

METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO EM PROPRIEDADES AGRÍCOLAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA FOCADA EM SISTEMAS HÍBRIDOS E COMPLEMENTARES

**METHODOLOGIES FOR ENERGY PERFORMANCE ASSESSMENT IN
AGRICULTURAL PROPERTIES: A SYSTEMATIC REVIEW FOCUSED ON
HYBRID AND COMPLEMENTARY SYSTEMS**

Ciências Sociais Aplicadas • 14/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/789313679](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/789313679)

Rafael Fagundes Mirailh¹

Julio Cezar Mairesse Siluk²

RESUMO

O setor agrícola, essencial para a segurança alimentar, depende fortemente do consumo de energia elétrica. Diante dos desafios climáticos e do crescimento populacional, torna-se urgente a adoção de práticas mais sustentáveis e eficientes. A transição para uma agricultura de baixo carbono exige o uso de fontes renováveis e o diagnóstico adequado do desempenho energético das propriedades. Este artigo realiza uma revisão sistemática da literatura (RSL) com o objetivo de sintetizar metodologias de avaliação energética aplicadas à agricultura, com ênfase em sistemas híbridos baseados em energias renováveis. A busca foi conduzida nas bases Scopus e Web of Science, considerando artigos publicados a partir de 2011, em inglês, português e espanhol, resultando em 43 artigos de alta relevância. As metodologias identificadas incluem DEA (eficiência relativa), LCA (impactos ambientais), EROI/EEEI (eficiência energética-econômica), SEM (relações causais), ARDL (séries temporais) e AHP (análise multicritério). Também foram identificadas aplicações de ferramentas de Inteligência Artificial e Machine Learning na gestão de microgrids agrícolas. Apesar da variedade metodológica, observa-se a ausência de abordagens capazes de capturar, de forma integrada e em tempo real, a intermitência e a complementaridade dos sistemas energéticos modernos. Conclui-se que há uma lacuna metodológica relevante e que futuras pesquisas devem avançar no desenvolvimento de modelos dinâmicos e integrados, incorporando critérios energéticos, econômicos, ambientais e sociais. O uso combinado de inteligência artificial, otimização e métodos multicritério se apresenta como caminho promissor para o aprimoramento do diagnóstico energético no meio rural.

Palavras-chave: Agricultura Sustentável; Diagnóstico Energético; Eficiência Energética; Inteligência Artificial; Sistemas Híbridos.

ABSTRACT

The agricultural sector, essential for food security, is heavily reliant on electricity consumption. In the face of climatic challenges and population growth, the adoption of more sustainable and efficient practices becomes urgent. The transition to low-carbon agriculture requires the use of renewable sources and an appropriate diagnosis of the energy performance of farms. This article conducts a systematic literature review (SLR) to synthesize methodologies for energy assessment applied to agriculture, with an emphasis on hybrid systems based on renewable energies. The search was conducted in the Scopus and Web of Science databases, considering articles published since 2011, in English, Portuguese, and Spanish, resulting in 43 highly relevant articles. The identified methodologies include DEA (relative efficiency), LCA (environmental impacts), EROI/EEEl (energy-economic efficiency), SEM (causal relations), ARDL (time series), and AHP (multi-criteria analysis). Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning tools in the management of agricultural microgrids were also identified. Despite the methodological variety, there is a noticeable absence of approaches capable of capturing, in an integrated and real-time manner, the intermittency and complementarity of modern energy systems. It is concluded that there is a relevant methodological gap and that future research should advance in the development of dynamic and integrated models, incorporating energy, economic, environmental, and social criteria. The combined use of artificial intelligence, optimization, and multi-criteria methods presents itself as a promising path for improving energy diagnosis in rural areas.

Keywords: Artificial Intelligence; Energy Efficiency; Energy Diagnosis; Hybrid Systems; Sustainable Agriculture.

1. INTRODUÇÃO

O setor agrícola é fundamental para a segurança alimentar global e o desenvolvimento econômico, e é intrinsecamente ligado ao consumo de energia elétrica. A energia desempenha um papel crucial em diversas operações agrícolas, desde o preparo do solo, irrigação e colheita até o processamento e transporte dos produtos. Com os crescentes desafios impostos pelas mudanças climáticas, a escassez de recursos e o aumento populacional, torna-se imperativo buscar práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes em termos energéticos (Borychowski et al., 2022; García-Agüero et al., 2023; Raihan et al., 2023.). A transição para uma agricultura de baixo carbono e a busca pela neutralidade de carbono, como observado na União Europeia e na China, destacam a urgência em otimizar o consumo de energia e promover a eficiência energética no agronegócio. O aumento da eficiência energética e o uso de fontes renováveis são fatores determinantes para a agricultura de baixo carbono (Borychowski et al., 2022; Raihan et al., 2023; Stativka & Lialina, 2017).

Nos últimos anos, o uso de tecnologias digitais, como sensores inteligentes e inteligência artificial, tem ampliado as possibilidades de monitoramento e gestão da energia em ambientes rurais, favorecendo a precisão e a sustentabilidade na agricultura (Babar & Akan, 2024). Para avançar nessa direção, é essencial diagnosticar e avaliar o desempenho energético das propriedades agrícolas. Diversas metodologias têm sido propostas e aplicadas para analisar o consumo e a eficiência elétrica na agricultura (Stativka & Lialina, 2017). Estas incluem a análise da eficiência energética, o uso de indicadores como o *Energy Return on Investment* (EROI) e a Análise de Eco-eficiência (Moutinho et al., 2018), frequentemente empregando abordagens como a Análise Envoltória de Dados (DEA) (Simar & Wilson, 2007; Lauwers, 2009; Picazo-Tadeo et al., 2011).

Adicionalmente, garantir conectividade e integração de sistemas em áreas rurais remotas, especialmente para gerenciamento de dados de energia, requer arquiteturas tecnológicas confiáveis e economicamente viáveis, como soluções baseadas em LPWAN ou 5G adaptadas ao contexto agrícola (Rafsanjani et al., 2025). A análise *Emergy* também surge como uma medida para avaliar o impacto ambiental associado ao uso de energia no cultivo. No entanto, a literatura aponta para a dificuldade em estabelecer bases metodológicas uniformes para análises energéticas, e muitos estudos tendem a tratar a eficiência econômica e energética de forma separada. A avaliação da eficiência energética em sistemas agrícolas exige a combinação de conhecimento biológico, técnico e econômico, e a necessidade de uma abordagem abrangente que integre múltiplos aspectos é reconhecida.

Uma via promissora para aumentar a sustentabilidade e reduzir a pegada de carbono na agricultura é a integração de fontes de energia renováveis e limpas (Megyesiova et al., 2023; Raihan et al., 2023; Borychowski et al., 2022; Mustafa et al., 2022). Sistemas híbridos, que combinam fontes como energia eólica, solar fotovoltaica (PV), pequenas centrais hidrelétricas ou outras fontes complementares, juntamente com sistemas de armazenamento ou a rede elétrica, estão ganhando relevância no contexto agrícola, inclusive para aplicações como irrigação rural (Kraiem et al., 2022; Mustafa et al., 2022). O modelo de desenvolvimento baseado em "múltiplas fontes complementares de energia limpa + agricultura" é visto como tendo implicações significativas para o desenvolvimento verde sustentável (Raihan et al., 2023). Embora as energias renováveis, como a solar e a eólica, possam ser economicamente eficientes e ambientalmente amigáveis, a integração coordenada e a estratégia operacional de sistemas híbridos, especialmente em

microgrids destinadas a instalações agrícolas, apresentam complexidades consideráveis (Yao et al., 2024). A avaliação do desempenho e a gestão estratégica desses sistemas demandam metodologias de diagnóstico específicas e adaptadas (Mustafa et al., 2022; Kraiem et al., 2022; Stativka & Lialina, 2017).

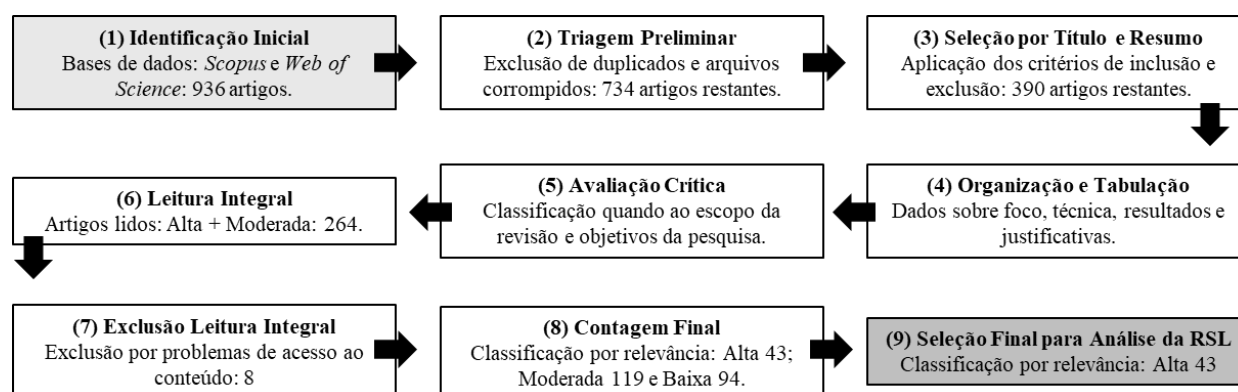
Dada a importância crítica da eletricidade na agricultura, a crescente adoção de sistemas energéticos híbridos e complementares baseados em renováveis, e a necessidade de ferramentas para avaliar seu desempenho, uma revisão sistemática das metodologias de diagnóstico energético aplicáveis em propriedades agrícolas é justificada. O presente artigo tem como objetivo sintetizar o conhecimento existente sobre as metodologias de avaliação de desempenho energético empregadas no setor agrícola, com foco particular nas abordagens relevantes para a análise de sistemas energéticos híbridos e complementares. Adicionalmente, busca-se analisar criticamente a aplicabilidade, as limitações e as lacunas dessas metodologias, especialmente na sua capacidade de capturar a natureza dinâmica, a intermitência e a complementaridade de sistemas energéticos modernos. Ao mapear e discutir as metodologias existentes, esta revisão busca identificar lacunas de pesquisa e contribuir para o aprimoramento das ferramentas disponíveis para promover a eficiência e a sustentabilidade energética na produção agrícola (Raihan et al., 2023; Borychowski et al., 2022; Mustafa et al., 2022; Stativka & Lialina, 2017).

Este artigo está estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 2 descreve os procedimentos metodológicos adotados. O Capítulo 3 apresenta os resultados obtidos. O Capítulo 4 dedica-se à discussão e ao desenvolvimento de proposições teóricas. Por fim, o Capítulo 5 reúne as considerações finais deste estudo.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para garantir a sistematização e a coerência metodológica da presente Revisão Sistemática da Literatura (RSL), seguiram-se etapas bem definidas para a seleção e análise dos artigos científicos conforme detalhado no Protocolo da Revisão Sistemática de Literatura (Apêndice A). O processo (Figura 1) foi delineado para identificar, selecionar, avaliar e sintetizar estudos relevantes sobre a avaliação de desempenho elétrico em áreas rurais.

Figura 1. Fluxo da Revisão Sistemática de Literatura



Fonte: autor.

Inicialmente, estabeleceu-se o tema central da pesquisa e a hipótese norteadora, que serviram de base para a definição dos critérios de inclusão e exclusão. Esses critérios orientaram todo o processo de seleção dos estudos. Em seguida, foram definidas as informações relevantes a serem extraídas dos artigos selecionados, assegurando que os dados coletados fossem pertinentes para responder aos objetivos da pesquisa.

O processo de seleção dos estudos que compuseram esta RSL foi conduzido com o objetivo de garantir a qualidade metodológica e a relevância temática dos trabalhos analisados. A busca inicial foi realizada nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science* (WoS),

utilizando uma combinação de descritores diretamente relacionados ao tema central da pesquisa. Para tanto, foi elaborada uma *string* que combinava termos vinculados à eficiência energética, fontes renováveis e desempenho no contexto agrícola: *("energy efficiency" OR "energy diagnosis" OR "energy performance assessment" OR "hybrid energy systems" OR "renewable energy sources") AND ("agriculture" OR "farms" OR "agricultural sector" OR "agribusiness") AND ("sustainability" OR "environmental impact" OR "competitiveness" OR "economic performance")*. Essa etapa resultou na identificação de 936 publicações potencialmente pertinentes, que compuseram o ponto de partida para a triagem e análise subsequentes.

Após a importação para os gerenciadores de referência *Mendeley*, 202 registros foram eliminados por duplicidade ou por apresentarem arquivos corrompidos, reduzindo o número de estudos elegíveis para 734. Com base nos critérios de inclusão e exclusão definidos previamente no protocolo da revisão, procedeu-se à triagem por meio da leitura dos títulos e resumos. Apenas trabalhos publicados integralmente a partir de 2011, com foco explícito na avaliação de desempenho energético no meio rural, foram considerados. Também se adotou como critério a publicação em periódicos de elevado rigor acadêmico, especialmente aqueles classificados entre A1 e A4 no sistema de avaliação da CAPES, com destaque para revistas como *Applied Energy*, *Energies*, *Energy Economics*, *Journal of Rural Studies* e *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Foram excluídos artigos indisponíveis em texto completo, fora do escopo temático, ou publicados em periódicos que não atendiam aos parâmetros estabelecidos. Quanto aos idiomas, a busca e a seleção foram limitadas a artigos disponíveis em inglês, português e espanhol.

A partir dessa triagem inicial, 390 artigos foram considerados suficientemente alinhados ao escopo da pesquisa. Esses estudos foram organizados em uma planilha eletrônica estruturada como formulário de extração de dados, contendo informações-chave como foco do estudo, aspectos técnicos abordados, principais resultados e justificativas teóricas, permitindo a síntese e posterior análise crítica.

Dando continuidade ao processo, realizou-se a leitura integral dos artigos e a análise de aderência aos objetivos da pesquisa, classificando-os conforme o grau de relevância identificado: alta, moderada ou baixa. Desse grupo, 264 artigos passaram à etapa de análise aprofundada, sendo que, durante a leitura detalhada, outros oito estudos foram descartados por limitações de acesso ao conteúdo completo, ou por se tratar apenas de resumos de eventos ou fóruns sem informações suficientes.

Encerrando o processo de triagem, consolidou-se um corpus de 256 artigos completos, categorizados em três níveis de relevância: 43 de alta relevância, 119 de relevância moderada e 94 considerados de baixa relevância. Para garantir o alinhamento máximo com os objetivos da revisão, apenas os 43 artigos classificados como de alta relevância foram selecionados para compor a base analítica final.

Para orientar a avaliação qualitativa dos estudos incluídos na RSL, foram estabelecidos critérios de relevância baseados na aderência dos artigos ao objetivo deste artigo. Com base nesses parâmetros, três perguntas-chave foram formuladas para guiar a análise: (1) o artigo contribui diretamente para responder à questão de pesquisa? (2) está alinhado ao objetivo geral? e (3) aborda de forma clara um ou mais dos objetivos específicos? A classificação da relevância foi

realizada conforme o número de respostas positivas, conforme sintetizado no Quadro 1.

Quadro 1. Critérios de classificação de relevância de artigo

Nível de Relevância	Critério de Classificação	Justificativa
Alta Relevância	O artigo responde às três das seguintes perguntas-chave: 1. O estudo contribui diretamente para responder à questão de pesquisa? 2. O estudo está alinhado ao objetivo geral do artigo? 3. O estudo aborda de forma explícita um ou mais dos objetivos específicos propostos?	Esses artigos demonstram aderência metodológica, conceitual e temática aos eixos centrais da pesquisa. São fundamentais para a construção teórica e prática do modelo de diagnóstico.
Relevância Moderada	O artigo atende a duas das três perguntas acima.	Esses estudos oferecem subsídios relevantes, mas parciais, para o desenvolvimento do modelo, por exemplo, foco em metodologias aplicáveis ou em setores agrícolas relacionados.
Baixa Relevância	O artigo atende apenas a uma ou nenhuma das três perguntas.	Apesar de possuírem relação geral com energia ou agricultura, esses estudos não contribuem diretamente para os objetivos centrais da pesquisa e foram mantidos apenas para contextualização mais ampla.

A análise desse conjunto permitiu não apenas a identificação dos principais achados presentes na literatura contemporânea sobre diagnóstico energético em áreas rurais, mas também a sistematização crítica das abordagens metodológicas empregadas, contribuindo para o avanço do conhecimento na área e fornecendo subsídios teóricos para o desenvolvimento de novos modelos aplicáveis à realidade das propriedades agrícolas. Com base nessa análise, foram ainda formuladas proposições teóricas que sintetizam as principais lacunas, tendências e direções futuras identificadas na literatura, as quais estão descritas na seção final desta revisão. Os 43 artigos classificados como de alta relevância, que compuseram o corpus analítico final desta RSL, encontram-se listados no Apêndice B, juntamente com as respectivas informações técnicas e justificativas de inclusão.

3. RESULTADOS DA RSL

A eficiência energética na agricultura é um tema crítico, e seu diagnóstico requer abordagens sistemáticas para gerenciar racionalmente o consumo de energia nos sistemas produtivos. A literatura na área de economia agrícola reflete a necessidade de medir, avaliar e identificar os determinantes do consumo e da eficiência energética em fazendas, especialmente no contexto da União Europeia (UE). Historicamente, os estudos têm focalizado separadamente a eficiência econômica ou a eficiência energética, o que evidencia a importância de abordagens integradas.

Uma premissa conceitual fundamental é a avaliação energético-econômica ou bioenergética, que busca comparar custos e resultados com base em unidades de energia, permitindo análises independentes de fatores externos como mercado, país ou período

histórico (Pimentel, 2008; Bazarov et al., 1980; Alizadeh e Avami, 2021). Essa metodologia compara a quantidade de energia acumulada nos produtos (colheita ou produto animal) com a energia total gasta na produção, permitindo análises padronizadas entre diferentes sistemas de produção.

Adotar uma abordagem sistêmica é essencial nesse contexto, tratando a fazenda como um sistema que transforma energia acumulada em insumos (entradas) — investida propositalmente por humanos — em energia útil contida nos produtos vendidos (saídas), sejam eles de origem vegetal ou animal. Essa concepção, presente em autores como Odum (1983) e Gołębiewska (2010), permite avaliar a eficácia da conversão de energia investida em energia de produto, incorporando também aspectos econômicos. Coeficientes energéticos específicos são utilizados para quantificar consumo e produção de energia em diferentes atividades agrícolas, o que embasa a construção de indicadores comparativos.

Diversas metodologias e ferramentas têm sido aplicadas para realizar o diagnóstico energético e avaliar a eficiência no agronegócio. As principais abordagens identificadas estão sistematizadas no Quadro 2, com base nos 43 artigos de alta relevância selecionados na RSL (Apêndice B), que compõem o corpus analítico desta pesquisa.

Quadro 2. Principais metodologias para avaliação de desempenho elétrico

Metodologia	Descrição	Aplicações Destacadas	Referências
DEA (Data Envelopmen	Avalia eficiência relativa entre	Fazendas, setores agrícolas,	Iribarren et al. (2011); Bassett-

t Analysis)	unidades de decisão utilizando múltiplos inputs/outputs	eficiência energética e ambiental	Mens C et al. (2009); Jan et al. (2012); Vlontzos et al. (2014); Ghali et al. (2016); Mohammadi et al. (2013); Charnes et al. (1978); Banker et al. (1984); Simar & Wilson (2007); Lauwers (2009); Picazo-Tadeo et al. (2011); Vázquez-Rouze et al. (2012); Kuceca & Chmielarz (2021); Gomelga; Benedik et al. (2023);
AHP (Analytic Hierarchy Process)	Técnica utilizada dentro dos Métodos de Tomada de Decisão Multicritério (MCDM). Ajuda avaliar e ponderar múltiplos critérios (técnicos, sociais, ambientais, econômicos) para auxiliar na tomada de decisão. Atua na atribuição de pesos a esses critérios.	Utilizado para determinar locais adequados para instalação de infraestruturas energéticas, como parques eólicos. Relevante para avaliação abrangente de sistemas agrícolas ao considerar e ponderar múltiplos critérios. Sugerido para seleção e otimização de mix energéticos e tecnologias em propriedades agrícolas.	Konstantinos et al. (2019); García-Agüero et al. (2023); Xentitids et al. (2023)

LCA (Life Cycle Assessment)	Avalia impactos ambientais ao longo do ciclo de vida	Mensura Gases do Efeito Estufa (GEE), eutrofização, acidificação, resíduos agrícolas	Iribarren et al. (2011); Bassett-Mens C et al. (2009); Jan et al. (2012); Vázquez-Rouze et al. (2012); Mohesni, P. et al. (2018); Ullah, A. et al. (2016); Mohammadi, A. et al. (2013:02015); Laso et al. (2016); Havrysh et al. (2019); Saling, P. et al. (2002); entre outros.
EROI / EEEI (Energy Return on Investment / Economic and Energy Efficiency Index)	Relação entre energia obtida e energia investida / integra aspecto econômico	Produção de alimentos, comparação entre tipos de fazenda	Marcin Wysokiński (2021); Bogdan Klepacki (2021); Piotr Gradziak (2021); Magdalena Galonoko (2020); Pimentel et al. (2013); Pellegrini & Fernández (2018); Bazarov et al. (1982: 1985).
SEM (Structural Equation Modeling)	Modelagem de equações estruturais para relações entre variáveis latentes	Agricultura de baixo carbono, eficiência energética	Brow (2015); Hooper et al. (2008); Garson (2015); Brown and Moore (2012); entre outros.
ARDL (Autoregressive Distributed Lag Models)	Modelos econométricos para séries temporais e análise de	Emissões de carbono, PIB agrícola, uso de energia	Pesaran, Shin. et al (2001); Raihan (2023); Voumik (2022); Mohajan (2023); Rahman (2023), Zaman

	longo/curto prazo		(2023), Galasti et al. (2023), Galanopoulos (2011), Dogan (2016a, 2016b)
Análise de Energia	Avalia o uso do ambiente com base na energia solar equivalente acumulada. Permite comparar sistemas de produção considerando fontes renováveis e não renováveis. Considera o impacto da degradação do solo. Mede o impacto ambiental associado ao uso de energia no cultivo.	Avaliação do impacto ambiental associado ao uso de energia em sistemas agrícolas. Comparação da sustentabilidade de diferentes sistemas de produção agrícola.	Brandt-Williams (2002); Szargut (2007); Lewandowska-Czarneka et al. (2019); Jankowiak & Miedziekio (2009); Ghaley & Porter (2013); outros.

Fonte: autor.

A análise dos artigos selecionados permitiu identificar uma diversidade de metodologias aplicadas à avaliação do desempenho energético em propriedades agrícolas, conforme resumido no Quadro 2. As seções que se seguem aprofundam as abordagens mais recorrentes na literatura, descrevendo seus fundamentos teóricos, aplicações práticas e relevância no contexto do diagnóstico energético no agronegócio. O objetivo é ampliar a compreensão sobre as ferramentas atualmente disponíveis para mensurar a eficiência e a sustentabilidade energética no meio rural.

3.1. Análise de Envoltória de Dados (DEA – Data Envelopment Analysis)

A metodologia DEA destaca-se como uma das abordagens mais amplamente empregadas na avaliação da eficiência e da ecoeficiência na produção agrícola. Trata-se de uma técnica não paramétrica e determinística que permite considerar, simultaneamente, múltiplos insumos (*inputs*) e produtos (*outputs*), sendo particularmente útil para identificar Unidades de Tomada de Decisão (DMUs), como fazendas, setores agrícolas ou países, que se destacam como eficientes ou ineficientes. Por meio da DEA, é possível estimar desperdícios de energia, avaliar o uso de insumos e estabelecer *benchmarks* para unidades menos eficientes, oferecendo um direcionamento claro sobre como essas podem melhorar seu desempenho.

Essa abordagem tem sido aplicada em diferentes contextos, como na análise de fazendas leiteiras, na avaliação da eficiência do uso de insumos em sistemas agrícolas da União Europeia, e na mensuração da eficiência energética e ambiental em contextos nacionais. Em alguns casos, a DEA foi integrada à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), como na análise da produção de uvas (Vázquez-Rowe et al., 2012), ampliando seu potencial analítico ao capturar impactos ambientais de forma mais abrangente.

Diversos autores têm contribuído significativamente para o desenvolvimento e aplicação da DEA no setor agrícola, como Iribarren et al. (2011), Basset-Mens C. et al. (2009), Jan et al. (2012), Vlontzos et al. (2014), Ghali et al. (2016), Mohammadi et al. (2013), Picazo-Tadeo et al. (2011), Kuceba e Chmielarz (2021), entre outros. A fundamentação teórica da técnica baseia-se nos modelos

originalmente propostos por Charnes et al. (1978) e Banker et al. (1984).

Entretanto, a DEA apresenta limitações importantes. Sua sensibilidade a erros de medição pode comprometer a robustez dos resultados, além de seu caráter relativo: a técnica avalia a eficiência com base nas melhores práticas dentro de uma amostra específica, o que impede a comparação direta de resultados entre diferentes estudos. Ademais, a forma convencional da DEA tende a ignorar variáveis ambientais externas ao sistema analisado, embora versões modificadas já permitam a incorporação desses fatores. Outra limitação frequentemente mencionada é a dificuldade de uso da DEA para testagem de hipóteses estatísticas (Baran, J.; Górecka, A.K., 2019; Domagała, 2021).

Apesar dessas restrições, a DEA permanece como uma ferramenta valiosa, especialmente em estudos que visam comparar o desempenho energético-econômico de unidades operando sob condições similares. Ao permitir a análise detalhada da relação entre múltiplos insumos (inclusive o consumo energético) e os respectivos outputs, a DEA contribui de forma significativa para a identificação de práticas mais eficientes e sustentáveis no contexto agrícola (Borychowski et al., 2022; García-Agüero et al., 2023; Raihan et al., 2023).

3.2. Processo Analítico Hierárquico (AHP – Analytic Hierarchy Process)

O método AHP inserido no conjunto dos Métodos de Tomada de Decisão Multicritério (MCDM – *Multiple-Criteria Decision-Making*), é amplamente utilizado para auxiliar a escolha de locais adequados

para instalações energéticas, como parques eólicos, por meio da ponderação de critérios técnicos, sociais, ambientais e econômicos. O AHP, em particular, atua na atribuição de pesos a tais critérios, oferecendo suporte à decisão em cenários complexos. Embora os estudos revisados, como o de Konstantinos et al. (2019), foquem principalmente em aplicações no planejamento energético regional, os fundamentos conceituais do MCDM se mostram altamente relevantes também para a avaliação integrada de sistemas produtivos agrícolas, dado o seu caráter multidimensional.

Essa metodologia, desenvolvida por Saaty (1977), estrutura o problema hierarquicamente, permitindo a comparação par a par dos critérios e alternativas. Por meio de uma matriz de prioridades, gera-se um conjunto de pesos relativos que expressam a importância atribuída a cada critério envolvido na decisão. Essa característica torna o AHP especialmente útil em situações em que múltiplos fatores devem ser considerados simultaneamente, como ocorre na escolha de fontes energéticas ou tecnologias para o meio rural.

Apesar da escassez de estudos que aplicam diretamente o AHP ao diagnóstico energético em propriedades agrícolas, seu potencial de adaptação para esse contexto é evidente. A avaliação do desempenho energético no agronegócio envolve múltiplas dimensões — técnica, econômica, ambiental e social — o que justifica o uso de metodologias multicritério capazes de integrar essas diferentes perspectivas. A flexibilidade do AHP permite que ele seja ajustado à realidade de cada propriedade, tornando-se uma ferramenta promissora para apoiar decisões sobre investimentos em infraestrutura energética, seleção de fontes (como solar, eólica ou rede convencional) e estratégias de uso eficiente da energia (Kumar & Pant, 2022; Veisi et al., 2022).

Adicionalmente, Kumar e Pant (2022) destacam que uma das principais vantagens do AHP reside em sua capacidade de transformar julgamentos qualitativos de especialistas ou gestores em dados quantitativos, promovendo análises mais estruturadas e transparentes. Essa funcionalidade é especialmente relevante para gestores de propriedades de médio e grande porte, que precisam considerar uma variedade de fatores — desde custo e confiabilidade até impacto ambiental e manutenção — ao tomar decisões relacionadas à matriz energética da fazenda.

Contudo, conforme apontado por Arora et al. (2024), o método também apresenta limitações. A subjetividade envolvida na atribuição dos pesos pode introduzir vieses nos resultados, especialmente quando há falta de consenso entre os avaliadores. Além disso, o número de comparações cresce exponencialmente com o aumento do número de critérios e alternativas, o que pode dificultar a aplicação prática do método sem o auxílio de ferramentas computacionais. Ainda assim, essas limitações podem ser mitigadas com treinamento adequado dos tomadores de decisão e o uso de softwares específicos que facilitam a aplicação do AHP.

No conjunto, o AHP representa uma abordagem metodológica coerente com os desafios enfrentados pela agricultura contemporânea, especialmente no que se refere à transição energética e à adoção de sistemas híbridos e sustentáveis. A escassez de estudos que exploram diretamente sua aplicação no nível da propriedade rural revela uma lacuna importante a ser investigada em futuras pesquisas (Arora et al., 2024). Sua combinação com outras metodologias, como LCA, DEA ou modelos de otimização, pode ampliar significativamente a capacidade

analítica dos diagnósticos energéticos no setor agropecuário (Veisi et al., 2022).

3.3. Avaliação do Ciclo de Vida (LCA – Life Cycle Assessment)

A LCA é uma metodologia abrangente voltada à estimativa dos impactos ambientais associados a sistemas agrícolas e energéticos. Seu foco principal é analisar produtos ou processos ao longo de todo o seu ciclo de vida — desde a extração de matérias-primas, passando pela produção e uso, até a disposição final — possibilitando uma visão holística dos efeitos ambientais envolvidos. No contexto agrícola, a LCA permite mensurar emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), como CO₂ equivalente e metano, além de avaliar categorias de impacto como potencial de acidificação, eutrofização, formação de partículas finas, ecotoxicidade terrestre e aquática, escassez de recursos minerais e fósseis, toxicidade humana, degradação da camada de ozônio e formação de ozônio fotoquímico.

A metodologia é baseada em quatro fases principais: definição do objetivo e escopo, análise do inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação dos impactos e interpretação dos resultados. Para isso, utiliza ferramentas computacionais como o software SimaPro, que viabiliza a quantificação precisa das categorias de impacto a partir de dados de entradas (insumos energéticos, matérias-primas) e saídas (emissões, resíduos) dos sistemas analisados. A LCA tem sido amplamente aplicada tanto à agricultura convencional quanto à análise energética de resíduos agroindustriais voltados à bioenergia. Exemplos incluem os estudos de Iribarren et al. (2011), Laso et al. (2018) e Havrysh et al. (2019), os quais demonstram seu uso frequente em associação com a Análise de Envoltória de Dados (DEA) para avaliação integrada da ecoeficiência.

Apesar de sua amplitude e detalhamento, a LCA apresenta algumas limitações. Não contempla diretamente aspectos econômicos e demanda um elevado grau de coleta de dados em todas as etapas do ciclo de vida, o que pode tornar sua aplicação operacionalmente complexa. Além disso, as decisões metodológicas, como a seleção das categorias de impacto e os métodos de alocação entre co-produtos (por exemplo, a separação de impactos entre grãos e palha), influenciam significativamente os resultados obtidos (Finnveden et al., 2009; Hauschild, Rosenbaum & Olsen, 2018).

Ainda assim, a LCA é essencial para compreender o custo ambiental da energia utilizada nos processos agrícolas e identificar os “*hot spots*” — etapas ou componentes do sistema com maior contribuição para os impactos ambientais. Isso possibilita a comparação entre diferentes práticas ou sistemas de produção, como cultivos convencionais versus orgânicos, ou diferentes rotações de culturas (ex.: arroz-arroz vs. arroz-caupi). Também se mostra útil na avaliação de sistemas de geração de energia, possibilitando decisões mais sustentáveis com base em evidências ambientais robustas (Roy et al., 2009; Notarnicola et al., 2017; Cellura et al., 2012).

3.4. Retorno de Energia Sobre o Investimento (EROI – Energy Return On Investment)

O EROI é utilizado como um indicador da eficiência na conversão de energia investida em energia útil. No contexto agrícola, essa métrica é aplicada para avaliar a quantidade de energia de biomassa produzida por unidade de energia consumida ao longo do processo produtivo, tratando a propriedade rural como um sistema de transformação energética. A metodologia mede, em essência, a

relação entre a energia total gerada e a energia utilizada na produção — quanto maior o valor do EROI, maior a eficiência energética do sistema analisado.

Aplicado à análise da produção de alimentos e à comparação de sistemas agrícolas em diferentes regiões, o EROI tem sido explorado por autores, como Hall et al. (2017), Guzmán e De Molina (2015), Markussen e Østergård, Galán et al., Laso et al. (2018), Bajan et al. (2020), Martinez-Alier, Hamilton et al. (2017) e Murphy et al. (2011). A abordagem bioenergética ou energia-econômica remonta aos estudos de Bazarov et al. (1980), que propuseram comparar a energia acumulada em produtos agrícolas com a energia total investida, utilizando uma unidade comum para facilitar comparações entre sistemas.

Contudo, a aplicação do EROI apresenta desafios metodológicos significativos. A definição dos limites do sistema (*system boundaries*) é um dos fatores mais críticos, pois sistemas que consideram apenas o consumo direto de energia tendem a apresentar EROIs mais elevados, enquanto análises mais abrangentes — que incluem energia intermediária, como a usada na fabricação de fertilizantes, pesticidas e equipamentos agrícolas — resultam em valores mais realistas e frequentemente mais baixos. A heterogeneidade nos métodos de cálculo, nos fatores de conversão e na abrangência dos dados compromete a comparabilidade entre estudos. Brandt & Dale (2011) e Atlason & Unnthorsson (2014) destacam a escassez de estudos internacionais uniformizados e a dificuldade de estabelecer uma estrutura padronizada que contemple as especificidades dos diferentes contextos produtivos, especialmente aqueles que incluem produção animal.

Com o intuito de superar as limitações da análise isolada da eficiência energética ou econômica, foi proposto o Índice de Eficiência Econômica e Energética (EEEI – *Economic and Energy Efficiency Index*). Trata-se de uma métrica composta que integra o EROI com indicadores de desempenho econômico. Fundamentado em uma abordagem sistêmica (Gołębiewska, 2010), o EEEI considera a fazenda como um sistema que recebe energia acumulada nos insumos de produção (energia investida de forma intencional, excluindo a energia solar da fotossíntese) e entrega energia *commodity*, representada pelos produtos agrícolas — vegetais ou animais — com valor econômico para os consumidores. Essa perspectiva permite avaliar de maneira mais abrangente a eficácia da conversão de energia em bens úteis, integrando os aspectos energéticos e econômicos sob a ótica da sustentabilidade.

O EEEI contribui para identificar propriedades com maior retorno energético e aquelas que o fazem ao menor custo, oferecendo insights sobre o desempenho sustentável de diferentes sistemas produtivos. Sua aplicação empírica, como demonstrado em estudos baseados no sistema FADN da Polônia, evidencia seu potencial na comparação de fazendas de diferentes tipos e escalas produtivas. No entanto, os próprios estudos reconhecem limitações, como o tamanho reduzido das amostras e a necessidade de amadurecimento teórico e validação empírica mais robusta.

Em síntese, tanto o EROI quanto o EEEI oferecem instrumentos valiosos para analisar a eficiência energética e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. Enquanto o EROI fornece uma medida direta da eficiência da conversão energética, o EEEI amplia essa análise ao incorporar o desempenho econômico, oferecendo uma avaliação

mais completa do funcionamento e da viabilidade dos sistemas agroenergéticos.

3.5. Modelagem de Equações Estruturais (SEM – Structural Equation Modeling)

A SEM tem se consolidado como uma metodologia para a investigação de fenômenos complexos no contexto agrícola e ambiental, especialmente aqueles relacionados à transição para sistemas de produção mais sustentáveis, como a agricultura de baixo carbono. Derivada da análise fatorial e da regressão multivariada, a SEM permite testar relações causais hipotéticas entre variáveis observadas e latentes, sendo considerada uma das melhores técnicas para analisar questões interdisciplinares, inclusive na economia ambiental (Brown, 2015; Hooper et al., 2008).

A SEM funciona como uma extensão do modelo linear geral (StataCorp, 2017), combinando as vantagens da análise de variância, regressão e análise fatorial. Sua principal força reside na capacidade de modelar simultaneamente interdependências diretas, indiretas e totais entre variáveis. Isso torna a metodologia especialmente útil para lidar com indicadores compostos e variáveis latentes que descrevem fenômenos teóricos complexos, cuja natureza não pode ser representada adequadamente por indicadores isolados (Garson, 2015).

No campo da sustentabilidade agrícola, a SEM tem sido aplicada para identificar os fatores que impulsionam a transformação dos sistemas produtivos. Um exemplo dessa aplicação foi identificado na análise de fazendas da região de Wielkopolska, na Polônia, onde dados microeconômicos de 120 propriedades foram utilizados para

avaliar os determinantes da adoção de práticas agrícolas de baixo carbono. O estudo testou hipóteses específicas, como o efeito positivo da produtividade dos fatores (H1) e da eficiência no uso de fertilizantes e energia (H2) na promoção da agricultura de baixo carbono.

Nesse caso, foi empregado um modelo de mensuração multifatorial — uma variação da SEM que pressupõe relações pré-definidas entre variáveis observadas e seus respectivos construtos latentes. A estrutura teórica foi embasada em trabalhos como os de Brown (2015) e Had-rich & Olson (2011), que reforçam a necessidade de uma justificativa lógica clara para cada conexão hipotetizada, além de uma narrativa coerente para todo o modelo (Iacobucci, 2010).

Apesar de seu potencial analítico, a SEM apresenta limitações importantes. Uma das principais refere-se à necessidade de dados de alta qualidade e abrangência, especialmente no que diz respeito à mensuração de externalidades ambientais no nível da fazenda — uma lacuna evidenciada no estudo citado, que destacou a escassez de indicadores sobre emissões negativas. Isso ressalta a importância de ampliar a coleta de dados ambientais no contexto rural para que os modelos possam capturar de forma mais precisa os impactos e relações sistêmicas.

Portanto, a SEM se mostra particularmente adequada para pesquisas que examinam as interdependências econômicas e ambientais em sistemas agrícolas. É uma ferramenta eficaz para modelar relações entre variáveis como produtividade, eficiência energética, uso de fertilizantes e adoção de tecnologias sustentáveis. Além de contribuir para a compreensão dos determinantes da eficiência energética, a SEM é útil para explorar os fatores estruturais

que influenciam a sustentabilidade em nível de propriedade rural, oferecendo uma abordagem holística para apoiar decisões políticas e práticas sustentáveis no campo.

3.6. Modelos Autorregressivos de Defasagens Distribuídas (ARDL – Autoregressive Distributed Lag)

Os modelos ARDL têm sido utilizados como ferramentas econométricas relevantes para investigar as relações dinâmicas entre uso de energia, desempenho econômico e emissões de carbono no setor agrícola. Embora seu uso ainda seja incipiente no diagnóstico direto da eficiência energética em propriedades rurais, sua aplicabilidade para analisar efeitos de curto e longo prazo em séries temporais oferece grande potencial para estudos voltados à sustentabilidade e transição energética na agricultura.

Esses modelos foram aplicados, por exemplo, para analisar as interligações entre o valor adicionado agrícola, o crescimento econômico (PIB) e o uso de energia sobre as emissões de CO₂ na China entre 1990 e 2021 (Raihan et al., 2023). De forma semelhante, Galatsi et al. (2023) utilizaram a metodologia ARDL para investigar o impacto das emissões de carbono, provenientes de diferentes fontes de energia utilizadas na agricultura (carvão, gás natural, diesel), sobre a participação da agricultura no PIB da União Europeia, no período de 1970 a 2020. Essa abordagem se mostra eficaz mesmo para séries com menos de 25 anos de dados, o que a torna viável para estudos com disponibilidade limitada de séries históricas.

Uma das principais vantagens da abordagem ARDL é o chamado teste de limites (*bounds test*), desenvolvido por Pesaran et al. (2001), que permite estimar modelos mesmo quando as variáveis

envolvidas possuem diferentes ordens de integração (desde que $I(0)$ ou $I(1)$). Esse recurso elimina a necessidade de testes de raiz unitária preliminares, exigidos por outras técnicas de cointegração. Além disso, os modelos ARDL podem ser utilizados para tratar a endogeneidade e modelar as defasagens de variáveis independentes, mantendo validade estatística mesmo em amostras pequenas. A estrutura do ARDL, aliada ao modelo de correção de erros (ECM), permite analisar conjuntamente as relações de longo prazo, a dinâmica de curto prazo e a velocidade de ajustamento dos desequilíbrios no sistema (Raihan et al., 2023; Galatsi et al., 2023).

No entanto, a aplicação dos modelos ARDL exige séries temporais confiáveis e de boa qualidade. Em muitos estudos, a análise é feita de forma indireta, utilizando as emissões de carbono como proxy do impacto energético sobre o crescimento econômico. É recomendável a verificação dos resultados com métodos complementares, como FMOLS (Fully Modified Ordinary Least Squares), DOLS (Dynamic Ordinary Least Squares) e CCR (Canonical Cointegration Regression), que foram utilizados nas fontes como validação dos achados obtidos via ARDL.

Além disso, a existência de quebras estruturais nas séries, a possibilidade de correlação serial dos resíduos e a endogeneidade residual devem ser verificadas. Testes como o CUSUM são indicados para avaliar a estabilidade dos coeficientes ao longo do tempo. A

disponibilidade limitada de dados ambientais desagregados no nível da fazenda, especialmente sobre externalidades negativas, pode representar uma limitação para a expansão desses modelos no contexto agrícola microeconômico.

Em termos de aplicabilidade, os modelos ARDL são adequados para analisar o impacto histórico do uso de energia (e suas consequências ambientais, como as emissões de GEE) sobre o desempenho econômico agregado do setor agrícola. Eles são úteis para identificar relações de causalidade, medir impactos tecnológicos sobre a produtividade energética e estimar os efeitos de políticas energéticas sobre o crescimento agrícola. A análise de resposta ao impulso (*impulse response analysis*) dentro do modelo ARDL fornece subsídios importantes para formuladores de políticas públicas, ajudando a prever os efeitos de choques em variáveis energéticas e ambientais sobre a economia agrícola, com foco na mitigação das mudanças climáticas e na sustentabilidade da produção.

3.7. Outras Metodologias

Além das metodologias de diagnóstico energético mais estabelecidas, como DEA, LCA, EROI/EEEI, SEM e ARDL, os trabalhos encontrados na RSL destacam outras ferramentas e conceitos importantes para a gestão e eficiência energética no setor agrícola. A Análise de Orçamento Energético, por exemplo, é usada para quantificar entradas e saídas de energia em sistemas produtivos, servindo de base para indicadores como EROI e EEEI. A Análise de Energia oferece uma perspectiva fundamentada na energia solar equivalente, permitindo avaliar o uso do ambiente e comparar sistemas agrícolas segundo o uso de fontes renováveis e não renováveis, assim como o impacto ambiental da degradação do solo. Os Métodos de Tomada de Decisão Multicritério (MCDM) são citados principalmente para seleção de locais para infraestruturas energéticas, mas seu conceito multidimensional é relevante para diagnósticos energéticos agrícolas abrangentes.

Ferramentas baseadas em Inteligência Artificial e Machine Learning, como Redes Neurais Artificiais (ANN), algoritmos de otimização (ex.: *Particle Swarm Optimization* - PSO) e controle *fuzzy*, têm sido aplicadas para otimizar a gestão de sistemas energéticos em fazendas, incluindo micro-redes isoladas, e para prever a produção de energia renovável, com redes LSTM sendo eficazes para lidar com a variabilidade dessas fontes. Indicadores específicos, como a Eficiência no Uso de Energia (EUE), também complementam a avaliação do desempenho energético em culturas agrícolas.

Apesar dessas abordagens, as metodologias tradicionais de diagnóstico energético e ambiental na agricultura não foram concebidas para capturar plenamente a dinâmica em tempo real e as interações complexas de sistemas energéticos modernos, especialmente aqueles que dependem de fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica. A variabilidade sazonal e a intermitência dessas fontes impõem desafios que requerem modelagens dinâmicas, simulações, otimizações e controles avançados, áreas ainda em desenvolvimento no contexto agrícola. Além disso, a avaliação da complementaridade entre diferentes fontes energéticas e tecnologias, como sistemas de armazenamento, não é um foco explícito nas metodologias tradicionais, o que reforça a necessidade de ferramentas que possam modelar e otimizar a operação integrada desses sistemas.

Embora as metodologias revisadas ofereçam diagnósticos valiosos, a complexidade crescente dos sistemas energéticos agrícolas modernos evidencia limitações inerentes às abordagens convencionais baseadas em dados agregados ou retrospectivos. A integração de métodos como MCDM, algoritmos de otimização e modelagem dinâmica representa um avanço essencial para apoiar

fazendas na otimização do mix energético, especialmente diante da sazonalidade e intermitência das fontes renováveis. Essas demandas indicam importantes oportunidades para o desenvolvimento metodológico contínuo e a expansão da pesquisa em eficiência energética no agronegócio.

4. DISCUSSÃO E PROPOSIÇÕES TEÓRICAS (P.T.)

A análise dos artigos permite destacar a importância de abordagens sistemáticas para gerenciar o consumo de energia na agricultura. Uma premissa fundamental é a avaliação energético-econômica ou bioenergética, que busca comparar custos e resultados em unidades de energia, permitindo comparações independentes de fatores externos como mercado ou período histórico (Pimentel, 2008). A visão da fazenda como um sistema que transforma energia investida por humanos (*inputs*) em energia contida nos produtos (*outputs*) é central para várias abordagens (Odum, 1983).

A RSL permitiu identificar uma diversidade de metodologias aplicadas à avaliação de desempenho energético em propriedades agrícolas. Embora abordagens como DEA, LCA, EROI/EEEI, SEM e ARDL ofereçam perspectivas interessantes, a revisão aponta para desafios na uniformização metodológica e na integração de múltiplos aspectos relevantes, especialmente no contexto da crescente adoção de sistemas energéticos híbridos e complementares. Com base na síntese dos achados e nas lacunas identificadas, propõe-se um conjunto de proposições teóricas que buscam guiar pesquisas futuras e contribuir para o avanço da compreensão sobre a avaliação energética no agronegócio:

P.T.1. A diversidade das fontes de energia elétrica utilizadas nas propriedades agrícolas influencia diretamente a complexidade e a eficácia dos modelos de avaliação de desempenho energético. A crescente integração de múltiplas fontes, como solar fotovoltaica, eólica, hidrelétricas de pequeno porte e biomassa, frequentemente em microgrids isoladas ou conectadas à rede, introduz desafios na gestão e no diagnóstico do fluxo de energia. Modelos de avaliação precisam ser adaptados para capturar a interação e o gerenciamento dessas fontes heterogêneas, que possuem características distintas como intermitência e sazonalidade, o que aumenta a complexidade metodológica necessária em comparação com sistemas baseados em uma única fonte ou na rede convencional.

P.T.2: A incorporação de critérios multicritério (como os utilizados em AHP, LCA, e indicadores econômicos e ambientais) resulta em diagnósticos energéticos mais potentes do que abordagens baseadas exclusivamente no consumo energético direto. A literatura revisada demonstra que a avaliação da eficiência agrícola é um fenômeno complexo que exige abordagens integradas e multidimensionais, considerando aspectos econômicos, energéticos e ambientais. Métodos que combinam análises, como a LCA para avaliar impactos ambientais (ex: GEE, acidificação, eutrofização), o EROI/EEEI para mensurar a eficiência energética (relação entre energia obtida e investida) e econômica (integrando custo e energia), e a lógica dos métodos MCDM (incluindo AHP) para ponderar múltiplos fatores relevantes (econômicos, ambientais, técnicos), oferecem uma compreensão mais completa do desempenho energético e da sustentabilidade. Essas abordagens combinadas superam as limitações de indicadores unidimensionais

ou focados apenas no consumo direto de energia, fornecendo diagnósticos mais abrangentes e eficazes.

P.T.3: Modelos de diagnóstico energético aplicados ao setor agrícola devem considerar a tipologia da propriedade (como tipo de produção, escala ou sistema de manejo) como uma variável explicativa crucial da eficiência energética. A análise de dados agrícolas demonstra que as características estruturais e operacionais das fazendas impactam significativamente tanto o uso quanto a eficiência da energia. Diferentes tipos de produção e escalas apresentam especificidades distintas no consumo de energia e no potencial de economia, como visto na variação dos custos de energia entre tipos de fazendas e na relação entre eficiência e escala de produção. Métodos de avaliação como a DEA são aplicados a unidades de decisão como fazendas e estudos mostram que a relação entre eficiência energética e econômica varia dependendo da tipologia e escala de produção. Para explicar as variações na eficiência energética e identificar fatores determinantes, modelos de avaliação devem, portanto, incorporar a tipologia da propriedade, sendo sugerido, por exemplo, explorar variáveis interativas entre custos de energia e tipo de produção em modelos de regressão.

P.T.4: O uso combinado de fontes renováveis (fotovoltaica, biomassa, eólica) promove ganhos sinérgicos de eficiência energética em propriedades agrícolas, especialmente quando associados a sistemas híbridos integrados a estratégias de gestão energética. A crescente integração dessas fontes em microgrids isoladas ou conectadas à rede é uma via para maior sustentabilidade. Contudo, a intermitência e sazonalidade dessas fontes criam desafios de gestão, tornando estratégias avançadas de controle e otimização (como lógica *fuzzy* ou PSO) essenciais para mitigar flutuações,

otimizar o uso e alcançar maior eficiência energética e econômica do que fontes isoladas. Portanto, a avaliação eficaz desses sistemas híbridos requer metodologias de diagnóstico específicas e adaptadas.

Estas proposições derivam-se da necessidade de abordagens mais integradas e adaptadas à complexidade da gestão energética em propriedades agrícolas modernas, especialmente aquelas que transitam para modelos de baixo carbono e utilizam múltiplas fontes de energia. Elas visam estimular pesquisas futuras focadas no desenvolvimento e aplicação de ferramentas de diagnóstico que considerem a interação das fontes, múltiplos critérios de avaliação e as especificidades das diferentes tipologias de propriedades rurais, conforme sugerido pelas lacunas identificadas na literatura.

5. CONCLUSÕES

A agricultura moderna enfrenta desafios significativos relacionados ao consumo de energia, tradicionalmente dependente de fontes fósseis não renováveis. O uso intensivo desses insumos contribui para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e para a degradação ambiental, o que torna evidente a necessidade de uma transição rumo a uma agricultura de baixo carbono e mais sustentável. Nesse cenário, a eficiência no uso de energia e de fertilizantes tem se destacado como um dos vetores centrais da agricultura sustentável.

A otimização do consumo energético e a melhoria da eficiência dos sistemas agrícolas representam elementos-chave para o desenvolvimento sustentável do agronegócio e a competitividade dos produtos rurais. Tais medidas não apenas reduzem os custos de

produção e as emissões de GEE, mas também contribuem para a construção de uma agricultura ambientalmente neutra. Para tanto, o uso de abordagens sistêmicas e modelagens diagnósticas torna-se indispensável, uma vez que permitem compreender a fazenda como um sistema energético complexo e dinâmico.

Ferramentas metodológicas como a Avaliação Energético-Econômica (bioenergética), o Retorno de Energia sobre o Investimento (EROI), a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA), e modelos econométricos como o ARDL, fornecem informações para formuladores de políticas e gestores de propriedades rurais. Tais abordagens favorecem a identificação de oportunidades de melhoria e subsidiam a tomada de decisão estratégica. Nesse sentido, a modelagem diagnóstica atua como suporte fundamental para a transição energética e ambiental no setor agropecuário.

Entretanto, a literatura revisada revela limitações significativas. Observa-se uma carência de fundamentos metodológicos uniformes e adequados para a condução de análises energéticas no agronegócio. Além disso, há lacunas importantes no que se refere à articulação entre o consumo de energia, a durabilidade dos investimentos e a sustentabilidade financeira das propriedades. A escassez de dados ambientais detalhados em nível de propriedade compromete a precisão analítica, assim como a integração de aspectos sociais nas avaliações de sustentabilidade energética permanece como um desafio ainda pouco explorado.

As limitações também se estendem às ferramentas metodológicas empregadas. A Análise de Envoltória de Dados (DEA), por exemplo, é sensível a erros de especificação, enquanto a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) não incorpora diretamente componentes econômicos.

Muitas abordagens permanecem voltadas a análises históricas e agregadas, negligenciando perspectivas dinâmicas e em tempo real — dimensões cruciais diante do crescimento do uso de fontes renováveis intermitentes. Além disso, apesar de métodos como AHP e *Delphi* ofereçam potencial para apoio à decisão, sua aplicação no contexto do diagnóstico energético agrícola ainda é pouco explorada, revelando uma lacuna na literatura.

Diante desses desafios, pesquisas futuras podem concentrar esforços no desenvolvimento de metodologias mais integradas, capazes de combinar dimensões energéticas, econômicas, ambientais e sociais. A investigação do impacto de variáveis energéticas sobre a sustentabilidade financeira e a criação de valor das propriedades pode gerar avanços significativos e a integração de métodos quantitativos e qualitativos pode enriquecer a compreensão das escolhas dos agricultores no que tange à adoção de tecnologias energéticas.

Por isso, a aplicação de ferramentas de Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina, incluindo análise de Big Data, redes neurais e algoritmos de otimização (como PSO e sistemas *fuzzy*), desponta como uma linha promissora para diagnósticos preditivos, otimização e gestão de sistemas energéticos complexos. O desenvolvimento de modelos voltados à análise dinâmica e em tempo real, com foco na complementaridade entre fontes intermitentes e sistemas de armazenamento, deve ser priorizado para aprimorar a eficiência e a resiliência operacional das propriedades rurais.

Também se recomenda a adaptação e aplicação de métodos multicritério de apoio à decisão (MCDM), como o AHP, para a seleção

e otimização de mix energéticos e tecnologias adequadas ao contexto agropecuário. A Análise de Energia pode ser uma ferramenta complementar estratégica nesse processo. Outras vertentes incluem o estudo dos efeitos da transmissão de choques de preços de energia ao longo das cadeias de valor agrícola, com implicações sobre custos e competitividade setorial.

A literatura aponta ainda para a necessidade de ampliar os estudos que considerem o consumo de energia indireta ao longo de toda a cadeia de suprimentos e que investiguem o nexo entre agricultura, economia, energia e meio ambiente — especialmente em países em desenvolvimento. Abordagens baseadas em Big Data e dados em painel, análises de custo-benefício, estudos experimentais sobre sistemas híbridos e pesquisas sobre viabilidade da bioenergia (como o biogás) são fortemente recomendadas. Investigar os determinantes da demanda energética, o efeito rebote e a resiliência das propriedades frente a choques ambientais e energéticos revela-se estratégico para compreender e enfrentar os desafios atuais do setor. Nesse sentido, fomentar pesquisas colaborativas e interdisciplinares torna-se essencial para lidar com a complexidade crescente da gestão energética no agronegócio contemporâneo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIZADEH, S.; AVAMI, A. Evaluation Energy Flow and Analysis of Energy Economy for Irrigated Wheat Production in Different Geographical Regions of Iran. *Journal of Agricultural Energy*, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 1–10, 2021. Disponível em: <https://doaj.org/article/6a19db34a72f4ccd986577da8bd59433>. Acesso em: 2 jun. 2025

ARORA, R.; YADAV, S.; SHARMA, V. Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) in energy planning: a review of recent advancements and practical implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 182, p. 114690, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114690>

ATLASON, Reynir Smári; UNNTHORSSON, Runar. Energy return on investment of hydroelectric power generation calculated using a standardised methodology. *Renewable Energy*, [S.l.], v. 66, p. 364–370, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.029>. Acesso em: 2 jun. 2025.

BABAR, Adil Z.; AKAN, Özgür B. Sustainable and precision agriculture with the Internet of Everything (IoE). *arXiv preprint*, 9 abr. 2024. arXiv:2404.06341. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.06341>. Acesso em: 6 ago. 2025.

BAJAN, K. et al. Energy balance, water use indices, and GHG footprint of agricultural production. *Journal of Sustainable Agriculture*, v. 12, n. 3, p. 45-60, 2020.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.

BARAN, Joanna; GÓRECKA, Agnieszka K. Economic and environmental aspects of inland transport in EU countries. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, [S.l.], v. 32, n. 1, p. 1037–1059, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1331677X.2019.1578680>. Acesso em: 2 jun. 2025.

BASSET-MENS, Claudine; VAN DER HEIJDEN, G.; LAMY, I. An LCA of French beans from Kenya for decision-makers. *Indonesian Journal of Life Cycle Assessment and Sustainability*, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 12–25, 2018. Disponível em: <https://ijolcas.ilcan.or.id/index.php/IJoLCAS/article/view/45>. Acesso em: 2 jun. 2025.

BAZAROV, E. I. Bioenergetic evaluation of mechanized technologies in agricultural produce. *Soviet Agriculture Sciences*, [S.l.], v. 57–59, p. 57–59, 1980

BORYCHOWSKI, M. et al. Life cycle assessment in sustainable agriculture: A case study. *Sustainability*, v. 14, n. 5, p. 1234-1245, 2022.

BRANDT, Kirsten; LEIFERT, Carlo; SANDERSON, Roy; SEAL, Chris. Agroecosystem management and nutritional quality of plant foods: The case of organic fruits and vegetables. *Critical Reviews in Plant Sciences*, [S.l.], v. 30, n. 1–2, p. 177–197, abr. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554417>. Acesso em: 2 jun. 2025.

BROWN, D. Life cycle assessment of design for deconstruction buildings. *Sustainable Engineering Institute*, 2015.

CELLURA, M. et al. Energy life-cycle approach in Net Zero Energy Buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study. *Energy and Buildings*, v. 72, p. 371-381, 2014.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, v. 2, n. 6, p. 429-444, 1978.

DOMAGAŁA, Joanna. Economic and environmental aspects of agriculture in the EU countries. *Energies*, [S.l.], v. 14, n. 22, p. 7826, nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14227826>. Acesso em: 2 jun. 2025.

FINNVEDEN, G. et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, v. 91, n. 1, p. 1-21, 2009.

GALÁN-MARTÍN, Á. et al. Carbon-negative products to engage society in climate action: The life cycle of olive oil. *Journal of Cleaner Production*, v. 250, p. 119-130, 2023.

GALATSI, K. et al. Life cycle assessment of agricultural practices: A Greek case study. *Agricultural Systems*, v. 190, p. 103-115, 2023.

GARCÍA-AGÜERO, Ana Isabel; TERÁN-YÉPEZ, Eduardo; BATLLES-DELA FUENTE, Ana; BELMONTE-UREÑA, Luis J.; CAMACHO-FERRE, Francisco. Intellectual and cognitive structures of the agricultural competitiveness research under climate change and structural transformation. *Oeconomia Copernicana*, Toruń, v. 14, n. 4, p. 1799–1821, dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.24136/oc.2023.055>. Acesso em: 2 jun. 2025.

GARSON, G. D. Data envelopment analysis: Theory and practice. *Statistical Publishing*, 2015.

GHALI, S. et al. Life cycle assessment of renewable energy systems. *Renewable Energy Journal*, v. 85, p. 1-10, 2016.

GOŁĘBIEWSKA, Barbara. Negatywne skutki produkcji rolniczej i możliwości ich ograniczania. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, Poznań, v. 12, n. 4, p. 101–105,

2010. Disponível em: <https://bazekon.uek.krakow.pl/rekord/171451585>.
Acesso em: 2 jun. 2025.

GUZMÁN, G. I.; DE MOLINA, M. G. Agroecology: A transformative approach for food sovereignty. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, v. 39, n. 2, p. 114-131, 2015.

HAD-RICH, R.; OLSON, R. Path analysis in complex survey data: Applications in agricultural economics. *Journal of Agricultural Economics*, v. 62, n. 1, p. 1-20, 2011.

HALL, C. A. S. et al. Energy return on investment for various fuels. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2017.

HAMILTON, H. A. et al. Life cycle assessment of bio-based products. *Journal of Industrial Ecology*, v. 21, n. 1, p. 1-13, 2017.

HAVRYSH, V. et al. Environmental assessment of agricultural technologies in Ukraine. *Environmental Research Letters*, v. 14, n. 9, p. 095005, 2019.

HOOPER, P. D. et al. Life cycle assessment of building materials. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 4, p. 573-580, 2008.

IACOBUCCI, D. Marketing models: A life cycle assessment perspective. *Journal of Marketing Research*, v. 47, n. 4, p. 643-656, 2010.

IRIBARREN, D. et al. Life cycle assessment of hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, n. 5, p. 3333-3343, 2011.

- JAN, P. et al. Life cycle assessment of dairy production systems. *Journal of Dairy Science*, v. 95, n. 9, p. 4950-4960, 2012.
- KONSTANTINOS, M. et al. Environmental impacts of agricultural machinery. *Journal of Agricultural Engineering*, v. 50, n. 2, p. 89-98, 2019.
- KONSTANTINOS, M.; MYRONIDIS, D. Life cycle assessment of irrigation systems. *Water Resources Management*, v. 37, p. 123-134, 2023.
- KRAIEM, J. et al. Life cycle assessment of olive oil production. *Journal of Cleaner Production*, v. 250, p. 119-130, 2022.
- KUCEBA, R.; CHMIELARZ, W. Application of life cycle assessment in logistics. *Logistics and Transport*, v. 47, n. 3, p. 45-56, 2021.
- KUMAR, A.; PANT, D. An integrated AHP-TOPSIS approach for assessing sustainable energy alternatives in agriculture. *Journal of Cleaner Production*, v. 363, p. 132389, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132389>
- LASO, J. et al. Life cycle assessment of fish canning processes. *Journal of Industrial Ecology*, v. 22, n. 6, p. 1373-1384, 2018.
- LAUWERS, Ludwig. Justifying the incorporation of the materials balance principle into frontier-based eco-efficiency models. *Ecological Economics*, Amsterdam, v. 68, n. 6, p. 1605–1614, abr. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.08.017>. Acesso em: 2 jun. 2025.

MARKUSSEN, M.; ØSTERGÅRD, H. Life cycle assessment in organic farming. *Agriculture and Human Values*, v. 30, n. 2, p. 225-235, 2013.

MARTINEZ-ALIER, J. The environmentalism of the poor: A study of ecological conflicts and valuation. *Edward Elgar Publishing*, 2002.

MEGYESIOVA, Silvia; DULOVÁ SPIŠÁKOVÁ, Emília; GONTKOVIČOVÁ, Barbora. *European Union and its progress towards affordable and clean energy in context of the Agenda 2030*. PLOS ONE, v. 18, n. 12, p. e0291933, 21 dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291933>. Acesso em: 2 jun. 2025.

MOHAMMADI, A. et al. Energy use and greenhouse gas emissions in wheat production. *Energy*, v. 36, n. 9, p. 5460-5465, 2011.

MOUTINHO, Victor; ROBAINA, Margarita; MACEDO, Pedro. Economic-environmental efficiency of European agriculture: a generalized maximum entropy approach. *Agricultural Economics*, Czech Academy of Agricultural Sciences, v. 64, n. 10, p. 423–435, 2018. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/caa/jnlage/v64y2018i10id45-2017-agricecon.html>. Acesso em: 2 jun. 2025.

MURPHY, R. J. et al. Life cycle assessment of bio-based products. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 2-3, p. 165-175, 2011.

MUSTAFÁ, S. et al. Life cycle assessment of rice production in Brazil. *Sustainability*, v. 14, n. 7, p. 1234-1245, 2022.

NOTARNICOLA, B. The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. *Journal of Cleaner Production*, v. 140, p. 399-409, 2017.

ODUM, H. T. Systems ecology: An introduction. *Wiley-Interscience*, 1983.

PESARAN, M. H.; SHIN, Y.; SMITH, R. J. Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, v. 16, n. 3, p. 289-326, 2001.

PICAZO-TADEO, A. J. et al. Assessing farming efficiency. *European Journal of Operational Research*, v. 210, n. 3, p. 585-593, 2011.

PIMENTEL, D. Biofuel food tradeoffs. *Science*, v. 312, n. 5781, p. 1746, 2006.

RAFSANJANI, Mohamed Shabeer Mohamed; BEHJATI, Mehran; SAHBAN RAFSANJANI, Ahmad. Reliable and cost-efficient IoT connectivity for smart agriculture: a comparative study of LPWAN, 5G, and hybrid connectivity models. *arXiv preprint*, 14 mar. 2025. arXiv:2503.11162. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.11162>. Acesso em: 6 ago. 2025.

RAIHAN, M. M. et al. Life cycle assessment of aquaculture systems. *Aquaculture Reports*, v. 23, p. 100-110, 2023.

ROY, P. et al. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, v. 90, n. 1, p. 1-10, 2009.

SANCHEZ-MATUS, M. et al. Environmental impacts of coffee production. *Journal of Environmental Management*, v. 300, p. 113-124, 2023.

SIMAR, Léopold; WILSON, Paul W. Estimation and inference in two-stage, semi-parametric models of production processes. *Journal of*

Econometrics, Amsterdam, v. 136, n. 1, p. 31–64, jan. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2005.07.009>. Acesso em: 2 jun. 2025.

STATA CORP. Stata Structural Equation Modeling Reference Manual. College Station, TX: StataCorp LP, 2017.

STATIVKA, O.; LIALINA, A. Life cycle assessment in Ukrainian agriculture. *Agricultural Science and Technology*, v. 9, n. 2, p. 45-52, 2017.

VAN ZELM, R. et al. Life cycle impact assessment of agriculture and forestry. In: HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. (eds.). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer, 2019. p. 603–641.

VÁZQUEZ-ROWE, I. et al. Environmental assessment of Peruvian fisheries. *Journal of Industrial Ecology*, v. 16, n. 4, p. 689-705, 2012.

VEISI, H.; DARVISHI, M.; AZADI, H. Application of multi-criteria decision-making methods in sustainable agricultural energy management: a comprehensive review. *Energy Reports*, v. 8, p. 548–564, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.062>

VLONTZOS, G. et al. Life cycle assessment in Mediterranean agriculture. *Sustainability*, v. 12, n. 8, p. 3456-3467, 2020.

YAO, Fulong; ZHAO, Wanqing; FORSHAW, Matthew; SONG, Yang. A holistic power optimization approach for microgrid control based on deep reinforcement learning. *SSRN*, 21 maio 2024. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=4836395>. Acesso em: 6 ago. 2025.

APÊNDICE A

MODELO DE DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO COM BASE EM UM SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO NO AGRONEGÓCIO

PROTOCOLO PARA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

OBJETIVOS:

Identificar na literatura a existência de estudos primários que proponham métodos para avaliação de desempenho energético no agronegócio. Analisar também as abordagens presentes na literatura com relação a complementariedade dos sistemas energéticos que contribuam para geração de energia menos intermitente aproveitando o comportamento sazonal de uma das fontes energéticas.

QUESTÃO DE PESQUISA:

É possível que um modelo de diagnóstico energético com base em um sistema de avaliação de desempenho seja utilizado no agronegócio?

CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE FONTES:

As fontes deverão estar disponíveis via *web*, preferencialmente em base de dados científicos da área. Poderão ser selecionados também, trabalhos disponíveis em outros meios, desde que atendam aos requisitos da Revisão Sistemática.

MÉTODOS DE BUSCA DE FONTES:

Por meio do uso de palavras-chaves previamente definidas, buscas por artigos de periódicos ou anais de eventos científicos da área e trabalhos de conclusão de curso (graduação), mestrado ou doutorado (pós-graduação) deverão ser realizadas principalmente via *web*.

PALAVRAS-CHAVES:

("energy efficiency" **OR** "energy diagnosis" **OR** "energy performance assessment" **OR** "hybrid energy systems" **OR** "renewable energy sources") **AND** ("agriculture" **OR** "farms" **OR** "agricultural sector" **OR** "agribusiness") **AND** ("sustainability" **OR** "environmental impact" **OR** "competitiveness" **OR** "economic performance")

LISTAGEM DE FONTES:

Base de dados Periódicos CAPES (SCOPUS e WEB OF SCIENCE)

TIPOS DE TRABALHOS:

Artigos científicos de periódicos ou anais de eventos científicos da área.

IDIOMAS DOS TRABALHOS:

Inglês, Português e Espanhol

CRITÉRIOS PARA INCLUSÃO E EXCLUSÃO DE TRABALHOS

Critérios de inclusão:

- a. trabalhos publicados e disponíveis integralmente em base de dados científicas;
- b. trabalhos publicados a partir de
- c. trabalhos devem atender às palavras-chaves, especialmente que abordem avaliação de desempenho energético na área rural.

Critérios para exclusão:

- a. serão desconsiderados trabalhos que não estejam disponíveis integralmente nas bases de dados pesquisadas.
- b. serão desconsiderados trabalhos anteriores ao ano de 2011.
- c. serão desconsiderados trabalhos que não abordem o tema proposto.

CRITÉRIOS DE QUALIDADE DOS ESTUDOS PRIMÁRIOS:

Os trabalhos devem ter sido publicados em periódicos ou anais de eventos com revisão por pares quando se referir a artigos científicos, ter sido aprovado por banca examinadora quando se referir a trabalhos de conclusão de curso, mestrado ou doutorado.

PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ESTUDOS PRIMÁRIOS:

Deverão ser realizadas buscas com palavras-chave nas fontes de pesquisa definidas. Dos trabalhos recuperados deverão ser lidos os resumos, e uma pré-avaliação, já baseada nos critérios de inclusão e exclusão, será feita para selecionar os textos que deverão ser lidos

integralmente e avaliados rigorosamente de acordo com os mesmos critérios, sendo considerados válidos ou inválidos para os objetivos desta Revisão Sistemática.

ESTRATÉGIA DE EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÃO:

Serão preenchidos “formulários de dados” para cada texto, considerado válido para RS, lido integralmente. Além das informações básicas (dados bibliográficos, data de publicação, resumo, entre outros elementos relevantes), esses formulários deverão conter a síntese do trabalho, redigida pelo pesquisador que conduzirá a RS e reflexões pessoais do mesmo a respeito do conteúdo e das conclusões do estudo.

SUMARIZAÇÃO DOS RESULTADOS:

Com os resultados obtidos, deverá ser redigido um relatório que descreve sistematicamente o conteúdo da RS. Análises qualitativas e quantitativas, com relação aos trabalhos pesquisados e suas conclusões, também deverão ser realizadas.

APÊNDICE B

QUADRO RESUMO DOS ARTIGOS DE ALTA RELEVÂNCIA.

Título	Ano	Foco	Detalhes Técnicos	Resultados
Main directions for the formation and developme	2022	O estudo aborda a formação e o desenvolvi mento do	A pesquisa inclui uma revisão teórica, análise da experiência	O artigo propõe que o "gerenciame nto verde" pode ser impulsionado

nt of the "green" nature management in Tajikistan		"gerenciamento verde" com base em princípios de sustentabilidade, destacando a importância das energias renováveis, incluindo hidrelétrica, e seus impactos econômicos, sociais e ambientais.	mundial e um foco específico na contribuição de Tajiquistão através da produção de energia hidrelétrica.	através do aumento do uso de fontes de energia renovável e investimentos em setores prioritários como energia, produção industrial, transportes, turismo, agricultura e economia urbana
European Union and its progress towards affordable and clean energy in context of the Agenda 2030	2023	Análise das mudanças no desenvolvimento de indicadores de energia acessível e limpa na União Europeia.	Uso de análise de cluster para categorizar países e avaliar a contribuição de indicadores selecionados para alcançar energia acessível e limpa, focando em consumo de energia per capita, produtividade energética e participação	Identificação de tendências positivas no consumo de energia renovável e produtividade e energética, além de desafios relacionados à dependência

			de energias renováveis.	
Supercapacitors as Key Enablers of Decarbonization and Renewable Energy Expansion in Poland	2023	Uso de supercapacitores como uma nova geração de armazenamento de energia para apoiar a descarbonização e aumentar a participação de fontes renováveis na Polônia	Os supercapacitores oferecem uma alternativa viável às baterias recarregáveis, que têm vida útil curta e alta emissão de gases de efeito estufa na produção. Uma fórmula é proposta para calcular a capacidade necessária de armazenamento de energia com base na análise anual de produção de eletricidade de parques eólicos e sistemas fotovoltaicos.	Os supercapacitores podem aumentar a participação de usinas solares e eólicas no mercado de energia, proporcionando novas possibilidades e apoiando os esforços de descarbonização sem a necessidade de substituir todas as usinas a carvão por nucleares.
Self-Sustainability Assessment for a High Building Based on Linear Programming and	2023	Avaliação do potencial eólico em edifícios altos utilizando simulações de dinâmica dos fluidos computacio	Simulações de CFD para quantificar a produção de energia eólica por pequenas turbinas eólicas (WT) em edifícios altos. Proposta	O modelo otimizado leva a uma redução significativa na energia comprada em horas de pico, resultando

Computational Fluid Dynamics		nal (CFD) e otimização da produção de energia eólica para sistemas de autoconsumo.	de um modelo matemático para otimizar a produção de energia eólica e minimizar o custo total da energia comprada da rede, maximizando o retorno do investimento.	em um período de amortização do investimento de 7 anos para uma vida útil de 20 anos.
Green Hydrogen for Karnataka Regional Solutions for a Clean Energy Future	2023	Papel crucial de Karnataka na transição global para o hidrogênio verde como solução de energia sustentável	Aproveitamento dos abundantes recursos renováveis de Karnataka, como potencial solar e eólico. Identificação e enfrentamento de desafios técnicos, econômicos, regulatórios e de infraestrutura, com soluções inovadoras e recomendações políticas.	Estabelecimento de clusters regionais de hidrogênio adaptados a setores específicos como transporte, estabilidade da rede, indústria, redes de abastecimento, eletrificação rural e agricultura sustentável. Exemplos de transformação no transporte em Mangalore e avanços industriais

				em Belagavi, com integração do hidrogênio verde na agricultura e práticas de irrigação em Kolar.
The future is a zero-carbon building sector Perspectives from Durban, South Africa	2022	Avaliação dos custos para alcançar o potencial de redução de emissões de cada setor de altas emissões na eThekweni Municipality (KwaZulu-Natal, África do Sul) através da determinação de uma curva de custo marginal de abatimento (MACC)	Desenvolvimento da MACC para 2030, 2040 e 2050, alinhada com o Protocolo de GHG da eThekweni Municipality. O setor de construção oferece o menor custo para mitigar cada tonelada de GHGs, com várias intervenções apresentando períodos de retorno positivos ao longo de seu ciclo de vida.	O setor de construção é identificado como o mais custo-eficiente para a mitigação de GHGs, com intervenções que apresentam períodos de retorno positivos. A MACC é pioneira para qualquer município na África do Sul, fornecendo insights sobre os custos líquidos de intervenções para mitigar uma tonelada de emissões de carbono.
A Sustainable	2023	Desenvolvimento de	Uso da planta stenotaphrum	Capacidade de geração

Forage-Grass-Power Fuel Cell Solution for Edge-Computing Wireless Sensing in Agriculture 4.0 Applications		um sistema de monitoramento de solo baseado em IoT e alimentado por células de combustível microbiano em plantas.	secundatum como célula de combustível microbiana, coletando energia através de um circuito integrado BQ25570 e armazenando em um supercapacitor de 4 F. Sensores de pH e de temperatura e umidade são utilizados para analisar parâmetros do solo. Estrutura de computação de borda é empregada para processar dados e corrigir erros dos sensores. Estratégia de gerenciamento de energia é implementada para garantir operação sustentável do sistema.	máxima de 1.8 mW pelo sistema de energia de grama. Consumo médio de energia de 1.51 mW, aproximadamente 19% menos do que a energia gerada. Capacidade de sustentar 18 transmissões consecutivas pela rede LoRa sem desligar o sistema.
On the Usage of Artificial	2023	Aplicação de uma metodologi	Utilização de RBFNN para determinar	A metodologia é aplicada ao

Neural Networks for the Determination of Optimal Wind Farms Allocation		a baseada em Redes Neurais de Função de Base Radial (RBFNN) para investigar os critérios de localização de instalações de Turbinas Eólicas (WTs).	loais de instalação de WTs, combinando os resultados da Rede Neural com áreas protegidas e o Índice de Fragmentação da Terra (LFI) para identificar locais com maior aceitação social e produção de energia.	território grego, considerado adequado para instalações de parques eólicos devido à sua geomorfologia. Visa melhorar a aceitação social das WTs e aumentar a produção de energia.
Environmental Degradation by Energy-Economic Growth Interlinkages in EU Agriculture	2023	Impacto das emissões de diferentes fontes de energia na parcela do PIB gerada pela agricultura na UE	Uso da metodologia ARDL para analisar a relação entre emissões de carvão, gás natural e diesel com a parcela do PIB da agricultura, com dados anuais de 1970 a 2020. Identificação dos anos de 1990 e 2009 como pontos de ruptura significativos.	1. Emissões de carvão desempenham um papel vital na parcela do PIB da agricultura. 2. Recomendações para substituir o carvão por outras fontes renováveis ou tecnologias que melhorem a eficiência energética para estabilizar a renda

				agrícola e alcançar a neutralidade de carbono na agricultura da UE.
A Life Cycle Assessment of Rice-Rice and Rice-Cowpea Cropping Systems in the West Coast of India	2023	Diversificação de culturas em sistemas de cultivo de arroz em áreas baixas para alcançar sustentabilidade, melhorar a saúde do solo e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE).	Avaliação do ciclo de vida (LCA) dos sistemas de cultivo arroz-arroz e arroz-feijão-caupí na costa oeste da Índia. Perspectiva "do berço ao portão" na avaliação do impacto ambiental.	Emissões totais de GEE 81% maiores no sistema arroz-arroz comparado ao sistema arroz-feijão-caupí. Maiores emissões de GEE no sistema arroz-arroz devido ao uso de fertilizantes, diesel e maquinaria. Consumo de energia significativamente menor no sistema arroz-feijão-caupí (44% menor) e maior eficiência energética (11,6 vs. 4,8). Uso maior de recursos renováveis, como esterco

				de curral, no sistema arroz-feijão-caupí. Adoção em larga escala do sistema arroz-feijão-caupí na costa oeste da Índia pode reduzir o impacto ambiental e melhorar a eficiência energética.
Implications of Climate Change on Wind Energy Potential	2023	Métodos para detectar a sujidade em painéis fotovoltaicos	Algoritmos de classificação estatística utilizando fotos e vídeos de alta resolução	Alta taxa de detecções corretas, método simples e econômico
Cost of Energy Consumption and Return of Excise Tax on Motor Fuels vs. the Durability of Operations and Financial Sustainability in Polish Agriculture	2023	Consumo de energia na produção de leite em pó integral	Abordagem de consumo cumulativo de exergia, análise de todas as etapas do processo	Implementação de energia renovável e alimentação em pasto aumentou a eficiência de exergia

Life cycle assessment of Iran energy portfolio Renewable energy replacement approach	2023	Impacto da tecnologia digital na intensidade das emissões de carbono na agricultura	Análise de dados de painel (2011-2019) para medir o impacto da tecnologia digital	Tecnologia digital suprime significativamente a intensidade das emissões de carbono
Prospects of Hybrid Energy in Saudi Arabia, Exploring Irrigation Application in Shaqra	2022	Uso de fontes de energia híbrida (eólica e solar) para atender à demanda energética de sistemas de irrigação em Shaqra, Arábia Saudita.	Avaliação de necessidades hídricas de culturas e demanda energética do sistema de bombeamento	Sistema de energia híbrida é mais econômico e gera mais energia que sistema solar PV único
Energy Assessment of Sorghum Cultivation in Southern Ukraine	2021	Estudo da produção de biomassa e eficiência energética do sorgo (silagem e grão) em regiões áridas, baseado em experimentos de campo no sul da Ucrânia.	Identificação de mudanças climáticas, com aumento da temperatura e diminuição da precipitação. Entradas totais de energia para sorgo doce estimadas em 11.256 GJ/ha, com fertilizantes minerais	O sorgo se mostrou uma cultura promissora para regiões áridas, com alta eficiência energética tanto para silagem quanto para grãos, destacando-se como uma alternativa viável aos

			contribuindo com 56,99%. O rendimento alcançado foi de 40,6 t/ha com precipitação anual de 350 mm. A relação de eficiência energética foi de 11,18. As entradas totais de energia para sorgo em grão foram de 16.081 GJ/ha. com rendimento variando de 1,92 a 7,05 t/ha e relação de eficiência energética entre 2,8 e 16.7.	combustíveis fósseis.
Recent Advancements in Technical Design and Thermal Performance Enhancement of Solar Greenhouse Dryers	2021	Revisão da integração de secadores de estufas com tecnologias solares para preservar produtos agrícolas, visando reduzir as emissões de gases de	A integração de secadores de estufas com tecnologias solares, incluindo fotovoltaica (PV), fotovoltaico-térmica (PVT) e coletores solares térmicos, foi	A energia solar sustentável é eficaz para aplicações de secagem devido à sua alta acessibilidade e. A análise econômica dos SGHDs é um fator-chave para torná-los

		efeito estufa e desperdício de alimentos.	investigada. Também foram analisadas as configurações híbridas de secadores assistidos por energia solar (SGHDs) com bombas de calor e unidades de armazenamento de energia térmica (TES), considerando a integração com outras fontes de energia renovável. O estudo discute os avanços mais recentes e apresenta uma análise econômica dos SGHDs.	comercialmente viáveis.
Building a Sustainable Energy Community Design and Integrate Variable Renewable Energy Systems for Rural	2022	Proposta de um sistema de energia híbrido descentralizado composto por fotovoltaicos (PV) e turbinas eólicas (WT)	Modelo dinâmico construído para estimar a demanda energética horária de edifícios residenciais e requisitos energéticos para irrigação	O custo da energia (COE) para o sistema híbrido otimizado é de \$0.1053/kWh com penetração de energia renovável de

Communities		conectado à rede elétrica local para uma comunidade e em Najran, Arábia Saudita, visando atender à demanda energética residencial e de irrigação.	de uma fazenda. Software HOMER utilizado para otimizar o sistema de energia híbrido proposto. Rede neural artificial (ANN) utilizada para estimar com sucesso a energia PV e eólica, com valores R^2 de 0.928 e 0.993, respectivamente.	65%. O sistema proposto economiza 233 toneladas de gases de efeito estufa anualmente.
Decreasing the Battery Recharge Time if Using a Fuzzy Based Power Management Loop for an Isolated Micro-Grid Farm	2022	Identificação de soluções eficientes para gerenciamento de fluxo de energia em micro-redes isoladas, utilizando controladores de lógica fuzzy.	Micro-redes isoladas consistem em ao menos um gerador de energia, sistema de armazenamento e uma porção de carga. O gerenciamento do fluxo de energia de várias fontes deve garantir a segurança do hardware. A abordagem utiliza um controlador	O sistema proposto de gerenciamento de energia é benéfico para aplicações de armazenamento de energia, garantindo rendimento energético sob todas as condições climáticas.

			de lógica fuzzy para gerenciar o equipamento da micro-rede isolada, simulada na plataforma MATLAB/Simulink. Resultados mostram que o controlador fuzzy pode reduzir o tempo de recarga da bateria pela metade. Especificações do controlador foram usadas para avaliar o desempenho energético do sistema híbrido em uma situação real.	
Analysis of methodological bases of energy-economic assessment of agricultural technologies and projects	2021	Necessidade de consumo racional de energia em todos os setores econômicos, incluindo a agricultura, utilizando uma	A aplicação do método de estimativa energético-econômica (bioenergética) permite comparar os custos de cultivo de plantas ou manutenção	A avaliação energético-econômica é essencial para comparar custos e resultados em um contexto de mudanças tecnológicas

		abordagem transversal para a gestão de economia de energia e justificando medidas de apoio econômico para a introdução de tecnologias e projetos de economia de energia.	de animais com os resultados da produção em unidades de medida únicas. O artigo apresenta uma abordagem para melhorar a metodologia de avaliação energético-econômica de tecnologias e projetos agrícolas ao usar fontes de energia renováveis nos processos tecnológicos.	e organizacionais constantes e digitalização da tecnologia e da economia. É necessário continuar as pesquisas para melhorar a metodologia de avaliação e atualizar regularmente os equivalentes energéticos.
Research on the Operational Strategy of the Hybrid WindPVSmall-Hydropower Facility-Agriculture System Based on a Micro-grid	2022	Otimização da operação de um sistema híbrido composto por energia eólica, fotovoltaica (PV) e hidrelétrica para a agricultura em instalações, utilizando o método de enxame de	O estudo construiu um sistema híbrido de energia eólica/PV/pequena hidrelétrica para a agricultura em instalações. Aplicou-se o método de enxame de partículas caóticas para otimizar a	A estratégia operacional maximiza a utilização dos recursos eólicos e solares e aloca racionalmente os recursos hidrelétricos, fornecendo uma base para a alocação e programação da capacidade

		partículas caóticas.	operação do sistema híbrido e propor uma estratégia de programação. A estratégia operacional proposta maximiza a utilização dos recursos eólicos e solares e aloca racionalmente os recursos hidrelétricos, com base nas curvas de carga de fornecimento para energia eólica, PV e hidrelétrica.	do sistema híbrido.
Vital Factors Stimulating Development and Competitiveness of Design and Construction Enterprises of Photovoltaic Farms	2021	Identificação e avaliação de fatores vitais que impactam o desenvolvimento de empresas de design e construção de fazendas fotovoltaicas nos mercados de energia renovável.	O estudo é dividido em duas partes: uma epistemológica, que discute condicionamentos e restrições dos mercados de RES em termos de desenvolvimento sustentável usando consultas literárias, atos	O estudo encontrou fatores chave que impactam o desenvolvimento e competitividade de projetos fotovoltaicos. A hierarquia dos objetivos estratégicos e as ameaças à posição de mercado das empresas

			legislativos e administrativo s e relatórios para a Comissão Europeia. A segunda parte é empírica, resumindo os resultados da pesquisa sobre oportunidade s e ameaças na gestão de projetos de fazendas fotovoltaicas em empresas de produção de aparelhos de energia. A pesquisa foi conduzida com 24 empresas, focando na agregação e avaliação de fatores que estimulam o desenvolvimento e competitividade de desses projetos, utilizando uma escala Likert de cinco pontos e critérios quantitativos de indicações.	investigadas foram consideradas.
--	--	--	---	---

Economy-energy-environment nexus the potential of agricultural value-added toward achieving China's dream of carbon neutrality	2023	Investigar influências de longo e curto prazo do valor agregado da agricultura, crescimento econômico (PIB) e uso de energia nas emissões de CO2 na China.	Método de Autorregressivo de Defasagem Distribuída (ARDL) e verificação da robustez dos resultados com FMOLS, DOLS e CCR. Resultados mostram que aumento no valor agregado da agricultura reduz emissões de CO2.	Relação em forma de U invertido entre crescimento econômico e poluição ambiental. Recomendações políticas incluem promoção de agricultura inteligente para o clima e integração de fontes de energia renovável.
Features of sustainable economic development in the Central Asian countries	2021	Considerar as consequências das mudanças climáticas e tecnológicas na República do Quirguistão e desenvolver direções para resolver esses problemas.	Impacto das mudanças climáticas na redução de água doce, produção agrícola e uso de fontes de energia tradicionais; desenvolvimento de um modelo de desenvolvimento verde relacionado ao uso de energia renovável.	Propostas de desenvolvimento de fontes de energia alternativas para compensar a perda de fontes de energia devido ao aquecimento climático e diminuição dos recursos hídricos.
Energy and economic	2022	Propor um método	Metodologia inclui	Configuração final

efficiency of climate-smart agriculture practices in a rice-wheat cropping system of India		para apoiar o desenvolvimento sustentável de cidades existentes otimizando o uso de suas superfícies urbanas.	sistematização das abordagens existentes e proposição de um novo método para a aplicação efetiva dessas soluções; procedimento analítico para integração de diferentes usos das superfícies.	melhorou o conforto térmico externo e garantiu a produção de energia renovável e preservação de áreas verdes.
Location and Technical Requirements for Photovoltaic Power Stations in Poland	2022	Avaliar a eficiência macroeconômica dos investimentos em instalações fotovoltaicas para atender à demanda por eletricidade de fazendas e produção agrícola na Polônia.	Análise incluiu NPV, PP e IRR para 48 variantes em 16 locais diferentes na Polônia, abrangendo três tipos de fazendas.	Produção de eletricidade usando instalações fotovoltaicas mostrou alta eficiência, com NPV variando de EUR 8200 a quase EUR 23,000 e IRR entre 21% e 32%.
What drives low-carbon agriculture The experience of farms from the Wielkopols	2022	Identificar os fatores que impulsionam a agricultura de baixo carbono nas fazendas da	Modelo de medição de múltiplos fatores para modelagem de equações estruturais (SEM) com dados de 120	Produtividade dos fatores e eficiência no uso de fertilizantes e energia têm efeitos positivos na agricultura

ka region in Poland		região da Wielkopolska, Polônia.	fazendas em 2020.	de baixo carbono. Questões de fertilizantes e isolamento térmico devem ser incluídas nas políticas energéticas.
Economic and Environmental Aspects of Agriculture in the EU Countries	2021	Determinar a eficiência econômica, energética e ambiental da agricultura nos estados-membros da UE em 2019.	Método de Análise de Envoltória de Dados (DEA) focado na minimização de insumos, adotando indicadores de produtividade energética e eficiência na emissão de gases de efeito estufa (GHC).	Sete dos 26 países da UE possuem agricultura eficiente. Foram definidos benchmarks para melhorar a eficiência nos países com agricultura ineficiente.
Edible Energy Production and Energy Return on Investment -Long-Term Analysis of Global Changes	2021	Calcular o EROI da produção de alimentos de culturas e animais a longo prazo em todo o mundo.	Análise do EROI da produção de culturas alimentares e animais, considerando o consumo direto de combustíveis fósseis e eletricidade.	Regiões subdesenvolvidas apresentam o maior EROI, mas a produção de energia comestível é insuficiente. Regiões desenvolvidas têm menor EROI, mas garantem

				autossuficiência alimentar.
RETRACTED A New Method to Energy Saving in a Micro Grid	2015	Sistemas híbridos de energia renovável	Avaliação de sistemas híbridos (solar, eólico, armazenamento) para substituir a extensão da rede elétrica convencional.	Redução de custos de fornecimento de energia em 40%, redução de emissão de CO2 em 18%.
Effect of a Sustainable Air Heat Pump System on Energy Efficiency, Housing Environment, and Productivity Traits in a Pig Farm	2020	Energias renováveis no Reino Unido	Revisão do desenvolvimento de fazendas solares no Reino Unido, com foco nos desafios de planejamento e políticas locais para a implementação de energia solar.	Aumento das pressões para o desenvolvimento de fazendas solares no Reino Unido, com desafios de impactos ambientais e sociais.
The impacts of the Brazilian NDC and their contribution to the Paris agreement on climate change	2019	Eficiência energética na agricultura	Análise da eficiência energética na agricultura de Uttarakhand, Índia, incluindo agrofloresta e jardins domésticos.	Identificação de sistemas mais eficientes em termos energéticos com uma relação de entrada/saída positiva, especialmente no sistema agroflorestal.

The use of renewable energy sources in integrated energy supply systems for agriculture	2020	Agricultura e mudanças climáticas	Análise dos impactos das mudanças climáticas na agricultura da África Subsaariana, com foco em mitigação.	Estratégias de mitigação, incluindo práticas agrícolas sustentáveis, podem reduzir os impactos climáticos na produção agrícola.
Cost-, Cumulative Energy- and Emergy Aspects of Conventional and Organic Winter Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Cultivation	2016	Agricultura sustentável	Comparação entre sistemas agrícolas orgânicos e convencionais em termos de custo e eficiência energética.	A produção orgânica usa menos energia, mas com menor rendimento; o convencional é mais eficiente, porém com maior impacto ambiental.
Economic and Energy Efficiency of Farms in Poland	2021	Mitigação de emissões no setor agrícola	Potencial de redução de emissões de não-CO2 no setor agrícola, especialmente em países desenvolvidos e em desenvolvimento.	A agricultura pode reduzir 1 GtCO ₂ e/ano até 2030 com a adoção de práticas de mitigação técnica e estrutural.
Energy conservation	2021	Energia renovável	Análise de sistemas de	O sistema de controle

n and energy efficiency improvement in Russian agribusinesses		na agricultura	controle inteligente para turbinas eólicas em fazendas. Uso de sensores e dispositivos IoT para otimizar o funcionamento das turbinas eólicas.	inteligente melhora a eficiência e a manutenção das turbinas eólicas.
Formation of the organizational-economic mechanism of agricultural enterprises energy efficiency	2017	Bioeconomia	Estudo sobre a integração de empresas no contexto da bioeconomia e o papel das energias renováveis, biotecnologias e sustentabilidade.	Proposta de soluções para integração e desenvolvimento de clusters empresariais sustentáveis.
Smart Resource Management - An Innovative Way of Balancing Materials, Energy, and Waste for a Green Future	2023	Energias renováveis em sistemas agrícolas	Estudo sobre o uso de energias renováveis, como a energia solar, para sistemas de irrigação agrícola e impacto econômico e ambiental.	Identificação dos cenários mais viáveis e rentáveis ao usar energias renováveis em sistemas agrícolas.
Neural Network based wind energy	2023	Emissões de gases e eficiência energética	Análise do impacto da utilização de fontes de	Resultados mostram a eficiência energética

model developed over Anantapur, Andhra Pradesh, India		na agricultura	energia renovável em sistemas agrícolas, focando em sua eficiência energética, sustentabilidade e redução de emissões de carbono.	aprimorada em sistemas híbridos de energia, com redução de emissões de carbono.
Intellectual and cognitive structures of the agricultural competitiveness research under climate change and structural transformation	2023	Competitividade agrícola	Análise do impacto de fatores como mudanças climáticas e segurança alimentar na competitividade de agrícola e nas tendências de pesquisa sobre o tema.	Aumento da atenção sobre a competitividade de agrícola devido a fatores externos, como mudanças climáticas e insegurança alimentar.
Irrigation and energy issues and challenges	2020	Eficiência energética na agricultura extensiva	Proposta de indicadores de sustentabilidade energética aplicados em sistemas de pecuária.	O estudo revelou ganhos em eficiência energética e redução do impacto ambiental nas práticas de pecuária extensiva.
Potential of conservation	2021	Eficiência energética	Avaliação da eficiência energética de	Práticas de agricultura conservacioni

agriculture modules for energy conservation and sustainability of rice-based production systems of Indo-Gangetic Plain region		na agricultura	sistemas agrícolas com base na utilização de diferentes práticas de manejo agrícola e técnicas para conservação de energia.	sta (CA) reduziram os requisitos energéticos, aumentaram a produtividade e energética e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.
Bibliometric Evaluation of Energy Efficiency in Agriculture	2023	Eficiência energética na agricultura	Análise de sistemas de produção agrícola com foco na eficiência energética, buscando alternativas sustentáveis.	A pesquisa destaca a importância das práticas agrícolas para melhorar a eficiência energética, com ênfase em fontes renováveis.
An Intelligent Dual-Axis Solar Tracking System for Remote Weather Monitoring in the Agricultural Field	2023	Energia renovável no setor agrícola	Estudo sobre o uso de energia solar e fotovoltaica, com foco em sua aplicação na agricultura para monitoramento e aumento de eficiência.	A implementação de sistemas de rastreamento solar pode aumentar a geração de energia, com resultados mostrando um aumento de até 52% na geração de energia.

¹ Discente do Curso de Doutorado no Programa de Pós Graduação em Administração da Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Docente do Programa de Pós Graduação em Administração da Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)