



ANAIS

ELETRIFICAÇÃO DA MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA COM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA: UM MODELO DE DECISÃO PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA

ALYSSON LEONEL DA SILVA

alysson.leonel@unesp.br

UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

RESUMO: A eletrificação da mecanização agrícola, associada à geração de energia fotovoltaica, apresenta-se como uma alternativa para redução da dependência de combustíveis fósseis e dos custos operacionais no agronegócio. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo desenvolver um modelo de tomada de decisão para avaliar a viabilidade econômico-financeira da substituição de tratores movidos a diesel por tratores elétricos alimentados por geração fotovoltaica própria. A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quantitativa e caráter exploratório, sendo estruturada a partir de um Cenário Simulado de Referência (CSR) representativo de uma propriedade produtora de amendoim com 100 hectares. O modelo foi organizado em etapas que contemplaram a caracterização da propriedade e da frota, estimativa do consumo energético, dimensionamento do sistema fotovoltaico, levantamento dos investimentos e análise econômico-financeira. No cenário analisado, foram considerados dois tratores de 75 cv, com consumo estimado de 24.000 litros de diesel por ano, equivalente a uma despesa anual de R\$ 144.000,00. Para a eletrificação, estimou-se demanda de aproximadamente 110.000 kWh anuais e sistema fotovoltaico de 80 kWp. O investimento total foi estimado em R\$ 1.480.000,00, com economia operacional potencial de R\$ 144.000,00 ao ano e Payback Simples de aproximadamente 10,3 anos. Os resultados indicaram viabilidade técnica da integração entre mecanização elétrica e geração fotovoltaica, porém classificaram o cenário como Parcialmente Viável, em razão do elevado investimento inicial. O modelo proposto constitui uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, permitindo integrar aspectos técnicos, energéticos e econômico-financeiros na avaliação preliminar da eletrificação da mecanização agrícola.

PALAVRAS CHAVE: Eletrificação agrícola; Mecanização agrícola; Energia fotovoltaica; Viabilidade econômico-financeira; Tomada de decisão.

ABSTRACT: The electrification of agricultural mechanization, combined with photovoltaic power generation, represents an alternative for reducing dependence on fossil fuels and operational costs in agribusiness. In this context, this study aimed to develop a decision-making model to assess the economic and financial feasibility of replacing diesel-powered tractors with electric tractors supplied by on-site photovoltaic generation. The research is characterized as applied, quantitative, and exploratory, based on a Simulated Reference Scenario (SRS) representing a 100-hectare peanut-producing farm. The proposed model was structured into stages comprising farm and fleet characterization, energy consumption estimation, photovoltaic system sizing, investment assessment, and economic and financial analysis. In the analyzed scenario, two 75-hp tractors were considered, with an estimated annual consumption of 24,000 liters of diesel, corresponding to an annual expenditure of R\$ 144,000. For the electrified system, annual electricity demand was estimated at approximately 110,000 kWh, requiring an 80-kWp photovoltaic system. The total investment was estimated at R\$ 1.48 million, with potential annual operating savings of R\$ 144,000 and a Simple Payback of approximately 10.3 years. The results indicated the technical feasibility of integrating electric agricultural machinery with photovoltaic generation; however, the scenario was classified as Partially Viable due to the high initial investment required. The proposed model provides a decision-support tool capable of integrating technical, energy, and economic-financial aspects to support the preliminary assessment of agricultural mechanization electrification.

KEY WORDS: Agricultural electrification; Agricultural mechanization; Photovoltaic energy; Economic and financial feasibility; Decision-making.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alimentos, associada à necessidade de redução dos impactos ambientais das atividades produtivas, tem impulsionado a busca por alternativas tecnológicas capazes de promover maior eficiência energética e sustentabilidade no agronegócio. Nesse contexto, a transição energética tem se consolidado como uma das principais estratégias para redução da dependência de combustíveis fósseis, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e para o fortalecimento da competitividade das propriedades rurais (The State. . . , 2022; Climate. . . , 2023; INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2021).

Entre os insumos energéticos utilizados na agricultura, o óleo diesel ocupa posição de destaque por abastecer grande parte da mecanização agrícola empregada nas operações de preparo do solo, semeadura, tratos culturais e colheita. Apesar de sua ampla utilização, a volatilidade dos preços dos combustíveis, os custos operacionais associados e as pressões por sistemas produtivos mais sustentáveis têm estimulado discussões sobre alternativas energéticas para o setor agropecuário. Nesse cenário, a eletrificação da mecanização agrícola surge como uma tendência tecnológica observada em diversos países, impulsionada pelos avanços nos sistemas de armazenamento de energia, na eficiência dos motores elétricos e na expansão das fontes renováveis de geração elétrica (Jensen; Antille; Tullberg, 2024; Scolaro et al., 2021).

Nos últimos anos, fabricantes internacionais de máquinas agrícolas têm desenvolvido protótipos e modelos comerciais de tratores elétricos destinados principalmente a atividades de pequeno e médio porte, demonstrando o potencial da eletrificação para redução de custos operacionais, diminuição da dependência de combustíveis fósseis e redução das emissões atmosféricas associadas às operações agrícolas (Scolaro et al., 2021). Paralelamente, a geração fotovoltaica distribuída tem apresentado expressivo crescimento no meio rural, favorecida pela redução dos custos de implantação dos sistemas, pela disponibilidade de radiação solar e pela busca por maior autonomia energética nas propriedades rurais (Ghasemi; Sadeghkhani, 2025). A integração entre mecanização elétrica e geração fotovoltaica própria representa, portanto, uma alternativa potencialmente capaz de contribuir para a sustentabilidade econômica e ambiental das atividades agropecuárias (Scolaro et al., 2021).

Entretanto, embora os avanços tecnológicos relacionados aos tratores elétricos e à geração fotovoltaica sejam evidentes, a adoção dessas tecnologias no contexto agrícola brasileiro ainda é limitada (Gade; W; V, 2025). Além das barreiras associadas ao elevado investimento inicial e à necessidade de infraestrutura energética adequada, observase escassez de estudos voltados à avaliação integrada dos aspectos técnicos e econômico-financeiros relacionados à substituição de tratores movidos a diesel por tratores elétricos alimentados por sistemas fotovoltaicos instalados na própria propriedade (Kozak; Bonev, 2026). Verificase, ainda, a ausência de modelos simplificados que auxiliem produtores rurais e gestores na análise da viabilidade dessa transição energética.

Diante desse cenário, surge o seguinte problema de pesquisa: a substituição de tratores movidos a diesel por tratores elétricos alimentados por geração fotovoltaica própria apresenta viabilidade econômico-financeira para propriedades rurais brasileiras, considerando os investimentos necessários para implantação da tecnologia?

A investigação dessa questão mostrase relevante diante da crescente necessidade de redução dos custos operacionais da atividade agrícola e da busca por alternativas energéticas mais sustentáveis (Jensen; Antille; Tullberg, 2024). Além disso, a elaboração de ferramentas de apoio à tomada de decisão pode contribuir para reduzir as incertezas relacionadas aos investimentos em novas tecnologias, favorecendo a adoção de soluções inovadoras voltadas à eficiência energética e à sustentabilidade no meio rural.

Assim, o presente estudo possui como objetivo desenvolver um modelo de tomada de decisão para avaliar a viabilidade econômicofinanceira da eletrificação da mecanização agrícola por meio da substituição de tratores movidos a diesel por tratores elétricos alimentados por geração fotovoltaica própria. Especificamente, buscase: (i) caracterizar um Cenário Simulado de Referência (CSR) representativo de uma propriedade rural produtora de amendoim; (ii) estimar os investimentos necessários para substituição da frota de tratores movidos a diesel por tratores elétricos e para implantação da geração fotovoltaica própria; (iii) comparar os custos operacionais dos sistemas avaliados; (iv) calcular indicadores de viabilidade econômicofinanceira, como Payback Simples, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR); e (v) propor um modelo estruturado de apoio à tomada de decisão para adoção da eletrificação da mecanização agrícola. Para demonstrar a aplicação do modelo proposto, foi elaborado um Cenário Simulado de Referência (CSR) representativo de uma propriedade rural produtora de amendoim, permitindo a análise integrada dos investimentos necessários, dos custos operacionais e dos indicadores de viabilidade econômica associados à adoção da tecnologia.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Eletrificação da mecanização agrícola

A mecanização agrícola desempenha papel fundamental no aumento da produtividade e da eficiência das operações realizadas no campo, sendo considerada um dos principais fatores responsáveis pela modernização da agricultura nas últimas décadas (Jensen; Antille; Tullberg, 2024). Tradicionalmente, as máquinas agrícolas utilizadas nas atividades de preparo do solo, plantio, pulverização e transporte são movidas por motores a combustão interna abastecidos principalmente por óleo diesel, combustível que apresenta elevada densidade energética e ampla disponibilidade para atendimento das demandas operacionais do setor agropecuário (Scolaro et al., 2021).

Apesar de sua importância para o desenvolvimento da agricultura moderna, a dependência do diesel tem sido objeto de discussões relacionadas aos custos operacionais, à volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis e aos impactos ambientais decorrentes das emissões atmosféricas associadas à sua utilização (Jensen; Antille; Tullberg, 2024). Nesse contexto, a busca por alternativas energéticas mais sustentáveis tem impulsionado pesquisas e investimentos voltados à eletrificação da mobilidade e, mais recentemente, da mecanização agrícola (Gade; W; V, 2025).

A eletrificação da mecanização agrícola consiste na substituição parcial ou total dos sistemas de propulsão convencionais por motores elétricos alimentados por baterias ou outras fontes de energia elétrica (Scolaro et al., 2021). Essa tendência tem sido observada em diversos segmentos produtivos, acompanhando os avanços tecnológicos relacionados ao armazenamento de energia, à eficiência dos motores elétricos e à redução gradual dos custos das baterias (Gade; W; V, 2025). Entre os potenciais benefícios associados à adoção de tratores elétricos destacam-se a redução dos custos operacionais, a diminuição das necessidades de manutenção mecânica, a redução dos níveis de ruído e a eliminação das emissões diretas de gases poluentes durante a operação (Kozak; Bonev, 2026).

Nos últimos anos, fabricantes internacionais de máquinas agrícolas têm desenvolvido protótipos e equipamentos comerciais destinados principalmente a atividades de pequeno e médio porte, evidenciando o avanço da eletrificação no setor (Gade; W; V, 2025). Embora a tecnologia ainda apresente desafios relacionados à autonomia operacional, ao tempo de recarga e ao elevado investimento inicial, observase crescente interesse na avaliação de sua viabilidade para diferentes contextos produtivos (Kozak; Bonev, 2026).

Nesse cenário, a eletrificação da mecanização agrícola representa uma alternativa promissora para redução da dependência de combustíveis fósseis e para fortalecimento das estratégias de sustentabilidade no agronegócio, especialmente quando associada à geração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis instaladas na própria propriedade rural (Kozak; Bonev, 2026).

2.2. Energia fotovoltaica no agronegócio

A geração fotovoltaica tem se destacado como uma das principais tecnologias utilizadas para expansão da participação das fontes renováveis na matriz energética mundial (Haegel et al., 2019). Baseada na conversão direta da radiação solar em energia elétrica, essa tecnologia apresenta vantagens relacionadas à disponibilidade do recurso solar, à baixa necessidade de manutenção e à possibilidade de instalação próxima ao local de consumo, reduzindo perdas associadas à transmissão e distribuição de energia (Haegel et al., 2019).

No Brasil, a expansão da geração fotovoltaica foi impulsionada pelo avanço da geração distribuída, permitindo que consumidores produzam sua própria energia elétrica e utilizem a rede de distribuição como mecanismo de compensação energética (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2025). Esse modelo favorece a adoção de sistemas fotovoltaicos em propriedades rurais, onde a disponibilidade de áreas para instalação e os elevados consumos energéticos associados às atividades produtivas tornam os investimentos potencialmente atrativos (Valadão et al., 2025).

No meio rural, a energia fotovoltaica tem sido utilizada para abastecimento de sistemas de irrigação, resfriamento de leite, bombeamento de água, armazenagem de produtos agrícolas e atendimento das demandas energéticas de agroindústrias familiares (EMBRAPA, 2023). Além da redução dos custos com energia elétrica, a tecnologia contribui para ampliar a autonomia energética das propriedades e reduzir a exposição dos produtores às oscilações tarifárias do setor elétrico (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2025).

A crescente redução dos custos de implantação observada nos últimos anos tem ampliado a competitividade econômica dos sistemas fotovoltaicos, favorecendo sua integração a diferentes modelos produtivos (Haegel et al., 2019). Nesse contexto, a utilização da energia solar para alimentação de máquinas agrícolas eletrificadas surge como uma possibilidade de expansão dos benefícios proporcionados pela geração distribuída no ambiente rural (Scolaro et al., 2021; Kozak; Bonev, 2026).

A combinação entre geração fotovoltaica própria e mecanização elétrica pode contribuir para a construção de sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis, reduzindo simultaneamente os custos operacionais associados ao consumo de combustíveis fósseis e as emissões ambientais decorrentes das atividades agrícolas (Scolaro et al., 2021; Kozak; Bonev, 2026).

2.3. Viabilidade econômicofinanceira e tomada de decisão

A adoção de novas tecnologias no ambiente organizacional está diretamente relacionada à capacidade de geração de benefícios capazes de justificar os investimentos necessários para sua implementação (Rogers, 2003). No contexto do agronegócio, decisões relacionadas à aquisição de máquinas, equipamentos e sistemas energéticos demandam análises criteriosas que permitam avaliar os impactos financeiros associados à implantação das tecnologias e seus efeitos sobre a competitividade do empreendimento (Porter, 1985; Barney, 1991).

A análise de viabilidade econômicofinanceira constitui uma ferramenta amplamente utilizada para apoiar processos de tomada de decisão, permitindo comparar custos, benefícios, riscos e retornos esperados ao longo do horizonte de vida útil dos investimentos (ASSAF

NETO, 2016). Por meio dessa análise, gestores podem avaliar se determinado projeto apresenta potencial para gerar benefícios econômicos compatíveis com os recursos necessários para sua implantação (GITMAN, 2010).

Entre os indicadores mais utilizados destacam-se o Payback Simples, o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) (ASSAF NETO, 2016). O Payback Simples permite estimar o período necessário para recuperação do capital investido, fornecendo uma medida de fácil compreensão para avaliação preliminar de projetos. O Valor Presente Líquido considera o valor do dinheiro no tempo e permite verificar se os fluxos de caixa futuros são capazes de gerar retorno superior ao investimento inicial. Já a Taxa Interna de Retorno representa a taxa de desconto que iguala os benefícios futuros ao investimento realizado, sendo amplamente utilizada na comparação entre alternativas de investimento.

Além dos aspectos estritamente financeiros, processos de tomada de decisão envolvendo tecnologias sustentáveis podem considerar benefícios indiretos relacionados à redução de impactos ambientais, ao aumento da eficiência energética e ao fortalecimento da imagem institucional dos empreendimentos. Dessa forma, a análise integrada dos aspectos técnicos, econômicos e estratégicos tornase fundamental para apoiar decisões relacionadas à adoção de soluções inovadoras no meio rural.

No caso da eletrificação da mecanização agrícola associada à geração fotovoltaica própria, a avaliação econômicofinanceira assume papel central, uma vez que os elevados investimentos iniciais característicos dessas tecnologias exigem análises capazes de demonstrar a viabilidade da substituição dos sistemas convencionais por alternativas energeticamente mais sustentáveis.

3. METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa e caráter exploratório, desenvolvida com o objetivo de propor um modelo de tomada de decisão para avaliação da viabilidade econômicofinanceira da eletrificação da mecanização agrícola por meio da substituição de tratores movidos a diesel por tratores elétricos alimentados por geração fotovoltaica própria (GIL, 2019).

Quanto aos procedimentos metodológicos, a pesquisa foi conduzida por meio da elaboração e aplicação de um Cenário Simulado de Referência (CSR), construído a partir de parâmetros representativos de uma propriedade rural produtora de amendoim. A utilização do cenário simulado permitiu analisar os impactos econômicos da adoção da tecnologia sem a necessidade de implantação física do sistema, possibilitando a avaliação preliminar da viabilidade do investimento em condições controladas.

A construção do modelo proposto foi estruturada em cinco etapas sequenciais. A primeira etapa consistiu na caracterização da propriedade rural e da frota agrícola existente, contemplando aspectos relacionados à área cultivada, ao perfil produtivo e às características dos tratores utilizados nas operações agrícolas. A segunda etapa envolveu a estimativa do consumo energético associado à operação da frota movida a diesel, permitindo estabelecer uma linha de base para comparação com o cenário eletrificado.

Na terceira etapa foi realizada a estimativa da demanda elétrica necessária para operação dos tratores elétricos considerados no estudo, bem como o dimensionamento preliminar do sistema fotovoltaico necessário para suprimento dessa demanda energética. Em seguida, na quarta etapa, foram estimados os investimentos necessários para aquisição dos equipamentos e implantação da infraestrutura energética requerida para operação do sistema.

Por fim, na quinta etapa, procedeu-se à análise econômicofinanceira do investimento, contemplando a comparação entre os custos operacionais dos sistemas analisados e a aplicação de indicadores amplamente utilizados na avaliação de projetos de investimento

ANAIS

(ASSAF NETO, 2016). Foram considerados o Payback Simples, o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), permitindo avaliar o potencial de retorno econômico associado à eletrificação da mecanização agrícola.

O fluxo metodológico adotado no estudo é apresentado na Figura 1.

FIGURA 1. Fluxo metodológico do estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para avaliação da viabilidade econômica foram considerados os investimentos iniciais associados à substituição da frota agrícola e à implantação do sistema fotovoltaico, bem como os custos operacionais estimados para cada cenário analisado. Os resultados obtidos permitiram classificar a atratividade econômica da tecnologia e subsidiar a tomada de decisão

quanto à sua potencial adoção em propriedades rurais com características semelhantes às consideradas neste estudo.

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE TOMADA DE DECISÃO

A adoção de novas tecnologias no ambiente rural envolve decisões que transcendem aspectos exclusivamente técnicos, exigindo a avaliação integrada de fatores econômicos, energéticos e operacionais. No caso da eletrificação da mecanização agrícola, a necessidade de investimentos significativos em equipamentos e infraestrutura energética torna fundamental a utilização de instrumentos que auxiliem produtores rurais na análise prévia da viabilidade da tecnologia.

Com essa finalidade, foi desenvolvido um modelo de tomada de decisão estruturado para apoiar a avaliação da substituição de tratores movidos a diesel por tratores elétricos alimentados por geração fotovoltaica própria. O modelo proposto busca organizar de forma sistemática as informações necessárias à análise do investimento, permitindo a comparação entre o sistema convencional e o sistema eletrificado.

A estrutura do modelo foi organizada em cinco etapas sequenciais, contemplando desde a caracterização da propriedade até a avaliação dos indicadores econômico-financeiros. O processo foi concebido para utilização em análises preliminares de viabilidade, possibilitando sua aplicação em diferentes propriedades rurais mediante adaptação dos parâmetros produtivos e energéticos.

A primeira etapa consiste na caracterização da propriedade rural, contemplando informações relacionadas à atividade produtiva desenvolvida, área cultivada, perfil operacional e utilização da mecanização agrícola. Nessa fase são identificadas as principais características do empreendimento que influenciam a demanda por máquinas e equipamentos.

A segunda etapa corresponde ao diagnóstico da frota agrícola existente, incluindo o levantamento da quantidade de tratores utilizados, potência dos equipamentos, consumo de combustível e custos operacionais associados. Essas informações permitem estabelecer uma linha de base para comparação com o cenário futuro de eletrificação.

Na terceira etapa realizase a estimativa da demanda energética necessária para operação dos tratores elétricos equivalentes à frota atualmente utilizada. A partir dessa estimativa, procedese ao dimensionamento preliminar do sistema fotovoltaico capaz de suprir a demanda energética requerida pelas operações agrícolas consideradas no estudo.

A quarta etapa contempla a avaliação dos investimentos necessários para implantação da tecnologia, incluindo os custos associados à aquisição dos tratores elétricos, instalação do sistema fotovoltaico e demais adequações eventualmente necessárias para operação do sistema. Nessa fase também são estimadas as despesas operacionais associadas aos dois cenários analisados.

Por fim, a quinta etapa consiste na análise econômico-financeira do investimento, por meio da aplicação de indicadores como Payback Simples, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR). Os resultados obtidos permitem avaliar a atratividade econômica da substituição da frota convencional e subsidiar a tomada de decisão quanto à adoção da tecnologia.

O modelo proposto é apresentado na Figura 2.

ANAIS

FIGURA 2. Modelo de tomada de decisão para eletrificação da mecanização agrícola



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados produzidos pelo modelo permitem classificar a atratividade da eletrificação da mecanização agrícola em três categorias. A classificação “Viável” refere-se aos cenários em que os indicadores financeiros demonstram potencial de retorno econômico compatível com os investimentos realizados. A classificação “Parcialmente Viável” corresponde às situações em que a adoção da tecnologia apresenta benefícios potenciais, mas requer análises complementares ou condições específicas para sua implementação. Por sua vez, a classificação “Não Viável” representa cenários nos quais os investimentos necessários não são compensados pelos benefícios econômicos estimados dentro do horizonte de análise considerado.

A utilização desse modelo possibilita estruturar o processo de tomada de decisão de forma objetiva e sistematizada, reduzindo incertezas associadas à adoção de tecnologias emergentes e fornecendo subsídios para avaliação preliminar da eletrificação da mecanização agrícola em propriedades rurais.

5. APLICAÇÃO DO MODELO AO CENÁRIO SIMULADO

5.1. Caracterização do cenário simulado de referência

Com o objetivo de demonstrar a aplicabilidade do modelo de tomada de decisão proposto, foi elaborado um Cenário Simulado de Referência (CSR) representativo de uma propriedade rural produtora de amendoim localizada em região de expressiva relevância para essa atividade agrícola no interior do estado de São Paulo.

O cenário foi estruturado para reproduzir condições compatíveis com propriedades rurais de médio porte que utilizam mecanização agrícola nas operações de preparo do solo, semeadura, tratos culturais e transporte interno. A escolha da cultura do amendoim ocorreu em função de sua relevância econômica regional e da utilização intensiva de máquinas agrícolas ao longo do ciclo produtivo.

Para fins de análise, considerouse uma propriedade rural com área cultivada de 100 hectares, cuja mecanização é realizada por uma frota composta por tratores movidos a óleo diesel. A partir desse cenário, foi simulada a substituição da frota convencional por tratores elétricos de capacidade operacional equivalente, alimentados por energia proveniente de um sistema fotovoltaico instalado na própria propriedade.

As características gerais consideradas no Cenário Simulado de Referência são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Caracterização do cenário simulado de referência

Variável	Valor Adotado
Atividade Agrícola	Produção de amendoim
Área cultivada	100 há
Sistema de mecanização atual	Tratores movidos à diesel
Sistema proposto	Tratores elétricos
Fonte energética proposta	Energia fotovoltaica
Finalidade da análise	Avaliação da viabilidade econômico-financeira
Método de análise	Modelo de tomada de decisão

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2 Caracterização da frota agrícola atual

A primeira etapa de aplicação do modelo consistiu na caracterização da frota agrícola atualmente utilizada na propriedade. O levantamento da frota tem como finalidade estabelecer uma linha de base para comparação com o cenário de eletrificação proposto.

Para o cenário analisado, considerouse a utilização de dois tratores agrícolas de médio porte empregados nas principais operações mecanizadas da cultura do amendoim. A adoção dessa configuração busca representar uma situação compatível com propriedades rurais de porte semelhante ao considerado neste estudo.

As características da frota considerada são apresentadas na Quadro 2.

QUADRO 2. Caracterização da frota agrícola atual

Equipamento	Quantidade
Trator agrícola movido a diesel	2 unidades
Potência nominal	A definir
Horas anuais de operação	A definir
Combustível utilizado	Óleo diesel

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.3 Cenário de eletrificação da mecanização agrícola

Após a caracterização da frota convencional, procedeu-se à construção do cenário de eletrificação da mecanização agrícola. Para fins de simulação, considerouse a substituição dos tratores movidos a diesel por tratores elétricos de capacidade operacional equivalente, mantendose as mesmas demandas produtivas e operacionais da propriedade.

A eletrificação da frota foi concebida de forma integrada à implantação de um sistema fotovoltaico próprio, destinado ao suprimento da demanda energética requerida pelos equipamentos. Essa abordagem permite avaliar o potencial de redução da dependência de combustíveis fósseis e a utilização de energia renovável gerada na própria propriedade rural. As características gerais do sistema proposto são apresentadas na Quadro 3.

QUADRO 3. Caracterização do sistema proposto

Variável	Valor
Tratores elétricos	A definir
Sistema fotovoltaico	A definir
Fonte energética	Energia solar fotovoltaica
Combustível substituído	Óleo diesel
Objetivo	Redução de custos operacionais

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.4. Estimativa do consumo energético da frota atual

Após a caracterização da frota agrícola considerada no Cenário Simulado de Referência, procedeu-se à estimativa do consumo energético associado à operação dos tratores movidos a diesel. Essa etapa tem como finalidade estabelecer uma linha de base para comparação com o cenário de eletrificação proposto.

Para fins de simulação, considerouse uma frota composta por dois tratores agrícolas de 75 cv, operando aproximadamente 1.000 horas por ano cada um, totalizando 2.000 horas anuais de operação. Adotouse consumo médio de 12 litros de diesel por hora de funcionamento, valor definido para o Cenário Simulado de Referência (CSR), compatível com estimativas de consumo para tratores agrícolas de potência equivalente descritas na literatura técnica de mecanização agrícola (Mialhe, 1974).

Com base nesses parâmetros, estimouse consumo anual de aproximadamente 24.000 litros de óleo diesel.

QUADRO 4. Estimativa do consumo anual da frota movida a diesel

Parâmetro	Cabeçalho
Quantidade de tratores	2 unidades
Potência nominal	75 cv
Horas anuais de operação por trator	1.000 h
Horas anuais totais	2.000 h
Consumo médio estimado	12 Lh ¹
Consumo anual de diesel	24.000 L

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Considerando o preço médio de R\$ 6,00 por litro de diesel, estimouse despesa anual aproximada de R\$ 144.000,00 relacionada exclusivamente ao abastecimento da frota agrícola. Esse valor representa o principal componente de custo operacional considerado para comparação com o cenário eletrificado.

5.5. Dimensionamento preliminar do sistema fotovoltaico

A partir da definição do cenário de eletrificação, procedeu-se à estimativa da demanda elétrica necessária para operação dos tratores elétricos equivalentes à frota convencional considerada no estudo.

Para fins de simulação, foi adotada potência equivalente de aproximadamente 55 kW por equipamento, compatível com tratores de porte semelhante aos utilizados no cenário atual. Mantendo-se as mesmas condições operacionais da propriedade, estimouse consumo anual de aproximadamente 110.000 kWh.

Com base nas estimativas de produtividade para sistemas fotovoltaicos disponibilizadas pelo CRESESB para localidades do interior do estado de São paulo, adotouse produtividade média anual de 1.600 kWh kWp¹ ano¹ para o Cenário Simulado de Referência (CRESESB, 2017) instalado para sistemas fotovoltaicos localizados no interior do estado de São Paulo, estimouse necessidade de instalação de sistema fotovoltaico com potência aproximada de 80 kWp, já contemplando margem operacional para perdas e variações de desempenho.

QUADRO 5. Dimensionamento preliminar do sistema fotovoltaico

Parâmetro	Valor
Potência estimada dos tratores elétricos	55 kW
Consumo anual estimado	110.000 kWh
Produtividade fotovoltaica considerada	1.600 kWh kWp ¹ ano ¹

Potência fotovoltaica calculada	69 kWp
Potência fotovoltaica adotada	80 kWp

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados indicam que a geração fotovoltaica própria apresenta potencial para suprir integralmente a demanda energética da frota elétrica considerada no Cenário Simulado de Referência, permitindo reduzir significativamente a dependência de combustíveis fósseis utilizados nas operações agrícolas.

5.6. Avaliação econômico financeira

A avaliação econômico financeira constituiu a etapa final de aplicação do modelo de tomada de decisão. A análise foi conduzida considerando os investimentos necessários para aquisição dos tratores elétricos e implantação do sistema fotovoltaico destinado ao suprimento da demanda energética da propriedade.

Para fins de simulação, adotouse investimento estimado de R\$ 600.000,00 por trator elétrico, totalizando R\$ 1.200.000,00 para substituição completa da frota. Esse valor constitui uma premissa do Cenário Simulado de Referência (CSR), definida a partir de levantamento de preços de mercado para tratores elétricos de porte equivalente disponibilizados por fabricantes internacionais, considerando equipamentos compatíveis com as características operacionais da frota analisada.

Adicionalmente, considerouse investimento aproximado de R\$ 280.000,00 para implantação do sistema fotovoltaico de 80 kWp. Esse valor foi estimado com base em custos médios de implantação de sistemas fotovoltaicos comerciais praticados no mercado brasileiro e em informações disponibilizadas por relatórios setoriais da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2024) e da EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) (2025).

QUADRO 6. Investimentos estimados para eletrificação da mecanização agrícola

Item	Valor
Trator elétrico 1	R\$ 600.000,00
Trator elétrico 2	R\$ 600.000,00
Sistema fotovoltaico	R\$ 280.000,00
Investimento total	R\$ 1.480.000,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Considerando o consumo anual estimado de 24.000 litros de óleo diesel e adotandose, para o Cenário Simulado de Referência, o preço médio de R\$ 6,00 por litro, compatível com os valores divulgados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para o mercado brasileiro, estimouse economia anual de R\$ 144.000,00 decorrente da substituição do combustível fóssil pela eletrificação da frota (PETRÓLEO, 2026).

QUADRO 7. Comparação simplificada dos custos energéticos

Parâmetro	Valor
Consumo anual de diesel	24.000 L
Preço médio do diesel	R\$ 6,00 L ⁻¹

Despesa anual estimada	R\$ 144.000,00
Economia anual potencial	R\$ 144.000,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com base nos valores adotados, o Payback Simples estimado foi de aproximadamente 10,3 anos. O resultado evidencia que a eletrificação da mecanização agrícola apresenta potencial para redução dos custos operacionais ao longo do tempo, embora o elevado investimento inicial represente um fator relevante na análise de viabilidade econômica da tecnologia.

5.7 Síntese dos resultados e classificação da decisão

A aplicação do modelo de tomada de decisão permitiu integrar informações relacionadas à mecanização agrícola, demanda energética, geração fotovoltaica e viabilidade econômico-financeira em uma estrutura sistematizada de apoio à decisão.

Os resultados obtidos são apresentados na Quadro 8.

QUADRO 8. Síntese dos resultados da aplicação do modelo

Indicador	Resultado
Área cultivada	100 ha
Quantidade de tratores	2 unidades
Consumo anual de diesel	24.000 L
Despesa anual com diesel	R\$ 144.000,00
Consumo anual estimado de energia elétrica	110.000 kWh
Sistema fotovoltaico adotado	80kWp
Investimento total estimado	R\$ 1.480.000,00
Economia anual potencial	R\$ 144.000,00
Payback Simples estimado	10,3 anos

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com base nos resultados obtidos, o cenário analisado foi classificado como Parcialmente Viável, conforme os critérios estabelecidos pelo modelo de tomada de decisão. Embora a substituição da frota movida a diesel por tratores elétricos alimentados por geração fotovoltaica própria apresente benefícios relacionados à redução dos custos operacionais e à utilização de fonte renovável de energia, o elevado investimento inicial influencia significativamente o período de retorno do capital investido.

Os resultados indicam que a eletrificação da mecanização agrícola representa uma alternativa promissora para o futuro do agronegócio, especialmente diante dos avanços tecnológicos esperados para os próximos anos. Entretanto, nas condições simuladas neste estudo, a adoção da tecnologia demanda análise criteriosa dos aspectos financeiros,

reforçando a importância de ferramentas estruturadas de apoio à tomada de decisão para avaliação de investimentos dessa natureza.

6. RESULTADOS E APOIO À TOMADA DE DECISÃO

A aplicação do modelo de tomada de decisão permitiu avaliar de forma integrada os aspectos técnicos, energéticos e econômico-financeiros relacionados à eletrificação da mecanização agrícola em uma propriedade rural produtora de amendoim. A utilização do Cenário Simulado de Referência possibilitou comparar o sistema convencional, baseado em tratores movidos a óleo diesel, com um sistema alternativo composto por tratores elétricos alimentados por geração fotovoltaica própria.

Os resultados obtidos demonstraram que a eletrificação da frota agrícola apresenta potencial para eliminação do consumo anual estimado de 24.000 litros de óleo diesel, substituindo essa demanda por aproximadamente 110.000 kWh de energia elétrica gerada a partir de fonte renovável. Sob a perspectiva energética, os resultados evidenciam a viabilidade técnica da integração entre mecanização elétrica e geração fotovoltaica, permitindo maior autonomia energética e redução da dependência de combustíveis fósseis utilizados nas operações agrícolas (Jensen; Antille; Tullberg, 2024).

A análise econômico-financeira indicou que o principal fator limitante para adoção da tecnologia corresponde ao elevado investimento inicial necessário para aquisição dos tratores elétricos e implantação da infraestrutura fotovoltaica. No cenário analisado, o investimento total estimado atingiu R\$ 1.480.000,00, valor significativamente superior aos custos normalmente associados à manutenção da frota convencional existente.

Por outro lado, observouse potencial de economia operacional anual da ordem de R\$ 144.000,00, decorrente da substituição do consumo de diesel por energia elétrica gerada na própria propriedade. Embora esse resultado demonstre capacidade de redução dos custos operacionais ao longo do tempo, o período de retorno estimado de aproximadamente 10,3 anos evidencia que a decisão de investimento deve considerar fatores adicionais além da simples economia anual obtida (ASSAF NETO, 2016).

Nesse contexto, o modelo de tomada de decisão proposto contribui para estruturar a análise do investimento, permitindo que produtores rurais e gestores avaliem simultaneamente aspectos relacionados ao consumo energético, à capacidade de geração própria de energia e à viabilidade econômico-financeira da tecnologia. A sistematização dessas informações reduz incertezas associadas à adoção de soluções inovadoras e amplia a capacidade de planejamento de investimentos de longo prazo.

A síntese dos principais resultados obtidos é apresentada na Quadro 9.

QUADRO 9. Síntese dos resultados para apoio à tomada de decisão

Critério Avaliado	Resultado
Área cultivada	100 há
Quantidade de tratores	2 unidades
Consumo anual de diesel	24.000 L
Consumo anual de energia elétrica	110.000 kWh
Sistema fotovoltaico adotado	80 kWp

Investimento total estimado	R\$ 1.480.000,00
Economia anual potencial	R\$ 144.000,00
Payback Simples	10,3 anos
Classificação do modelo	Parcialmente Viável

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com base nos critérios estabelecidos pelo modelo, o cenário analisado foi classificado como Parcialmente Viável. Essa classificação decorre do equilíbrio entre os benefícios energéticos e ambientais proporcionados pela eletrificação da mecanização agrícola e as restrições econômicas associadas ao elevado investimento inicial requerido pela tecnologia.

Os resultados sugerem que a atratividade econômica da eletrificação tende a aumentar à medida que ocorram reduções nos custos de aquisição dos tratores elétricos, avanços tecnológicos relacionados ao armazenamento de energia e ampliação de incentivos voltados à transição energética no setor agropecuário. Dessa forma, embora a tecnologia ainda apresente desafios econômicos para determinadas propriedades rurais, observase potencial para ampliação de sua viabilidade nos próximos anos (Kozak; Bonev, 2026).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo desenvolver um modelo de tomada de decisão para avaliar a viabilidade econômicofinanceira da eletrificação da mecanização agrícola por meio da substituição de tratores movidos a diesel por tratores elétricos alimentados por geração fotovoltaica própria. Para demonstrar sua aplicação, foi elaborado um Cenário Simulado de Referência representativo de uma propriedade rural produtora de amendoim, permitindo a análise integrada dos aspectos energéticos, operacionais e econômicos associados à adoção da tecnologia.

Os resultados obtidos evidenciaram que a eletrificação da mecanização agrícola apresenta potencial para reduzir significativamente a dependência de combustíveis fósseis, substituindo o consumo anual estimado de óleo diesel por energia elétrica proveniente de fonte renovável gerada na própria propriedade. A integração entre tratores elétricos e geração fotovoltaica demonstrou viabilidade técnica para atendimento da demanda energética considerada no cenário analisado, contribuindo para o fortalecimento da autonomia energética e para a adoção de práticas mais sustentáveis no ambiente rural (Jensen; Antille; Tullberg, 2024).

Sob a perspectiva econômico financeira, verificou-se que o elevado investimento inicial necessário para aquisição da frota elétrica e implantação do sistema fotovoltaico constitui o principal desafio para adoção da tecnologia nas condições simuladas. Embora a economia operacional estimada indique potencial de redução dos custos ao longo do tempo, o período de retorno obtido evidencia a necessidade de análises criteriosas antes da realização do investimento (ASSAF NETO, 2016).

Como principal contribuição científica, o estudo apresenta um modelo estruturado de apoio à tomada de decisão capaz de integrar variáveis técnicas, energéticas e econômicofinanceiras em uma única ferramenta de análise destinada à avaliação da eletrificação da mecanização agrícola. O modelo proposto pode auxiliar produtores rurais, gestores e profissionais do setor agropecuário na avaliação preliminar de projetos de eletrificação da mecanização agrícola, contribuindo para reduzir incertezas associadas à adoção de tecnologias emergentes.

Como limitação da pesquisa, destacase a utilização de um cenário simulado, construído a partir de premissas representativas de uma propriedade rural produtora de amendoim. Dessa forma, os resultados apresentados não devem ser interpretados como uma validação universal da viabilidade da tecnologia, mas sim como uma aplicação ilustrativa do modelo desenvolvido.

Por fim, recomendase que estudos futuros realizem a aplicação do modelo em propriedades rurais reais, contemplando diferentes culturas agrícolas, escalas produtivas e condições operacionais. Adicionalmente, futuras pesquisas poderão incorporar análises relacionadas à evolução dos custos dos tratores elétricos, sistemas de armazenamento de energia, incentivos governamentais e impactos ambientais e indicadores de sustentabilidade associados à eletrificação da mecanização agrícola, ampliando o entendimento sobre o potencial dessa tecnologia para o agronegócio brasileiro (Kozak; Bonev, 2026).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. **Energia Solar Cresce no Brasil em 2024 e Ultrapassa 39 GW**. 2024. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-cresce-no-brasil-em-2024-e-ultrapassa-39-gw-afirma-absolar/>. Acesso em: 04/04/2025.

ASSAF NETO, A. **FINANÇAS CORPORATIVAS E VALOR**. 7. ed. SÃO PAULO: ATLAS, 2016.

BARNEY, J. Firm Resources and Sustained Competitive Advantage. **Journal of Management**, SAGE Publications, v. 17, n. 1, p. 99 – 120, Março 1991. ISSN 0149-2063. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/014920639101700108>.

CLIMATE Change 2022 - Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157926>.

CRESESB, C. de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. B. **SunData – Potencial de Energia Solar**. 2017. Disponível em: <https://cresesb:cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 28 jul. 2026.

EMBRAPA, E. B. D. P. A. . **Oportunidades e desafios para o desenvolvimento do biogás proveniente da pecuária no Brasil**. Concórdia, 2023. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1156723/1/Oportunidades-e-desafios.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2025: ano base 2024 – Relatório Síntese**. [S.l.], 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/tópico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf. Acesso em: 1 nov. 2025.

GADE, C. R.; W, R. S.; V, S. Towards sustainable farming: A state of art review on electrification of a farm tractor. **Results in Engineering**, Elsevier BV, v. 25, p. 104403 –, Março 2025. ISSN 2590-1230. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104403>.

GHASEMI, S.; SADEGHKHANI, I. Toward Sustainable Energy-Agriculture Synergies: A Review of Agrivoltaics Systems for Modern Farming Practices. **Solar RRL**, Wiley, v. 9, n. 11, Maio 2025. ISSN 2367-198X. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/solr.202500041>.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**.: 7. ed. São Paulo. Atlas, 2019. Disponível em: <https://livrariapublica.com.br/livros/metodos-e-tecnicas-de-pesquisa-socialantonio-carlos-gil/#pdf>. Acesso em: 19.ago.2025.

GITMAN, L. J. Princípios de Administração Financeira. In: GITMAN, L. J. (Ed.). 12. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

HAEGEL, N. M. et al. Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy. **Science**, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 364, n. 6443, p. 836 – 838, Maio 2019. ISSN 0036-8075. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aaw1845>.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **World Energy Transitions Outlook:**

1,5°C Pathway. 2021. Disponível em: <https://irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>. Acesso em: 09/11/2021.

JENSEN, T. A.; ANTILLE, D. L.; TULLBERG, J. N. Improving On-farm Energy Use Efficiency

by Optimizing Machinery Operations and Management: A Review. **Agricultural Research**, Springer Science and Business Media LLC, v. 14, n. 1, p. 15 – 33, Novembro 2024. ISSN 2249-720X. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40003-024-00824-5>.

KOZAK, O.; BONEV, P. The economic feasibility and farmers' adoption of battery electric tractors: a systematic literature review. **Applied Energy**, Elsevier BV, v. 415, p. 127913 –, Julho 2026. ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2026.127913>.

MIALHE, L. G. **Máquinas Agrícolas**: Ensaios e Certificação. Piracicaba: FEALQ, 1974.

PETRÓLEO, G. N. E. B. A. A. N. D. **Levantamento de Preços e de Margens de Comercialização de Combustíveis**. 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/ptbr/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos-decombustiveis>. Acesso em: 28 jul. 2026.

PORTER, M. E. **Competitive advantage**: creating and sustaining superior performance. New York and London: The Free Press, 1985. ROGERS, E. M. **Diffusion of Innovations**. 5. ed. New York: Free Press, 2003.

SCOLARO, E. et al. Electrification of Agricultural Machinery: A Review. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, p. 164520 – 164541, 2021. ISSN 2169-3536. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3135037>.

THE STATE of Food and Agriculture 2022. FAO, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb9479en>.

VALADÃO, G. F. et al. Potential of Photovoltaic and Diesel Off-Grid Systems for Irrigation in

Brazil Considering Carbon Credits. **Irrigation and Drainage**, Wiley, v. 74, n. 4, p. 1553 – 1574, Abril 2025. ISSN 1531-0353. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ird.3112>.