
Revisão e adequação de circuitos	2.000,00
Isolamento de partes energizadas	1.000,00
Dispositivos de parada de emergência	3.000,00
Provisão original para controle de acesso	5.000,00
Sinalização de segurança	500,00
Proteções fixas e móveis	3.000,00
Provisão original para laudo técnico	6.500,00
Manual de operação segura	1.000,00
Capacitação	3.000,00
Total	25.000,00

Fonte: levantamento financeiro do estudo de caso. Valores históricos, sem atualização por cotação. As provisões não comprovam cobertura integral do projeto e não foram redistribuídas como novos preços.

O orçamento executivo deverá discriminar contenção óptica e visores, acessos intertravados,

funções de segurança, adequações elétricas, exaustão quando indicada, projeto e validação. A verba de R$ 5.000,00 (cinco mil reais) não é automaticamente considerada suficiente para o conjunto dessas medidas. A rubrica original de R$ 6.500,00 (seis mil e quinhentos reais) para laudo também não foi convertida em preço de todos os serviços de engenharia. Essas separações evitam somar funções diferentes sob um mesmo custo sem suporte de cotação.

O estudo também prevê eventual auditoria externa entre R$ 2.000,00 (dois mil reais) e R$ 5.000,00 (cinco mil reais), não incluída no total. A comparação entre adequar, substituir ou terceirizar o processamento depende de orçamentos equivalentes e do desempenho requerido. Não é possível afirmar qual alternativa é economicamente superior apenas com a estimativa apresentada.

4.6. Monitoramento e limitações

O plano de acompanhamento distingue verificação operacional e inspeção técnica. Antes do uso, propõe-se verificar a integridade aparente das proteções e a ausência de falhas sinalizadas, segundo procedimento aprovado. Intertravamentos, paradas, bloqueios e demais funções deverão ser testados na periodicidade definida pelo fabricante e pelo responsável técnico, considerando a apreciação de riscos e a utilização real. As inspeções e intervenções devem gerar registros.

A manutenção preventiva deverá seguir plano com tarefas, responsáveis, periodicidade e critérios de aceitação. Alterações de fonte laser, parâmetros, materiais processados, software, proteções ou circuito de segurança exigem análise de seu impacto e nova validação das funções afetadas. A atualização documental acompanhará as modificações, evitando que o desenho registrado se afaste da condição executada.

O alcance dos resultados é o diagnóstico e a especificação conceitual das medidas. A condição final da máquina não foi validada por ensaios neste estudo. Por isso, os critérios dos Quadros 2 e 3 definem o que deverá ser executado e comprovado; a avaliação quantitativa residual e a conclusão sobre a condição operacional dependem dos registros correspondentes.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise estruturou uma proposta de adequação baseada nas funções necessárias para controlar os perigos da gravação a laser. O eixo da solução é a contenção óptica da zona de processamento com acesso intertravado, integrada à segurança elétrica, ao controle das energias perigosas e aos procedimentos. Cortina de luz e comando bimanual passam a ser alternativas condicionadas à apreciação de riscos, sem substituir a proteção óptica.

A avaliação corrigiu o uso dos índices HRN: os resultados aritméticos disponíveis não foram mantidos como demonstração de redução de risco, pois a população exposta e as consequências não estão suficientemente caracterizadas. Em seu lugar, foram estabelecidos cenários de perigo, funções de proteção e critérios de verificação. Essa abordagem permite orientar a adequação sem extrapolar os

registros analisados.

O planejamento mantém a referência de 60 (sessenta) dias e a provisão histórica de R$ 25.000,00 (vinte e cinco mil reais), com distinção entre recursos estimados e escopo executivo. O estudo atende aos objetivos de diagnóstico e elaboração da proposta. A demonstração de segurança da instalação executada deverá reunir identificação completa do equipamento, projeto, registros das intervenções e validação funcional e óptica.

A continuidade do trabalho consiste em executar a solução detalhada, verificar os critérios estabelecidos e concluir a apreciação do risco residual. A liberação operacional deverá decorrer dessa validação, sob responsabilidade técnica e conforme os requisitos aplicáveis. O resultado apresentado é, assim, uma base técnica para a adequação, sem antecipar uma declaração de conformidade integral.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Economia. Secretaria Especial de Previdência e Trabalho. **NR 10: segurança em instalações e serviços em eletricidade**. Brasília, DF: Secretaria Especial de Previdência e Trabalho, 2019. Versão consolidada em 2019. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-10-atualizada-2019.pdf. Acesso em: 16 out. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 12: segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. Brasília, DF: MTE, 2024. Versão consolidada em 2024. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-12-atualizada-2024.pdf. Acesso em: 16 out. 2026.

DRUMOND, Bruno. **HRN: o que é esse método, como calcular e montar planilha, com exemplo**. Belo Horizonte: Engenharia Adequada, 25 fev. 2022. Disponível em: https://adequada.eng.br/hrn/. Acesso em: 16 out. 2026.

GARCIA, Mario Vinicio; JORGE, Gabriel Xavier; LOCASTRO, João Karlos. Estudo bibliográfico acerca da aplicação da NR 12 para a segurança de trabalhadores em máquinas e equipamentos. **Journal of Exact Sciences**, v. 41, n. 1, p. 14–21, abr./jun. 2024. Disponível em: https://www.mastereditora.com.br/periodico/20240413_205156.pdf. Acesso em: 16 out. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60825-1:2014: safety of laser products: part 1: equipment classification and requirements**. Geneva: IEC, 2014. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/3587. Acesso em: 16 out. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12100:2010: safety of machinery: general principles for design: risk assessment and risk reduction**. Geneva: ISO, 2010. Disponível em: https://www.iso.org/standard/51528.html. Acesso em: 16 out. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11553-1:2020: safety of**

machinery: laser processing machines: part 1: laser safety requirements. Geneva: ISO, 2020. Disponível em: https://www.iso.org/standard/67658.html. Acesso em: 16 out. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13849-1:2023: safety of machinery: safety-related parts of control systems: part 1: general principles for design**. Geneva: ISO, 2023. Disponível em: https://www.iso.org/standard/73481.html. Acesso em: 16 out. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14119:2024: safety of machinery: interlocking devices associated with guards: principles for design and selection**. Geneva: ISO, 2024. Disponível em: https://www.iso.org/standard/75942.html. Acesso em: 16 out. 2026.

LIMA, Milton Sergio Fernandes de. **Fabricação assistida por laser**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 3., 2005, Joinville. Anais [...]. [S. l.]: ABCM, 2005. Disponível em: https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2005/PALESTRA02.pdf. Acesso em: 16 out. 2026.

PROJETO DE AUTOMAÇÃO PARA MONITORAMENTO E BOMBEAMENTO DE VINHAÇA EM USINA DE CANA-DE-AÇÚCAR

PAPINI, Renato Penteado Machado, UNIUBE – Uberaba/MG, papinirenato2@gmail.com
FERREIRA, Tadeu Barcelos, UNIUBE – Uberaba/MG, tadeu1barcelos@gmail.com
LUCAS, Marcelo, UNIUBE – Uberaba/MG, marcelo.lucas@uniube.br
SILVA, Leandro Aureliano da, UNIUBE – Uberaba/MG, leandro.silva@uniube.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado para o monitoramento e o bombeamento de vinhaça em uma usina de cana-de-açúcar. A vinhaça, resíduo da destilação do vinho fermentado na produção de etanol, é rica em nutrientes e amplamente utilizada na fertirrigação, o que contribui para a sustentabilidade agrícola. O sistema proposto substitui a operação manual e local de oito bombas, antes ineficiente e suscetível a falhas humanas, por um controle centralizado baseado em transmissores ultrassônicos de nível com comunicação LoRa, adequada à transmissão de dados a grandes distâncias, controlador lógico programável (CLP), inversores de frequência, Interface Homem-Máquina (IHM) e sistema supervisório. A solução realiza o monitoramento contínuo das piscinas de vinhaça e o acionamento remoto das bombas. Após a implantação, o número de manutenções semanais nas bombas passou de 7 a 12 para 0 a 3 no período observado, o que reduziu as paradas do sistema e representa uma economia estimada de cerca de R$ 29.000,00 (vinte e nove mil reais) por ano em mão de obra.

Palavras-chave: Automação industrial; Vinhaça; LoRa; Monitoramento de nível; Interface Homem-Máquina.

1. INTRODUÇÃO

A vinhaça é um resíduo líquido gerado na destilação do vinho fermentado durante a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. Rica em nutrientes como potássio, nitrogênio e fósforo, é amplamente utilizada como fertilizante no cultivo da cana, o que contribui para reduzir o uso de adubos químicos e aumentar a sustentabilidade da produção agrícola (OLIVEIRA, 2017). Na usina em que se realizou este estudo, a vinhaça é armazenada em três piscinas, de onde é transportada por tubulações até os campos de plantio para a fertirrigação. Esse transporte é realizado por oito bombas, cada uma acionada por um inversor de frequência.

Anteriormente, o acionamento dessas bombas era feito manualmente e de forma local, diretamente nos inversores instalados no Centro de Controle de Motores (CCM). Esse procedimento dependia da presença física dos operadores e exigia que cada bomba fosse controlada individualmente,

o que tornava a operação complexa, demorada e suscetível a falhas humanas, além de dificultar o ajuste das condições operacionais. Ademais, a ausência de monitoramento automatizado dos níveis das piscinas aumentava o risco de falhas no transporte e de subutilização do recurso.

Diante desse cenário, foi projetado e implementado um novo sistema de automação, com o objetivo de modernizar o transporte de vinhaça e superar as limitações do sistema anterior. O novo sistema introduz o monitoramento automatizado dos níveis das piscinas por meio de transmissores de nível que enviam as informações via rádio, com a tecnologia LoRa (*Long Range*), conhecida pelo baixo consumo de energia e pelo grande alcance (WIRELESS SYSTEMS, 2024). Além disso, o acionamento das bombas foi centralizado e passou a ser realizado remotamente, tanto pelo sistema supervisório quanto por uma Interface Homem-Máquina (IHM). Essa modernização torna o controle mais ágil e eficiente, facilita a operação e otimiza o uso da vinhaça na fertirrigação.

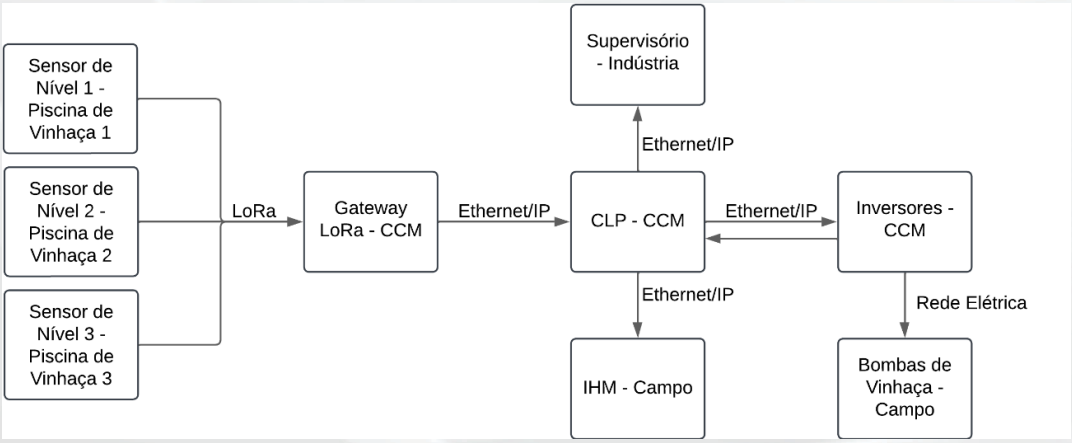
Com base nos conceitos de automação industrial descritos por Macedo e Silva (2020), o novo sistema busca melhorar a eficiência e reduzir a complexidade operacional, além de contribuir para a sustentabilidade por meio da otimização de recursos e da redução de custos e de impactos ambientais. Assim, o objetivo deste trabalho é descrever o projeto e a implantação desse sistema de automação e avaliar seus efeitos sobre a frequência de manutenções nas bombas e sobre os custos associados à mão de obra.

2. METODOLOGIA

2.1. Arquitetura do sistema e instrumentação

Para melhor compreensão deste trabalho, a Figura 1 apresenta o diagrama em blocos do sistema implementado.

Figura 01: Diagrama em blocos do processo.



Fonte: elaboração própria (2024).

Como já relatado, o sistema proposto substitui a operação manual e local das bombas, que era

ineficiente, sujeita a falhas humanas e limitada em alcance operacional, por um controle automatizado baseado em sensores de nível e na tecnologia LoRa.

Os sensores de nível 1, 2 e 3 apresentados na Figura 1 são do modelo SN300LR (ELETROSERT, 2024). Trata-se de dispositivos ultrassônicos desenvolvidos para aplicações industriais que exigem precisão, confiabilidade e robustez em ambientes adversos. Eles desempenham papel central no sistema automatizado, pois são responsáveis pela medição contínua dos níveis de vinhaça nas piscinas de armazenamento. Essa tarefa é essencial para evitar transbordamentos ou níveis muito baixos, que poderiam comprometer a operação do sistema de bombeamento ou causar desperdício de um recurso valioso utilizado na fertirrigação.

O princípio de funcionamento dos sensores SN300LR baseia-se na tecnologia de ultrassom, que utiliza ondas sonoras de alta frequência para determinar a distância até a superfície do líquido. O sensor emite pulsos ultrassônicos que se propagam pelo ar até atingir a superfície da vinhaça e são refletidos de volta ao sensor, que calcula o tempo decorrido entre a emissão e a recepção do sinal. Com base nesse tempo de retorno, conhecido como tempo de voo (*Time of Flight* – ToF), o sensor determina a distância entre a superfície do líquido e o dispositivo. Essa medição é então convertida em nível por meio de algoritmos internos (ELETROSERT, 2024).

A precisão dessa tecnologia se mantém mesmo em condições adversas de operação, como as encontradas em usinas de cana-de-açúcar. O manual técnico do sensor SN300LR (ELETROSERT, 2024) informa precisão de ±0,5% do fundo de escala, com medições consistentes mesmo na presença de vapores corrosivos ou de variações de temperatura. Essa característica é particularmente importante no monitoramento da vinhaça, cuja composição química e cujas condições ambientais podem dificultar o uso de tecnologias convencionais de medição de nível.

Além disso, a faixa de medição ajustável do sensor, de 0,2 m a 10 m (ELETROSERT, 2024), permite sua adaptação a diferentes configurações de piscinas de armazenamento, o que torna o SN300LR versátil, atendendo tanto a piscinas menores quanto a grandes tanques de usinas de maior porte. A faixa de temperatura de operação, de −20 °C a +70 °C, e o invólucro em polipropileno, resistente a agentes químicos corrosivos (ELETROSERT, 2024), favorecem a durabilidade do equipamento em condições severas, como a exposição aos vapores da vinhaça, que podem corroer materiais mais sensíveis ao longo do tempo.

Outro destaque do SN300LR é sua integração com a comunicação sem fio LoRa, que permite transmitir os dados de nível ao sistema de controle a longas distâncias, com alcance de até 15 km em ambientes abertos (ELETROSERT, 2024). Essa característica é essencial em usinas de grande porte, nas quais as piscinas de vinhaça podem estar localizadas a distâncias consideráveis da sala de controle. A transmissão via LoRa também reduz a necessidade de cabeamento, diminui os custos de instalação e manutenção e atenua problemas de desgaste físico da infraestrutura cabeada. A comunicação dos sensores com o *gateway* LoRa V3 garante que os dados sejam transmitidos de maneira confiável e em tempo real ao controlador lógico programável (CLP), assegurando a integração com o restante do sistema. A escolha do sensor SN300LR baseou-se, portanto, em sua compatibilidade com a arquitetura de comunicação do

sistema e em sua capacidade de atender aos requisitos técnicos da aplicação.

Os dados coletados pelos sensores são transmitidos ao *gateway* LoRa V3, mostrado na Figura 1, que funciona como concentrador de comunicação. Esse *gateway* converte os sinais recebidos em dados compatíveis com o protocolo EtherNet/IP e os envia ao CLP modelo 1769-L35E, da Allen-Bradley. O CLP é o núcleo do sistema, responsável por processar as informações e acionar as bombas conforme a necessidade. A robustez dessa cadeia de comunicação garante confiabilidade e precisão às decisões de controle, essenciais para evitar desperdícios e aumentar a eficiência operacional.

O sistema integra ainda inversores de frequência Altivar 630, que controlam o acionamento das bombas de vinhaça de 15 kW, conforme especificado no catálogo técnico do fabricante (SCHNEIDER ELECTRIC, 2024). Esses dispositivos ajustam dinamicamente a vazão de acordo com a demanda, utilizando controle PID para garantir uma operação estável e eficiente (KULKARNI; PATIL, 2020). Os inversores oferecem proteção contra falhas elétricas, sobrecargas e condições extremas, e sua interface local facilita o diagnóstico e a manutenção, permitindo intervenções rápidas e precisas em caso de anomalias (SCHNEIDER ELECTRIC, 2024). Segundo estudos sobre eficiência energética em sistemas de bombeamento, essa abordagem pode reduzir o consumo de energia em até 30% (SILVA; MEDEIROS; LIMA, 2021), além de prolongar a vida útil dos equipamentos e diminuir os custos operacionais e de manutenção.

Além do controle físico do bombeamento, o sistema possui uma camada de supervisão e monitoramento composta pelo supervisório GE iFIX e pela IHM Rockwell PanelView Plus 7. O supervisório permite o acompanhamento remoto e em tempo real de todas as variáveis do processo, incluindo níveis de vinhaça, estado das bombas e alarmes configuráveis. Já a IHM oferece uma interface intuitiva para ajustes rápidos, exibição de dados críticos e interação ergonômica com o sistema. Ambas as ferramentas contribuem para a segurança operacional e reduzem a necessidade de intervenções manuais.

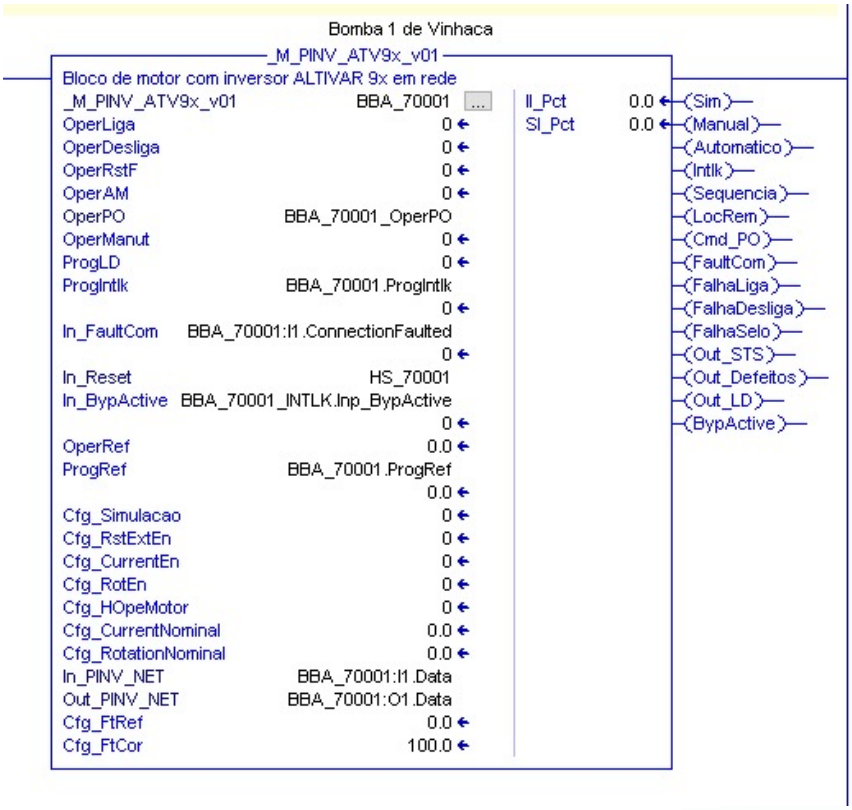
Toda a comunicação entre os dispositivos do sistema é gerenciada por um *switch* Ethernet Stratix 8000, que assegura alta velocidade e redundância por meio do protocolo *Device Level Ring* (DLR). Essa configuração reduz a latência e preserva a integridade dos dados, mesmo em condições de alta carga de trabalho (MACEDO; SILVA, 2020).

A escolha dos sensores SN300LR e de toda a arquitetura de automação fundamentou-se em suas características técnicas e na necessidade de atender aos requisitos específicos da aplicação. Ao integrar sensores ultrassônicos, comunicação LoRa, CLP, inversores de frequência e supervisório, o sistema busca aumentar a eficiência, reduzir custos operacionais e promover a gestão responsável dos recursos naturais, com redução de impactos ambientais e aumento da produtividade agrícola (COSTA, 2018).

2.2. Programação do CLP e integração dos equipamentos

A Figura 2 apresenta alguns dos blocos lógicos desenvolvidos no RSLogix 5000 para a leitura dos dados transmitidos pelo *gateway*.

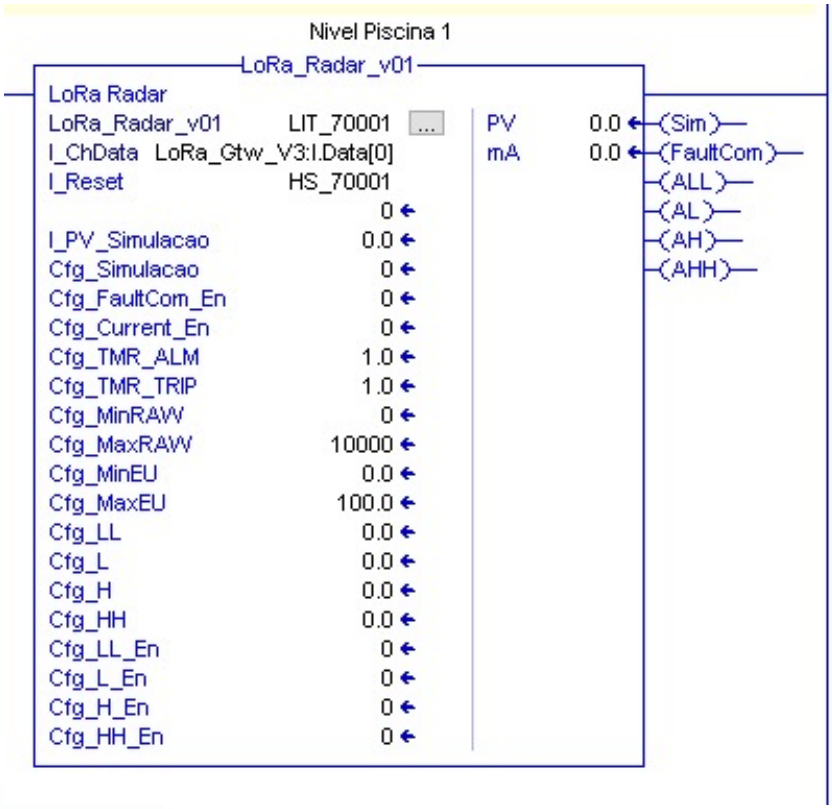
Figura 02: Bloco lógico de comunicação utilizado no RSLogix 5000.



Fonte: elaboração própria (2024).

Por se tratar de equipamentos de fabricantes diferentes, é necessário um conjunto de blocos para que o acionamento da bomba ocorra corretamente. A Figura 3 apresenta os blocos lógicos utilizados para os acionamentos.

Figura 03: Blocos de acionamento.



Fonte: elaboração própria (2024).

No projeto, foi criado no RSLogix 5000 um bloco *Add-On* para gerenciar os dados dos sensores SN300LR recebidos via *gateway* LoRa e integrá-los ao CLP 1769-L35E. Esse *Add-On* realiza o mapeamento das variáveis de entrada do *gateway*, incluindo informações críticas como os níveis de alarme (alto, muito alto, baixo e muito baixo) e o estado de falha de comunicação na rede LoRa.

Além de organizar e padronizar os dados, o bloco encapsula a lógica necessária para tratar os valores recebidos, o que facilita o monitoramento e permite gerar alarmes enviados em tempo real à IHM e ao supervisório iFIX. Como destaca Rockwell Automation (2020, tradução nossa), "o uso de Add-Ons em sistemas de automação melhora a modularidade e facilita o diagnóstico de falhas", recurso essencial para garantir a confiabilidade e a eficiência no monitoramento dos níveis das piscinas de vinhaça.

Também é importante organizar bem os equipamentos no meio físico, uma vez que o correto dimensionamento dos componentes do sistema contribui para prolongar sua vida útil. A Figura 4 mostra o painel elétrico em que foi montado o circuito de acionamento.

Figura 04: Painel elétrico do sistema.



Fonte: acervo dos autores (2024).

A Figura 5 mostra a aparência física do sensor utilizado, que se destaca pelo tamanho compacto.

Figura 05: Sensor de nível SN300LR.



Fonte: acervo dos autores (2024).

Os inversores de frequência Altivar 630, indicados na Figura 1, foram integrados ao sistema por meio de arquivos EDS (*Electronic Data Sheet*) configurados diretamente no RSLogix 5000. Esse procedimento permitiu que o CLP reconhecesse os inversores e recebesse suas variáveis de operação, como frequência, corrente e estado de funcionamento. Paralelamente, foi desenvolvido no RSLogix 5000 um conjunto de *Add-Ons* específicos para organizar as entradas e saídas dos sensores e dos inversores, o que facilita o monitoramento e a detecção de falhas, como perda de comunicação ou condições críticas de operação. A Figura 6 mostra os painéis que abrigam os inversores utilizados no projeto.

Figura 06: Painel de instalação dos inversores.



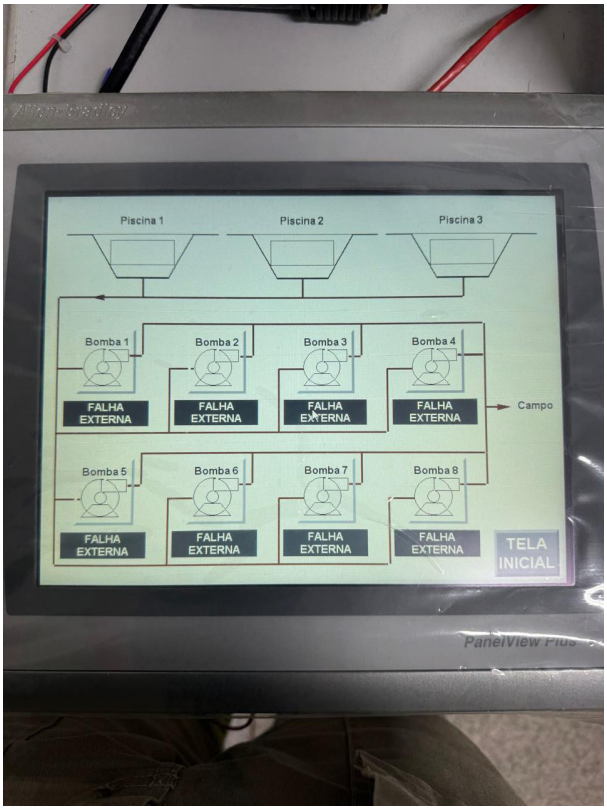
Fonte: acervo dos autores (2024).

Para suportar a comunicação entre todos os dispositivos, foi utilizado o *switch* gerenciado Stratix 8000, expandido com o módulo 1783-MX08T, que garantiu conectividade contínua e de alta velocidade entre o CLP, o *gateway* LoRa, os inversores de frequência e os sistemas de supervisão. A confiabilidade e a baixa latência do protocolo EtherNet/IP foram fundamentais para a sincronização do sistema, conforme destacam Macedo e Silva (2020), que enfatizam a importância de tecnologias robustas em redes industriais críticas.

2.3. Supervisão e interface com o operador

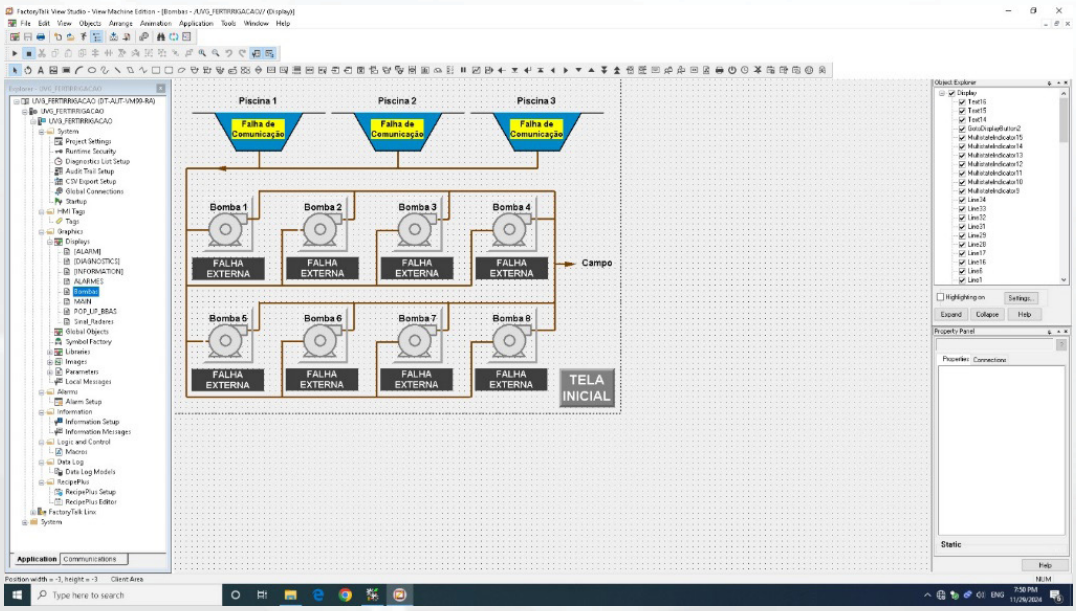
A etapa seguinte consistiu na configuração do sistema de monitoramento e controle. A IHM, indicada na Figura 1, desenvolvida para o Rockwell PanelView Plus 7, foi programada para exibir os diagnósticos do sistema, incluindo o estado de operação das bombas, os alarmes de falha e as condições da rede. Além disso, o sistema foi integrado ao supervisório GE iFIX, também indicado na Figura 1, que permitiu a visualização global do processo, o armazenamento de dados históricos e a emissão de notificações automáticas em casos de falhas ou anomalias. Segundo Macedo e Silva (2020), a integração de IHMs intuitivas e supervisórios robustos é essencial para aumentar a eficiência operacional e reduzir o tempo de resposta a problemas. A Figura 7 apresenta uma das telas da IHM, e a Figura 8, a tela do supervisório, que evidenciam a facilidade de visualização.

Figura 07: IHM com o acionamento das bombas.



Fonte: elaboração própria (2024).

Figura 08: Supervisório com os acionamentos das bombas.



Fonte: elaboração própria (2024).

2.4. Parametrização, testes e validação

A implementação do sistema seguiu uma sequência estruturada, na qual cada componente foi configurado e validado de forma integrada. Inicialmente, o CLP foi programado para processar os sinais provenientes dos sensores de nível e acionar as bombas de vinhaça de acordo com a demanda. Os motores das bombas, controlados pelos inversores Altivar 630, foram ajustados para oferecer um bombeamento contínuo e adequado às necessidades do sistema, evitando desperdício de energia. Para otimizar o desempenho, os motores foram configurados com uma rampa de aceleração e um *setpoint* de referência de velocidade.

A rampa de aceleração permite que o motor alcance a velocidade desejada de forma gradual, reduzindo picos de corrente e esforços mecânicos nos componentes das bombas, o que prolonga a vida útil do conjunto e melhora sua eficiência energética. Já o *setpoint* de velocidade foi ajustado para que a vazão atenda às demandas específicas do processo, evitando sobrecarga no motor e desperdício de energia. Esses ajustes são fundamentais em sistemas industriais, pois, como destaca Costa (2018), "o uso de rampas de aceleração e controle de velocidade contribui para a estabilidade operacional e a durabilidade dos equipamentos".

Em seguida, foram realizados testes para verificar a comunicação entre os dispositivos, com a simulação de cenários de falha para avaliar a resposta do sistema a condições críticas de operação. Concluídos os ajustes finais, o sistema foi validado para operação contínua. A Figura 9 mostra o sistema de bombeamento.

Figura 09: Sistema de bombeamento de vinhaça.



Fonte: acervo dos autores (2024).

Com essa abordagem estruturada, buscou-se alinhar o sistema às boas práticas recomendadas por Macedo e Silva (2020) e às metas de sustentabilidade ambiental, reduzindo as intervenções manuais e otimizando o consumo de recursos.

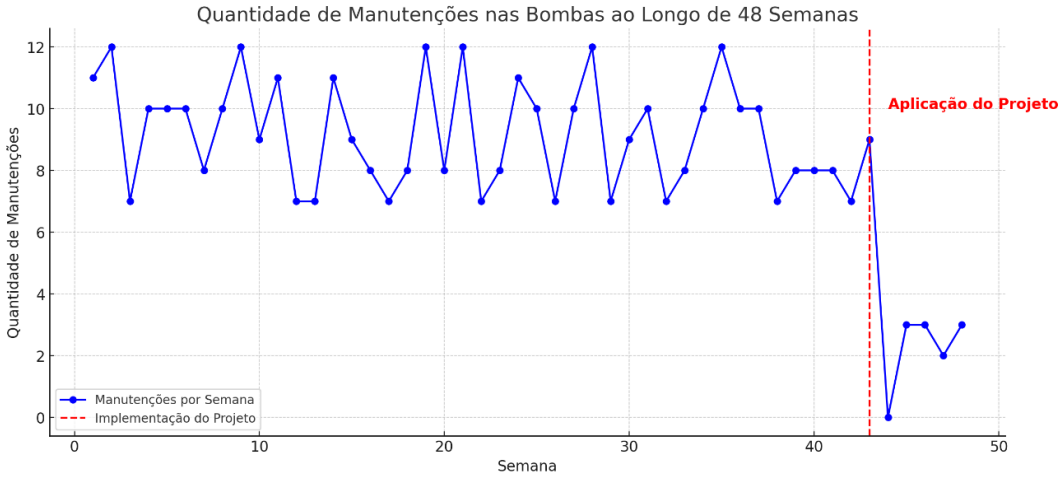
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação do sistema de automação para monitoramento dos níveis de vinhaça e acionamento das bombas trouxe avanços substanciais na gestão desse resíduo e otimizou seu uso na fertirrigação. Os transmissores de nível SN300LR, integrados ao *gateway* LoRa V3 e ao CLP 1769-L35E, permitem o monitoramento contínuo e preciso dos níveis de vinhaça nas piscinas.

Esse controle ajuda a evitar transbordamentos e a garantir que a vinhaça seja utilizada de maneira eficaz, sem desperdícios e em conformidade com as exigências da fertirrigação. Oliveira (2017) destaca que a automação de processos industriais proporciona ganhos expressivos de precisão e eficiência operacional, o que se confirma, neste caso, pela capacidade do sistema de responder automaticamente às variações nos níveis de vinhaça.

A Figura 10 apresenta a quantidade de manutenções nas bombas ao longo de 48 semanas, destacando a diferença entre os períodos anterior e posterior à implementação do projeto de automação.

Figura 10: Quantidade de manutenções semanais nas bombas.



Fonte: elaboração própria (2024).

A implementação do sistema de automação trouxe melhorias substanciais na operação e na manutenção das bombas de vinhaça. Antes da automação (semanas 1 a 43), as manutenções semanais variavam entre 7 e 12, com média de 9,2. Após o projeto (semanas 44 a 48), passaram a variar entre 0 e 3, com média de 2,2, o que indica a eficácia do controle automatizado. Esse resultado corrobora Costa (2018), que destaca a contribuição dos inversores de frequência para a redução do desgaste mecânico e do consumo energético dos motores industriais. Por se tratar de um período pós-implantação ainda curto, recomenda-se manter o acompanhamento para confirmar a tendência.

Antes da implementação do sistema automatizado, os eletricistas eram responsáveis por várias tarefas manuais, como o rearme (*reset*) dos inversores em caso de alarmes ou falhas por temperatura. Essas intervenções eram necessárias sempre que o inversor apresentava algum problema que exigia ação humana. Os eletricistas também faziam inspeções constantes do funcionamento das bombas e do sistema de comunicação, o que demandava tempo e esforço. Com a automação, essas tarefas deixaram de ser necessárias, pois os próprios operadores podem realizar o rearme diretamente pela IHM, o que reduz as intervenções manuais e aumenta a eficiência do processo.

Cada manutenção ocupava de 2 a 3 horas de um eletricista (R$ 20,00/h) e de um auxiliar (R$ 12,00/h), o que corresponde a um custo de R$ 64,00 (sessenta e quatro reais) a R$ 96,00 (noventa e seis reais) por intervenção, ou R$ 80,00 (oitenta reais) em média. Considerando a redução média de aproximadamente 7 (sete) manutenções por semana e um ano de 52 (cinquenta e duas) semanas, estima-se uma economia de cerca de R$ 29.000,00 (vinte e nove mil reais) por ano em custos de mão de obra, o que contribui significativamente para o retorno do investimento (*payback*) do sistema.

A implementação dos inversores de frequência Altivar 630 nas bombas foi fundamental para o controle preciso da vazão, permitindo ajustar o fluxo às demandas de cada piscina de vinhaça. Conforme Costa (2018), o uso de inversores de frequência contribui para a economia de energia e aumenta a durabilidade dos equipamentos, reduzindo a frequência de manutenção. O aumento da durabilidade é coerente com a redução de manutenções observada neste sistema; a redução do consumo energético,

embora esperada, não foi quantificada neste estudo e deve ser avaliada em trabalhos futuros.

A confiabilidade da comunicação, essencial para a eficiência do sistema, foi garantida por tecnologias como o *switch* gerenciado Stratix 8000 e a comunicação LoRa, enquanto a centralização do controle no CLP assegurou respostas rápidas às variações nos níveis de vinhaça, otimizando a fertirrigação e minimizando perdas. Segundo Oliveira (2017), sistemas que integram sensores de nível e CLPs oferecem maior precisão no controle de processos e reduzem desperdícios.

Além disso, a IHM desenvolvida com o FactoryTalk View proporcionou uma operação ergonômica e segura, alinhada aos princípios descritos por Nascimento (2019), que enfatiza a importância de interfaces amigáveis e intuitivas para a eficácia operacional e a redução de falhas humanas. Essa IHM simplificou a operação, permitindo que a equipe da usina monitore os níveis de vinhaça em tempo real e ajuste o funcionamento das bombas com agilidade, o que contribui para a prevenção de erros e para a segurança operacional.

Em síntese, o projeto de automação promoveu avanços expressivos na eficiência e na segurança do manejo da vinhaça e, ao mesmo tempo, proporcionou benefícios econômicos e ambientais para a usina. Alinhado às boas práticas da automação industrial descritas na literatura técnica, o sistema exemplifica como a integração de tecnologias e processos automatizados pode impactar positivamente a gestão de recursos em indústrias agrícolas.

4. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema automatizado de monitoramento e bombeamento de vinhaça representa um avanço significativo na modernização de processos agroindustriais. Com a implementação de sensores de nível, comunicação via LoRa e controle centralizado por CLP, foi possível superar limitações históricas da operação, como a dependência de intervenções manuais, as falhas humanas frequentes e a falta de precisão no manejo do recurso.

O projeto resultou em benefícios concretos, como a redução das manutenções semanais nas bombas de 7–12 para 0–3, a economia estimada de cerca de R$ 29.000,00 (vinte e nove mil reais) anuais em mão de obra e a otimização do uso da vinhaça, promovendo a sustentabilidade agrícola. Esses avanços estão em linha com as observações de Oliveira (2017), que destaca a importância da automação na melhoria da eficiência operacional e na redução de desperdícios.

No entanto, o projeto também enfrentou desafios. A escolha de tecnologias, como o protocolo EtherNet/IP, e a integração de dispositivos industriais de diferentes fabricantes exigiram adaptações complexas para garantir confiabilidade em um ambiente sujeito a interferências e a distâncias significativas. Conforme Macedo e Silva (2020), o uso de protocolos robustos é essencial para garantir a interoperabilidade e o desempenho de sistemas industriais em larga escala.

Além disso, a capacitação da equipe para operar as novas IHMs e o sistema supervisório foi um aspecto crítico para o sucesso da transição do modelo manual para o automatizado. Nascimento (2019) destaca que interfaces amigáveis não apenas reduzem o risco de falhas humanas, mas também melhoram

a ergonomia e a segurança operacional, aspectos contemplados no projeto.

Os impactos positivos do sistema vão além da eficiência operacional. A automação contribuiu para a sustentabilidade ambiental, ao reduzir o desperdício de recursos naturais e os custos operacionais, como também aponta Costa (2018) ao tratar do papel dos inversores de frequência na conservação de energia e na durabilidade dos equipamentos industriais. A centralização das operações e o monitoramento remoto aprimoraram a segurança e a previsibilidade do processo, permitindo que decisões críticas fossem tomadas com maior rapidez e embasamento técnico.

Como trabalhos futuros, recomenda-se ampliar o período de acompanhamento após a implantação, medir o consumo de energia das bombas antes e depois da automação e explorar tecnologias emergentes, como a manutenção preditiva baseada em inteligência artificial, que podem reduzir ainda mais os custos operacionais e aumentar a confiabilidade do sistema. A integração com plataformas de análise de dados também pode trazer novas informações para a gestão de recursos agrícolas.

Em síntese, o projeto exemplifica o potencial da automação industrial e o papel da engenharia de controle e automação na inovação tecnológica, na promoção da sustentabilidade e na modernização das indústrias agrícolas.

REFERÊNCIAS

COSTA, A. L. **Princípios de automação industrial.** Rio de Janeiro: Editora Científica, 2018.

ELETROSERT. **Manual técnico do sensor SN300LR e Gateway LoRa V3.** [*S. l.*]: Eletrosert Sistemas Eletrônicos, 2024. Disponível em: https://www.eletrosert.com.br/manual-sn300lr. Acesso em: 2 dez. 2024.

KULKARNI, A.; PATIL, S. Eficiência energética usando controle PID em inversores de frequência. **International Journal of Power Electronics and Drive Systems**, 2020. Disponível em: https://ijpeds.org/efficiency-pid-control. Acesso em: 2 dez. 2024.

MACEDO, L. R.; SILVA, C. S. Aplicações da automação industrial para otimização de processos agrícolas. **Revista Brasileira de Automação**, v. 15, n. 3, p. 45-58, 2020.

NASCIMENTO, R. P. Ergonomia e segurança em sistemas de automação industrial. **Revista Brasileira de Segurança e Saúde no Trabalho**, v. 8, n. 1, p. 22-36, 2019.

OLIVEIRA, J. M. Automação de processos industriais e seus impactos na precisão e na eficiência operacional. **Revista de Automação e Controle**, v. 12, n. 4, p. 101-115, 2017.

ROCKWELL AUTOMATION. **Logix 5000 Controllers**: Add-On Instructions. Programming Manual. Publicação 1756-PM010J-EN-P. Milwaukee: Rockwell Automation, 2020.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Manual técnico do inversor Altivar 630.** [*S. l.*]: Schneider Electric, 2024. Disponível em: https://www.se.com/ww/en/product/ATV630/. Acesso em: 2 dez. 2024.

SILVA, R.; MEDEIROS, F.; LIMA, J. Eficiência energética em sistemas de bombeamento com inversores de frequência: uma revisão. **Revista Brasileira de Automação e Controle**, 2021. Disponível em: https://www.rbacontrol.org/artigos/inversores-bombeamento. Acesso em: 2 dez. 2024.

WIRELESS SYSTEMS. **Manual técnico do Gateway LoRa V3.** [*S. l.*]: Wireless Systems, 2024. Disponível em: https://www.loragateway.com/manuals/. Acesso em: 2 dez. 2024.

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA USINA FOTOVOLTAICA DE MICROGERAÇÃO

RIBEIRO, Adrian Gabriel Silva, UNIUBE – Uberaba/MG, adriangabriel@uniube.br
SILVA, Augusto Teodoro da, UNIUBE – Uberaba/MG, augustots@edu.uniube.br
LUCAS, Marcelo, UNIUBE – Uberaba/MG, marcelo.lucas@uniube.br
ELIAS, Marcelo Eustáquio Pereira, UNIUBE – Uberaba/MG, marcelo.elias@uniube.br
LIMA, Adriano Dawison de, UNIUBE – Uberaba/MG, adriano.lima@uniube.br

RESUMO

O aumento progressivo dos custos de energia elétrica no Brasil tem impulsionado a busca por fontes renováveis, com destaque para a energia solar fotovoltaica. Este estudo avalia a viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica de 75,26 kWp instalada em uma fazenda para atender ao consumo de energia de um supermercado por meio do sistema de compensação de energia elétrica. A pesquisa adota uma abordagem técnica e econômica que considera as especificações do projeto, as condições de instalação, o investimento inicial e os custos de operação e manutenção, e utiliza como indicadores o período de retorno simples (*payback*) e o retorno sobre o investimento (ROI). Para uma geração estimada de 9.302,14 kWh/mês e uma tarifa média de R$ 0,70/kWh, obteve-se economia líquida anual de R$ 68.138,00 (sessenta e oito mil, cento e trinta e oito reais), *payback* de aproximadamente 7,34 anos e retorno anual simples de 13,63% sobre um investimento de R$ 500.000,00 (quinhentos mil reais). Os resultados indicam que a usina é uma solução economicamente viável e ambientalmente sustentável, que reduz a exposição do supermercado às oscilações tarifárias e contribui para a redução da pegada de carbono. Recomenda-se a aplicação dessa tecnologia em setores de alta demanda energética, como indústrias e hospitais, e em regiões com maior irradiação solar.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica; Microgeração distribuída; Viabilidade econômica; Sustentabilidade; Supermercados.

1. INTRODUÇÃO

O aumento contínuo dos custos de energia elétrica no Brasil tem impulsionado a busca por soluções energéticas mais sustentáveis e acessíveis. Entre essas alternativas, a energia solar fotovoltaica se destaca pela sustentabilidade ambiental e pela constante redução dos custos de instalação e operação.

A regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que fomenta a micro e minigeração distribuída e, mais recentemente, o marco legal instituído pela Lei nº 14.300/2022 (BRASIL, 2022) têm desempenhado papel central nesse avanço, viabilizando o uso de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas e rurais. Nesse contexto, as usinas fotovoltaicas de microgeração surgem como solução

eficaz e economicamente viável, especialmente para empresas interessadas em reduzir suas despesas com energia elétrica e, ao mesmo tempo, minimizar impactos ambientais.

Esta pesquisa é guiada pela seguinte questão: qual é a viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica de 75,26 kWp instalada em uma fazenda para atender à demanda de energia de um supermercado? Para respondê-la, o estudo avalia as especificações técnicas do projeto, as condições locais de instalação e os custos associados, buscando determinar se o investimento proposto gera economia significativa ao longo do tempo e se justifica como solução sustentável e economicamente vantajosa.

O objetivo principal deste estudo é analisar a viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica de 75,26 kWp instalada em área rural para suprir a demanda de energia de um supermercado. Para alcançar esse propósito, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: analisar os impactos econômicos e ambientais da instalação da usina; avaliar a eficiência operacional e a economia projetada a longo prazo em comparação ao uso exclusivo da energia da distribuidora; e discutir a contribuição do sistema para a redução da pegada de carbono da operação comercial.

A justificativa para este estudo reside na relevância crescente das alternativas energéticas renováveis em um cenário de alta nos preços da energia elétrica e de aumento da demanda de setores comerciais, como o supermercadista. A instalação de uma usina fotovoltaica de microgeração reduz a dependência do fornecimento convencional, contribuindo para a redução de custos e para a estabilidade financeira. Paralelamente, a adoção da energia solar fortalece o compromisso ambiental da empresa, diferencial especialmente relevante em um cenário de crescente conscientização ambiental. Assim, a avaliação da viabilidade econômica desse projeto busca fornecer subsídios para futuras decisões de investimento em energias renováveis.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Energia fotovoltaica e microgeração

A energia fotovoltaica tem sido amplamente estudada como alternativa viável e sustentável de produção de eletricidade, especialmente no contexto da microgeração distribuída. A microgeração permite que consumidores, como residências e pequenos negócios, gerem parte ou a totalidade da energia que consomem, promovendo a autossuficiência energética e reduzindo a dependência de fontes não renováveis (ALMEIDA, 2018). Esse modelo descentralizado é adequado a países com alta incidência solar, como o Brasil, onde as condições climáticas oferecem potencial de geração ao longo de todo o ano (SILVA, 2015). A ANEEL, por meio de regulamentações específicas, busca incentivar a adoção dessa tecnologia como alternativa acessível de geração de eletricidade nos setores residencial e comercial (ANEEL, 2020).

O marco regulatório inicial da microgeração no Brasil foi a Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, que estabeleceu as condições de acesso de unidades de micro e minigeração ao sistema de distribuição (ANEEL, 2012; SANTOS, 2016). Essa resolução introduziu o sistema de compensação de

energia elétrica, conhecido como *net metering*, que permite ao consumidor injetar na rede o excedente de energia gerado e receber créditos para abater o consumo em períodos de menor geração (CABRAL; TORRES; SENNA, 2013).

Essa estrutura regulatória foi essencial para tornar a microgeração economicamente viável e ampliar o acesso à energia solar entre consumidores residenciais e comerciais, o que resultou em crescimento significativo do setor. Em 2022, a Lei nº 14.300 instituiu o marco legal da micro e minigeração distribuída, definindo como microgeração as centrais com potência instalada de até 75 kW e estabelecendo regras de transição para a remuneração do uso da rede pelos sistemas conectados a partir de 2023 (BRASIL, 2022).

A geração fotovoltaica é feita por meio de módulos compostos por células de silício, que convertem a luz solar em energia elétrica. No Brasil, os modelos mais comuns são os de silício policristalino e monocristalino, com eficiência de conversão entre 17% e 24% (FONTES, 2018). Essa tecnologia tem se mostrado promissora em áreas urbanas e rurais, especialmente quando conectada à rede de distribuição, pois dispensa as baterias, mais comuns em sistemas isolados (*off-grid*) (ANEEL, 2012). A Resolução Normativa nº 687/2015 ampliou os incentivos à microgeração distribuída ao permitir, entre outras modalidades, que múltiplas unidades consumidoras compartilhem os créditos gerados em uma mesma instalação, facilitando a adoção por empresas e condomínios (ANEEL, 2015).

A energia solar fotovoltaica aproveita a abundante radiação solar disponível no Brasil, que apresenta um dos maiores índices de irradiação do mundo. Segundo Nascimento (2019), mesmo as regiões menos ensolaradas do país possuem níveis de radiação superiores aos de países líderes no setor, como a Alemanha. Esse potencial é especialmente relevante em um contexto de preocupação com a segurança energética e de pressão pela diversificação da matriz elétrica brasileira (CABRAL; TORRES; SENNA, 2013). A ANEEL tem buscado promover a microgeração fotovoltaica como alternativa sustentável e acessível, reduzindo a dependência de fontes fósseis e alinhando o Brasil aos compromissos climáticos globais, como o Acordo de Paris (ANEEL, 2020).

A instalação de sistemas fotovoltaicos de microgeração traz benefícios econômicos aos consumidores, que podem obter redução significativa das despesas com energia elétrica. A energia gerada e injetada na rede é descontada na fatura, o que permite recuperar o investimento inicial ao longo do tempo por meio da economia gerada (ALMEIDA, 2018). Embora o custo de instalação ainda represente uma barreira, programas de financiamento e incentivos fiscais têm sido implementados para ampliar o acesso à energia solar (ANEEL, 2020). Dessa forma, o incentivo à microgeração promove a sustentabilidade e se alinha a objetivos de inclusão energética.

A regulamentação também estabeleceu regras para garantir a segurança e a estabilidade do sistema elétrico diante da expansão da microgeração. Entre elas, destaca-se a remuneração pelo uso da rede de distribuição, destinada à manutenção da infraestrutura (ANEEL, 2020; BRASIL, 2022). Além disso, a energia gerada destina-se prioritariamente ao autoconsumo, o que impede que a microgeração seja utilizada para comercializar grandes volumes de energia (SANTOS, 2016). Essas medidas visam garantir que a microgeração contribua para a sustentabilidade e a autossuficiência energética sem comprometer o

equilíbrio do sistema.

A expansão da microgeração distribuída representa uma mudança importante no setor energético, pois confere aos consumidores maior autonomia sobre a geração e o uso da energia. Estudos apontam que, com a alta incidência de radiação solar no Brasil, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (*on-grid*) são vantajosos por aproveitarem a infraestrutura de distribuição existente, dispensando baterias e reduzindo o custo de implantação (FONTES, 2018). Nesse tipo de sistema, a conexão com a rede viabiliza a compensação e funciona como uma forma de armazenamento indireto da energia produzida (SILVA, 2015).

A adoção da microgeração fotovoltaica tem aumentado também em razão da instabilidade tarifária do setor elétrico. Em momentos de crise hídrica e de aumento das tarifas, a microgeração surge como solução para consumidores residenciais e empresariais que buscam previsibilidade nos gastos (NASCIMENTO, 2019). Além disso, a energia solar contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando o Brasil aos esforços globais de mitigação das mudanças climáticas (ANEEL, 2020).

O sistema de compensação também permite que unidades consumidoras de mesma titularidade (CPF ou CNPJ) compartilhem os créditos gerados por uma única instalação fotovoltaica, modalidade denominada autoconsumo remoto. Essa possibilidade é especialmente vantajosa para empresas com várias unidades ou para consumidores com múltiplas propriedades (ANEEL, 2020). Com validade dos créditos de 60 meses, o sistema oferece flexibilidade para o uso da energia ao longo do tempo (SANTOS, 2016).

Os avanços tecnológicos também contribuem para a expansão da microgeração. O desenvolvimento de células de maior eficiência, como as de silício monocristalino e as de perovskita, tem aumentado a capacidade de geração dos sistemas e tornado a tecnologia mais atraente (FONTES, 2018). Esses novos materiais podem melhorar a eficiência e a durabilidade dos sistemas, tornando a microgeração cada vez mais competitiva em termos de custo-benefício, especialmente em um cenário de queda nos preços dos equipamentos (SILVA, 2015).

2.2. Viabilidade ambiental e redução de custos

A microgeração fotovoltaica tem se mostrado uma alternativa eficaz para promover a sustentabilidade e reduzir os custos com eletricidade. A adoção desses sistemas diminui a dependência de fontes não renováveis e contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, em consonância com as metas globais de mitigação das mudanças climáticas (ALMEIDA, 2018).

Os benefícios econômicos da microgeração fotovoltaica são notáveis. A energia gerada e compensada reduz a necessidade de compra de eletricidade da distribuidora, o que diminui significativamente as despesas mensais com energia (CABRAL; TORRES; SENNA, 2013). Além disso, a possibilidade de acumular créditos pela energia excedente proporciona maior previsibilidade nas contas de luz, permitindo que os consumidores planejem da melhor forma seus gastos.

A sustentabilidade ambiental é outro aspecto fundamental. A utilização da energia solar reduz a pressão sobre as usinas hidrelétricas e termelétricas, fontes convencionais de geração com impactos significativos no meio ambiente (SILVA, 2015). Ao promover a geração a partir de fontes renováveis, a microgeração contribui para a preservação de recursos naturais e para o cumprimento dos compromissos internacionais de redução de emissões assumidos pelo Brasil.

Além de beneficiar o meio ambiente, a microgeração fotovoltaica favorece a segurança energética do país. Com um sistema elétrico mais diversificado, que incorpora a geração distribuída, o Brasil se torna menos vulnerável a crises hídricas e a flutuações nos preços da energia (ANEEL, 2020). Essa diversificação reduz a dependência de grandes usinas e possibilita um suprimento mais estável e confiável, essencial ao crescimento econômico.

Os incentivos regulatórios também têm promovido a inovação tecnológica no setor. A crescente demanda por sistemas fotovoltaicos impulsiona o desenvolvimento de células de alta eficiência e de sistemas de armazenamento de energia, que tornam a microgeração mais atraente e acessível (FONTES, 2018), além de contribuírem para a redução dos custos de instalação e manutenção.

O impacto econômico da microgeração vai além das contas de energia. A indústria solar tem gerado empregos e promovido o crescimento de pequenas e médias empresas especializadas em instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos, o que pode resultar em milhares de novos postos de trabalho e estimular a economia local e nacional (NASCIMENTO, 2019).

Assim, a microgeração fotovoltaica representa uma estratégia eficaz para promover a sustentabilidade e reduzir custos no Brasil. A combinação de incentivos regulatórios, benefícios econômicos e avanços tecnológicos torna essa forma de geração uma opção viável e com potencial para se tornar peça fundamental na transformação da matriz energética do país.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo baseia-se em uma análise técnica e na avaliação econômica da viabilidade de uma usina fotovoltaica de microgeração com potência de 75,26 kWp, implantada em uma fazenda com o objetivo de suprir a demanda de energia de um supermercado. O estudo foi conduzido em etapas, desde a coleta e a análise de dados técnicos sobre a geração projetada até a análise de custo-benefício por meio de indicadores econômicos.

Inicialmente, a coleta de dados concentrou-se nas especificações dos equipamentos e nas características ambientais do local da usina. Foram utilizados módulos fotovoltaicos da marca Jinko, com potência individual de 530 W, totalizando 75,26 kWp. A escolha desses módulos fundamentou-se em sua alta eficiência e em seu baixo coeficiente de temperatura (em valor absoluto), que reduz as perdas de potência com o aumento da temperatura. Também foi considerada a tolerância de potência positiva dos módulos, fator que assegura que a geração não seja inferior à nominal.

O inversor selecionado foi o Growatt de 75 kW, responsável por converter a corrente contínua gerada pelos módulos em corrente alternada, compatível com a rede de distribuição. Como a usina está

instalada na fazenda, a energia é injetada na rede e compensada na unidade consumidora do supermercado, na modalidade de autoconsumo remoto. A seleção do inversor baseou-se em sua capacidade de suportar a potência total dos módulos e em sua elevada eficiência, que minimiza as perdas de conversão. A configuração adotada é de 142 módulos de 530 W, totalizando 75,26 kWp em corrente contínua, resultando em uma relação entre as potências CC e CA de aproximadamente 1,00, considerando o inversor Growatt de 75 kW.

A localização geográfica da fazenda foi decisiva para a projeção da geração, tendo sido considerada uma irradiação média diária equivalente a 5,15 horas de sol pleno (HSP), ou seja, 5,15 kWh/m² por dia. Esse valor foi obtido com base em dados regionais e reflete as condições solares do local de instalação, incluindo fatores como latitude, altitude e orientação dos módulos. Esses elementos são cruciais para estimar a geração mensal esperada, estabelecida em 9.302,14 kWh, volume capaz de suprir parte significativa da demanda do supermercado. Na projeção da geração, foram incluídas perdas de aproximadamente 20%, correspondentes a ineficiências típicas do sistema, como sombreamento eventual, acúmulo de sujeira, temperatura e outras condições que afetam o desempenho dos módulos. A estimativa segue E = 75,26 kWp × 5,15 h/dia × 30 dias × 0,80 = 9.302,14 kWh/mês. Trata-se de estimativa simplificada, sujeita à validação por simulação ou dados medidos.

Para a análise econômica, foram levantados o investimento inicial e os custos operacionais ao longo da vida útil do projeto. O investimento inicial abrange os módulos fotovoltaicos, o inversor, as estruturas de suporte e o cabeamento, além da instalação e do comissionamento da usina. Esses valores foram obtidos a partir de proposta comercial e ajustados à realidade do setor. A projeção dos custos de manutenção considerou práticas usuais para sistemas fotovoltaicos, incluindo inspeções periódicas, limpeza dos módulos e manutenção preventiva e corretiva, com intervenções semestrais. O inversor, por ter vida útil mais curta, foi considerado para substituição após um período de 10 a 15 anos, custo incorporado como provisão anual para substituição de componentes.

A vida útil dos módulos foi considerada de 25 anos, prazo amplamente aceito e respaldado pelas garantias dos fabricantes. Essa durabilidade é fundamental para o cálculo do retorno do investimento, uma vez que, quanto mais longa a vida útil, maior o período de economia. Em contrapartida, o inversor, por apresentar vida útil menor, demanda planejamento de substituição ou atualização tecnológica ao longo do ciclo de vida da usina.

A análise econômica foi realizada a partir de indicadores financeiros, sendo o período de retorno simples (*payback*) e o retorno sobre o investimento (ROI) os principais instrumentos aplicados. O *payback* simples corresponde ao tempo necessário para que o supermercado recupere o valor investido por meio da economia líquida obtida na conta de energia, calculado pela razão entre o investimento inicial e a economia líquida anual. O ROI mede a rentabilidade do investimento, relacionando o ganho líquido gerado pelo sistema ao montante investido; neste trabalho, ele foi expresso em base anual (economia líquida anual dividida pelo investimento) e acumulado ao longo da vida útil de 25 anos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A instalação da usina fotovoltaica de 75,26 kWp constitui uma medida estratégica para o supermercado objeto deste estudo, que busca reduzir de forma expressiva seus custos operacionais por meio da substituição parcial ou total da energia adquirida da distribuidora pela energia solar gerada na fazenda. A geração mensal projetada, de aproximadamente 9.302,14 kWh, indica que o sistema é capaz de suprir parte significativa da demanda do estabelecimento, resultando em economia direta nas despesas com eletricidade.

Com uma tarifa média de R$ 0,70 por kWh, a economia mensal estimada atinge R$ 6.511,50 (seis mil, quinhentos e onze reais e cinquenta centavos), o que totaliza uma economia bruta anual de R$ 78.138,00 (setenta e oito mil, cento e trinta e oito reais), conforme a Tabela 1. Esses valores evidenciam a autonomia proporcionada pela geração distribuída, que atenua os impactos das variações tarifárias do mercado de energia brasileiro, especialmente das bandeiras tarifárias. Nos períodos de bandeira vermelha, quando os custos de energia aumentam consideravelmente, a geração própria garante maior previsibilidade financeira e protege o supermercado das oscilações de custo do fornecimento convencional, permitindo um planejamento orçamentário mais seguro.

Tabela 01: Projeção de economia anual de energia.

Item	Valor
Geração média mensal estimada (kWh)	9.302,14
Tarifa média (R$/kWh)	0,70
Economia mensal (R$)	6.511,50
Economia bruta anual (R$)	78.138,00

Fonte: dados da pesquisa (2024).

A análise de viabilidade é complementada pelos indicadores de *payback* e de retorno sobre o investimento. O investimento inicial estimado para a instalação do sistema é de R$ 500.000,00 (quinhentos mil reais). Contudo, a viabilidade financeira depende também dos custos de operação e manutenção, que, embora relativamente baixos em sistemas fotovoltaicos, incluem inspeções periódicas, manutenção preventiva e eventuais reparos, especialmente no inversor, cuja vida útil é menor que a dos módulos. A Tabela 2 detalha esses custos, estimados em R$ 10.000,00 (dez mil reais) anuais.

Tabela 02: Projeção de custos anuais de operação e manutenção.

Item	Custo anual (R$)
Manutenção preventiva	2.500,00
Manutenção corretiva	1.500,00
Inspeções periódicas	1.000,00
Substituição de componentes (provisão)	5.000,00
Total anual	**10.000,00**

Fonte: dados da pesquisa (2024).

Descontados os custos de operação e manutenção, a economia líquida anual é de R$ 68.138,00 (sessenta e oito mil, cento e trinta e oito reais). Com esse valor, o *payback* simples do projeto é de aproximadamente 7,34 anos (R$ 500.000,00 ÷ R$ 68.138,00), e o retorno anual simples sobre o investimento é de 13,63%, conforme a Tabela 3. Considerando a vida útil de 25 anos dos módulos, o ROI acumulado no período atinge 240,69%. Os indicadores são estimativas simplificadas, sem consideração de degradação dos módulos, atualização tarifária, regras de compensação ou valor do dinheiro no tempo.

Tabela 03: Indicadores econômicos do sistema fotovoltaico.

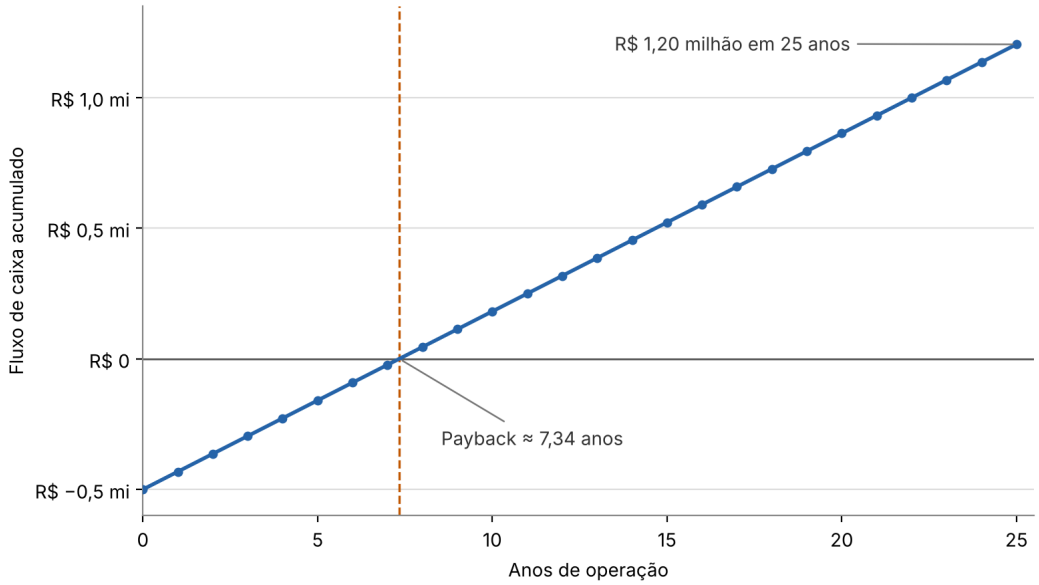
Item	Valor
Custo total de instalação (R$)	500.000,00
Economia bruta anual com energia (R$)	78.138,00
Custos anuais de operação e manutenção (R$)	10.000,00
Economia líquida anual (R$)	68.138,00
Payback simples (anos)	7,34
Retorno anual simples (%)	13,63
ROI acumulado em 25 anos (%)	240,69

Fonte: dados da pesquisa (2024).

Embora superior ao limite de cinco anos que Mello e Azevedo (2021) consideram altamente atrativo para instalações fotovoltaicas em contextos comerciais, o *payback* de 7,34 anos corresponde a menos de 30% da vida útil projetada dos módulos, de aproximadamente 25 anos. Assim, após a recuperação do investimento, o sistema continuará gerando economia líquida por cerca de 17,7 anos, convertida em resultado operacional para o supermercado.

O Gráfico 1 apresenta a evolução do fluxo de caixa acumulado ao longo de 25 anos de operação do sistema, partindo do investimento inicial de R$ 500.000,00 e considerando a economia líquida anual de R$ 68.138,00 (sessenta e oito mil, cento e trinta e oito reais). A linha vertical indica o ponto de payback, em aproximadamente 7,34 anos, momento em que o investimento inicial é integralmente recuperado. A partir desse marco, o sistema passa a gerar economia líquida para o supermercado.

Gráfico 01: Fluxo de caixa acumulado do sistema fotovoltaico em 25 anos.



Fonte: elaboração própria (2024).

Com *payback* de 7,34 anos e vida útil de 25 anos, o supermercado poderá usufruir de aproximadamente 17,7 anos de economia líquida, com saldo acumulado superior a R$ 1,2 milhão ao final do período (R$ 1.203.450,00 – um milhão, duzentos e três mil, quatrocentos e cinquenta reais). Esses resultados ressaltam a relevância dos sistemas fotovoltaicos como estratégia financeira sólida e sustentável para empresas do setor comercial.

A geração própria reduz a dependência da energia da distribuidora, sujeita a flutuações tarifárias frequentes devido a fatores externos, como crises hídricas e variações sazonais da demanda. Essa configuração possibilita ao supermercado uma economia mensal consistente e previsível. Em contextos de bandeiras tarifárias elevadas, a usina solar atua como proteção econômica, amortecendo os aumentos de custo. Pinho e Galhardo (2021) apontam que a autossuficiência energética é estratégica para negócios comerciais, pois proporciona maior controle orçamentário, especialmente em atividades intensivas em energia.

A previsibilidade financeira proporcionada pela usina é essencial para setores com margens de lucro reduzidas, como o supermercadista. A substituição de parte da energia adquirida da distribuidora pela geração solar reduz os custos operacionais fixos e aumenta a proteção contra oscilações econômicas externas. Segundo Santos e Silva (2019), essa independência tarifária se traduz em um ativo econômico tangível, pois as despesas com energia se estabilizam ao longo do tempo, permitindo à empresa preservar suas margens operacionais e consolidar sua competitividade.

A comparação entre os custos da energia solar e os das fontes convencionais evidencia a vantagem da energia fotovoltaica em termos de estabilidade e de custo total de propriedade. Diferentemente de fontes como carvão, gás natural e petróleo, sujeitas a instabilidades geopolíticas e à volatilidade de preços, a energia solar concentra seu custo no investimento inicial, com baixos custos operacionais posteriores.

Como destacam Ribeiro e Lima (2022), essa estabilidade é uma vantagem competitiva para setores que buscam previsibilidade econômica.

Além dos benefícios econômicos diretos, a instalação da usina agrega valor intangível ao estabelecimento, posicionando-o como um negócio ambientalmente responsável, postura cada vez mais valorizada pelos consumidores. Em termos ambientais, a substituição de parte da energia convencional pela solar reduz a pegada de carbono da operação do supermercado. O estudo de Soares, Vieira e Barbosa (2021) evidencia que a geração solar é uma das soluções mais eficazes para reduzir as emissões de CO_2 em atividades comerciais.

Embora os resultados indiquem a viabilidade econômica do projeto, é importante destacar suas limitações. A geração solar depende diretamente da disponibilidade de radiação, que pode ser afetada por períodos prolongados de chuva ou de alta nebulosidade, além de variações sazonais do ângulo de incidência solar, o que pode reduzir a geração mensal prevista e, consequentemente, a economia esperada.

Recomenda-se, por isso, a limpeza regular dos módulos e o monitoramento contínuo do desempenho. Além disso, a análise econômica realizada é simplificada: não considera a degradação anual dos módulos, o reajuste das tarifas, o valor do dinheiro no tempo (VPL e TIR) nem a cobrança gradual pelo uso da rede prevista na Lei nº 14.300/2022, fatores que podem alterar o prazo de retorno.

5. CONCLUSÕES

A análise da viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica de 75,26 kWp para suprir parte do consumo de energia de um supermercado indicou economia líquida anual de R$ 68.138,00 (sessenta e oito mil, cento e trinta e oito reais), *payback* simples de aproximadamente 7,34 anos e saldo acumulado superior a R$ 1,2 milhão ao longo de 25 anos. Além da redução dos custos operacionais, o estudo ressalta o papel estratégico da geração própria: ao reduzir a exposição às oscilações tarifárias, o projeto oferece ao supermercado estabilidade financeira e vantagem competitiva, consolidando-se como solução econômica e sustentável para o setor comercial.

Além dos benefícios econômicos, a implantação de sistemas fotovoltaicos reforça o compromisso ambiental da empresa, com redução da pegada de carbono e incentivo ao uso de fontes limpas e renováveis. Essa abordagem também gera impactos sociais positivos, como a criação de empregos no setor de energia renovável, especialmente em instalação, manutenção e inovação tecnológica, e contribui para o cumprimento de metas ambientais nacionais e internacionais, como as estabelecidas pelo Acordo de Paris.

Com base nos resultados, recomenda-se expandir esse modelo para outros setores de alta demanda energética, como indústrias, hospitais e instituições de ensino, priorizando regiões com maior incidência solar, onde o desempenho dos sistemas pode ser otimizado. Estudos futuros podem aprofundar a análise econômica com indicadores como VPL e TIR, incorporar a degradação dos módulos, o reajuste tarifário e as regras da Lei nº 14.300/2022, quantificar as emissões evitadas e explorar a integração com outras fontes renováveis, como a eólica.

A geração solar, portanto, apresenta-se como solução robusta, economicamente viável e socialmente relevante, com potencial de expansão e inovação, contribuindo para a eficiência operacional das empresas e para o desenvolvimento econômico e ambiental.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. F. A energia solar fotovoltaica no Brasil: análise de viabilidade econômica. **Revista Brasileira de Energia Renovável**, v. 3, n. 1, p. 45-58, 2018.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, DF: ANEEL, 2012.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Brasília, DF: ANEEL, 2015.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório anual 2020**. Brasília, DF: ANEEL, 2020.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 7 jan. 2022.

CABRAL, T. M.; TORRES, F. A.; SENNA, C. F. O potencial da energia solar no Brasil: desafios e oportunidades. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 9, n. 2, p. 127-140, 2013.

FONTES, D. M. Tecnologia de energia solar: tendências e inovações. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 2, p. 101-115, 2018.

MELLO, R. M.; AZEVEDO, J. F. Sustentabilidade e eficiência energética: uma análise de práticas em supermercados. **Revista de Administração e Negócios**, v. 22, n. 4, p. 50-66, 2021.

NASCIMENTO, L. A. O mercado de energia solar fotovoltaica no Brasil: uma análise da evolução e perspectivas. **Journal of Renewable Energy Research**, v. 10, n. 4, p. 1857-1870, 2019.

PINHO, L. S.; GALHARDO, M. R. Autossuficiência energética e suas implicações econômicas. **Revista de Políticas Energéticas**, v. 15, n. 1, p. 112-126, 2021.

RIBEIRO, T.; LIMA, C. A. Análise dos custos da energia solar em comparação com fontes convencionais. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 6, n. 2, p. 30-45, 2022.

SANTOS, A. C. O sistema de compensação de energia elétrica: um estudo sobre a regulamentação da microgeração no Brasil. **Revista de Política Energética**, v. 4, n. 2, p. 57-71, 2016.

SANTOS, E. S.; SILVA, M. R. Autonomia tarifária e seus impactos na competitividade de empresas. **Journal of Business Management**, v. 8, n. 2, p. 90-104, 2019.

SILVA, R. P. Sustentabilidade e energia: a importância da geração distribuída. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento**, v. 15, n. 1, p. 20-34, 2015.

SOARES, F. R.; VIEIRA, A. L.; BARBOSA, R. C. Energias renováveis e suas contribuições para a sustentabilidade: um estudo sobre a energia solar. **Revista de Sustentabilidade e Inovação**, v. 5, n. 3, p. 145-160, 2021.