

INSTITUTO FEDERAL DO SERTÃO PARAIBANO
CAMPUS CAJAZEIRAS

VINICIUS GUEDES ARAUJO

**ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO
HIDRÁULICO EM TRATORES AGRÍCOLAS: ANÁLISE COMPARATIVA
ENTRE BOMBAS DE DESLOCAMENTO FIXO E BOMBAS DE
DESLOCAMENTO VARIÁVEL**

Cajazeiras-PB
2026

VINICIUS GUEDES ARAUJO

**ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO
HIDRÁULICO EM TRATORES AGRÍCOLAS: ANÁLISE COMPARATIVA
ENTRE BOMBAS DE DESLOCAMENTO FIXO E BOMBAS DE
DESLOCAMENTO VARIÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal do Sertão Paraibano-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação, sob Orientação do Prof. Leonardo Pereira de Lucena Silva.

Cajazeiras-PB
2026

IFSPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

A663e Araujo, Vinicius Guedes.

Estudo técnico-econômico de sistemas de bombeamento hidráulico em tratores agrícolas : análise comparativa entre bombas de deslocamento fixo e bombas de deslocamento variável / Vinicius Guedes Araujo. - Cajazeiras, 2026.

32f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão da Paraíba, Cajazeiras, 2026.

Orientador: Prof. Leonardo Pereira de Lucena Silva.

1. Sistemas hidráulicos. 2. Bombeamento hidráulico 3. Tratores agrícolas. 4. Eficiência energética. I. Instituto Federal do Sertão da Paraíba. II. Título.

VINICIUS GUEDES ARAUJO

**ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO
HIDRÁULICO EM TRATORES AGRÍCOLAS: ANÁLISE COMPARATIVA
ENTRE BOMBAS DE DESLOCAMENTO FIXO E BOMBAS DE
DESLOCAMENTO VARIÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso, sob forma de artigo, submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal do Sertão Paraibano, *Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO PEREIRA DE LUCENA SILVA**
Data: 16/08/2026 17:17:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leonardo Pereira de Lucena Silva – IFSertãoPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **PAULO RICARDO DE OLIVEIRA QUEIROZ**
Data: 15/08/2026 16:15:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Paulo Ricardo de Oliveira Queiroz – IFSertãoPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1

Documento assinado digitalmente
 **JOAB SOBREIRA DE ANDRADE**
Data: 16/08/2026 17:37:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Joab Sobreira de Andrade – IFSertãoPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 2

ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Artigo apresentado à coordenação do curso como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação,

ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO HIDRÁULICO EM TRATORES AGRÍCOLAS: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BOMBAS DE DESLOCAMENTO FIXO E BOMBAS DE DESLOCAMENTO VARIÁVEL

VINICIUS GUEDES ARAUJO
guedes.vinicius@academico.ifpb.edu.br
LEONARDO PEREIRA DE LUCENA SILVA
lucena.leonardo@ifpb.edu.br

RESUMO

A crescente pressão por eficiência energética na agricultura e a elevação do preço do óleo diesel tornaram a arquitetura do sistema hidráulico dos tratores um fator relevante de decisão. O presente trabalho avaliou, sob as óticas técnica e econômica, a viabilidade da substituição do sistema hidráulico de deslocamento fixo de centro aberto por um sistema de deslocamento variável com sensoramento de carga, em tratores agrícolas de média potência aplicados à cultura da soja, tomando a linha Valtra BH174 como referência. Adotou-se o método de modelagem paramétrica, no qual um modelo físico de dois regimes quantificou a economia de combustível por operação, distinguindo o regime ativo, em que a bomba de deslocamento fixo estrangula o excedente de vazão sob pressão de carga, do regime de espera. A economia foi ponderada pela participação de cada operação no ciclo de trabalho da soja, considerado nos sistemas de preparo convencional e de plantio direto, e convertida em indicadores de viabilidade por meio de análise incremental de custos. Os resultados indicaram que a migração tecnológica é economicamente viável em ambos os sistemas de manejo, com retorno mais expressivo no plantio direto, cujo valor presente líquido alcançou vinte e três mil duzentos e noventa e um reais e taxa interna de retorno de trinta e quatro por cento. Constatou-se, ainda, que a viabilidade está condicionada à intensidade de uso do trator, justificando-se o investimento para regimes anuais superiores a aproximadamente quinhentas e dezoito horas, e não sendo recomendado para perfis de uso pouco intensivo.

Palavras-Chave: sistemas hidráulicos; eficiência energética; tratores agrícolas; sensoramento de carga; viabilidade econômica.

ABSTRACT

The growing demand for energy efficiency in agriculture and the rise in diesel fuel prices have made the architecture of tractor hydraulic systems a relevant decision factor. This work evaluated, from technical and economic perspectives, the feasibility of replacing the fixed-displacement open-center hydraulic system with a variable-displacement load-sensing system, in medium-power agricultural tractors applied to soybean farming, using the Valtra BH174 line as reference. A modeling method was adopted, in which a two-regime physical model quantified the fuel savings per operation, distinguishing the active regime, in which the fixed-displacement pump throttles the excess flow under load pressure, from the standby regime. The savings were weighted by the share of each operation in the soybean work cycle, considered under conventional tillage and no-till systems, and converted into feasibility indicators through incremental cost analysis. The results indicated that the technological migration is economically feasible in both management systems, with a more significant return under no-till, whose net

present value reached twenty-three thousand two hundred and ninety-one Brazilian reais and an internal rate of return of thirty-four percent. It was also found that feasibility is conditioned on tractor usage intensity, being justified for annual regimes above approximately five hundred and eighteen hours, and not being recommended for low-intensity usage profiles.

Keywords: hydraulic systems; energy efficiency; agricultural tractors; *Load Sensing*; economic feasibility.

1 INTRODUÇÃO

A mecanização ocupa posição central no aumento da produtividade e da eficiência das operações agrícolas, e o trator constitui sua principal fonte de potência móvel (Mialhe, 1974). Ao longo das últimas décadas, esse implemento motorizado deixou de ser um equipamento voltado exclusivamente à tração e passou a operar como plataforma multifuncional, na qual o sistema hidráulico desempenha funções críticas de direção, frenagem, levante do engate de três pontos e acionamento de implementos por meio de válvulas de controle remoto (Casoli *et al.*, 2020). Essa ampliação de funções tornou o desempenho energético do subsistema hidráulico um fator relevante para o custo operacional da máquina.

Historicamente pioneira na fabricação de tratores no país, a Valtra — integrante do grupo AGCO — sustenta expressiva participação no mercado brasileiro de máquinas agrícolas, com relevante penetração no segmento de média potência destinado às cadeias produtivas de grãos e do setor sucroenergético (Cultivar, 2026). Esse posicionamento se insere em um mercado em recuperação, no qual as vendas internas de tratores e colheitadeiras cresceram 27,3% em setembro de 2025 em comparação anual, e a faixa acima de 140 cv desponta como a de maior expansão, com projeção de crescimento de 6,93% ao ano até 2031, ritmo superior ao do mercado total de tratores, estimado em 2,48% ao ano (Mordor Intelligence, 2026). Dentro desse contexto, a linha BH constitui a família mais tradicional da marca no segmento de trabalho pesado, com modelos de 145 a 220 cv (Valtra, 2024), abrangendo justamente a classe de potência sobre a qual recai a análise. A escolha dessa plataforma como referência do estudo apoia-se em três razões. A primeira é sua relevância comercial e a ampla frota em operação no país, o que confere aderência prática à investigação. A segunda é a disponibilidade pública de especificações técnicas detalhadas de suas configurações hidráulicas. A terceira, determinante para o método adotado, é a coexistência, em uma mesma plataforma, das duas arquiteturas hidráulicas comparadas neste trabalho, a configuração Standard, de deslocamento fixo, e a *HiFlow*, de deslocamento variável, o que permite isolar o efeito da tecnologia de bombeamento sem interferência dos demais subsistemas. Adota-se como referência o modelo BH174, de 179 cv, representativo da classe de média potência.

A relevância econômica desse subsistema decorre do peso que os custos de propriedade e operação de máquinas agrícolas representam no custo total de produção, estando este estimado entre 35% a 50% quando se exclui a terra (Makkar *et al.*, 2020). Nesse conjunto, o combustível figura como o principal componente do custo variável, o que confere à eficiência energética das máquinas caráter estratégico, sobretudo em um cenário de preços elevados do óleo diesel S-10, situados entre R\$ 7,20 e R\$ 7,50 por litro em medições nacionais de 2026 (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2026).

No que concerne à arquitetura hidráulica, tratores de média potência comumente empregam sistemas de centro aberto acionados por bombas de engrenagens de deslocamento fixo. Embora essa concepção se destaque pela simplicidade construtiva e pelo baixo custo, ela impõe que a bomba forneça vazão contínua e proporcional à rotação do motor, independentemente da demanda dos atuadores, condição essa que resulta em dissipação de energia sob a forma de calor nos regimes de baixa solicitação (Rituraj; Vacca; Morselli, 2020). Em contraposição, as bombas de pistões axiais de deslocamento variável, integradas a circuitos

de centro fechado com sensoriamento de carga (*Load Sensing*), ajustam a vazão à demanda instantânea, reduzindo tais perdas (Fialho, 2011). A transição dos sistemas hidráulicos de detecção de carga para a categoria de tratores de média potência reflete uma tendência global de modernização da frota e busca por eficiência energética (Renius, 2019), o que motiva estudos comparativos como o aqui proposto.

1.1 Problema de Pesquisa

A opção pela configuração equipada com bomba de deslocamento variável e sensoriamento de carga representa, no momento da aquisição do trator alvo do estudo (BH174), um investimento adicional de R\$ 25.000 (informação verbal), valor confirmado junto à rede de concessionárias. O problema não reside na viabilidade técnica da substituição da bomba de deslocamento fixo pela de deslocamento variável, mas na decisão que o comprador enfrenta no ato da compra: sob quais condições esse desembolso inicial se justifica economicamente ao longo da vida útil do equipamento? A resposta a essa questão é dificultada pela ausência de dados públicos sobre o ciclo de trabalho hidráulico específico dos tratores de média potência em operação no Brasil, o que inviabiliza a definição de um valor universal de economia e torna necessária a avaliação das condições operacionais sob as quais a tecnologia passa a compensar o sobrepreço praticado.

1.2 Justificativa

A decisão de incorporar uma bomba de deslocamento variável ao trator confronta o fabricante e o produtor com um dilema econômico. De um lado, a configuração de maior eficiência exige um investimento adicional expressivo. De outro, o benefício dessa tecnologia depende de fatores operacionais e hidráulicos, particularmente do regime de utilização do trator e das características do circuito hidráulico. Essa quantificação é dificultada pela ausência de dados públicos sobre o ciclo de trabalho hidráulico específico dos tratores de faixa de potência semelhante ao trator alvo em operação no Brasil, o que inviabiliza a definição de um valor base de economia e torna necessária a avaliação das condições sob as quais a tecnologia passa a compensar o sobrepreço praticado.

O presente trabalho justifica-se por endereçar essa lacuna sob três perspectivas. Na dimensão técnica, a comparação entre as arquiteturas contribui para o entendimento dos mecanismos de perda energética em circuitos hidráulicos de tratores, tema de relevância crescente diante da busca por eficiência no setor (Rituraj; Vacca; Morselli, 2020). Na dimensão econômica, a análise fornece subsídios objetivos para a decisão de configuração de produto, de interesse direto para fabricantes e produtores rurais (Blank; Tarquin, 2012). Na dimensão metodológica, o estudo propõe uma abordagem que contorna a ausência de dados de ciclo por meio da modelagem parametrizada (Miguel, 2007), avaliando a viabilidade não em um cenário isolado, mas ao longo do ciclo de operações da cultura da soja, considerada nos dois sistemas de manejo predominantes, o preparo convencional e o plantio direto (Embrapa Soja, 2023)

1.3 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são apresentados na forma de objetivo geral e objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar, sob as óticas técnica e econômica, a viabilidade da opção de um sistema hidráulico de deslocamento variável com sensoriamento de carga, em detrimento de um sistema convencional de deslocamento fixo de centro aberto.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para o alcance do objetivo geral, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- caracterizar as duas arquiteturas hidráulicas quanto ao princípio de funcionamento, ao rendimento e ao comportamento energético;
- modelar a diferença de consumo de combustível entre as configurações, em função da demanda hidráulica das operações da cultura da soja, considerando os regimes ativo e de espera;
- compor a economia de combustível segundo os sistemas de manejo convencional e plantio direto, ponderando as operações pela sua participação no ciclo anual;
- determinar os indicadores de viabilidade econômica da migração tecnológica, a saber, *payback*, valor presente líquido, taxa interna de retorno e retorno sobre o capital investido, por meio de análise incremental de custos (Blank; Tarquin, 2012);
- avaliar a sensibilidade dos resultados às principais variáveis de incerteza, identificando as condições sob as quais a substituição se justifica.

1.4 Estrutura do Trabalho

Além desta introdução, o trabalho organiza-se em quatro capítulos. O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico, abrangendo os fundamentos de hidráulica de potência, as arquiteturas de circuito, as bombas comparadas, os sistemas de manejo da cultura da soja e o instrumental de análise econômica. O Capítulo 3 descreve a metodologia, detalhando a classificação da pesquisa, o modelo físico de dois regimes, os parâmetros de entrada e a composição da economia por sistema de manejo. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados, incluindo a economia por operação, os indicadores de viabilidade e a análise de sensibilidade. Por fim, o Capítulo 5 reúne as considerações finais, com a síntese dos achados, as limitações e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo estabelece o arcabouço conceitual necessário à comparação técnico-econômica entre as duas arquiteturas hidráulicas objeto do estudo. A exposição parte do contexto energético da mecanização agrícola, formaliza os fundamentos de hidráulica de potência que sustentam o modelo físico e, nos tópicos subsequentes, avança para as arquiteturas de circuito, as bombas comparadas e o instrumental de análise econômica efetivamente empregado.

2.1 Panorama da Mecanização Agrícola Brasileira e o Papel do Sistema Hidráulico

A mecanização agrícola ocupa papel central no aumento de produtividade e eficiência das operações rurais (Mocera *et al.*, 2023). O trator agrícola deixou de ser exclusivamente uma fonte de tração para tornar-se uma plataforma multifuncional, na qual o sistema hidráulico desempenha funções críticas de direção, frenagem, acionamento de implementos, levante e válvulas de controle remoto (Casoli *et al.*, 2020).

Segundo Makkar *et al.* (2020, tradução nossa), os custos de propriedade e operação de maquinários agrícolas representam de 35% a 50% dos custos da produção agrícola quando se exclui a terra. Esse dado justifica a atenção crescente dedicada à eficiência energética das máquinas e, em particular, à eficiência dos subsistemas responsáveis pelo maior consumo específico de combustível.

Sob a ótica tecnológica, o setor caminha para a Agricultura 4.0, marcada pela integração de sistemas embarcados, telemetria, conectividade, sensoramento e agricultura de precisão, com adoção crescente de soluções digitais para monitoramento, automação e apoio à decisão (Abbasi; Martinez; Ahmad, 2022). Nesse contexto, arquiteturas hidráulicas mais eficientes

como o sistema de centro fechado com sensoriamento de carga, conhecido como *Load Sensing*, deixam de ser diferencial exclusivo dos tratores de alta potência e passam a compor o portfólio de fabricantes também na faixa de média potência.

2.2 Fundamentos de Hidráulica de Potência Aplicada a Máquinas Móveis

2.2.1 Grandezas Fundamentais: Vazão, Pressão e Potência Hidráulica

A hidráulica de potência se baseia na transmissão de energia por meio de um fluido em regime hidrostático, no qual a energia mecânica de entrada é convertida pela bomba em energia de pressão e vazão, transportada por tubulações até os atuadores, onde é reconvertida em trabalho mecânico útil (Cerović; Petrović, 2018). Do ponto de vista formal, três grandezas sintetizam essa transmissão:

- Vazão volumétrica (Q), expressa usualmente em L/min, associada à velocidade dos atuadores, pressão de trabalho (p), expressa em bar ou MPa, associada à força ou torque nos atuadores e potência hidráulica (P_h) dada, em regime permanente, pela Equação 1.

$$P_h = \frac{p \cdot Q}{600} \quad (1)$$

2.2.2 Eficiência Volumétrica, Mecânica e Global

Como toda máquina real converte energia de forma imperfeita, o desempenho de bombas hidráulicas é usualmente caracterizado por três rendimentos, conforme formalizado por Ivantysyn e Ivantysynova (2001):

- a) rendimento volumétrico (η_v): razão entre a vazão efetivamente entregue e a vazão teórica (produto da cilindrada pela rotação). Reflete perdas por vazamentos internos entre câmaras de alta e baixa pressão, sendo, portanto, sensível à pressão de trabalho, à viscosidade do fluido e à folga interna dos elementos rotativos;
- b) rendimento mecânico-hidráulico (η_{mh}): razão entre o torque teórico e o torque real de acionamento, associado a perdas por atrito interno e por perdas de carga em canais e mancais;
- c) rendimento global (η_g): representa o quociente entre a potência hidráulica útil na saída e a potência mecânica de entrada no meio da bomba dada pela Equação 2.

$$\eta_g = \eta_v \cdot \eta_{mh} \quad (2)$$

Para os fins deste trabalho, a grandeza determinante é a potência mecânica absorvida, pois é ela que demanda combustível do motor. Por decorrência da definição de rendimento, a potência de entrada relaciona-se à potência útil dado pela Equação 3.

$$P_{entrada} = \frac{P_h}{\eta_g} \quad (3)$$

O rendimento se faz presente no denominador porque a potência absorvida é, necessariamente, superior à potência útil entregue: a diferença corresponde às perdas internas da bomba, dissipadas sob a forma de calor, em conformidade com o princípio de conservação de energia. Essa formulação é central ao modelo desenvolvido no Capítulo 3, uma vez que a diferença de rendimento global entre as duas tecnologias de bomba constitui, conforme se demonstrará, a principal origem da economia de combustível quando o circuito é adequadamente compensado.

Cabe registrar que os rendimentos não são constantes, mas variam com a pressão, a rotação e a temperatura do fluido. Rituraj, Vacca e Morselli (2020), em modelo termo-hidráulico validado experimentalmente para máquinas de engrenagens externas, demonstraram

que o rendimento volumétrico decresce de modo apreciável com a elevação da temperatura do fluido, em razão do aumento dos vazamentos internos. Tal constatação confere caráter conservador às análises que adotam rendimentos nominais constantes, uma vez que, em condições reais de operação sob aquecimento, a diferença de desempenho entre uma bomba de menor e uma de maior rendimento tende a ampliar-se.

2.2.3 Perdas por Estrangulamento e Geração de Calor

Em circuitos de centro aberto acionados por bombas de deslocamento fixo, a vazão gerada é permanentemente proporcional à rotação do motor, independentemente da demanda dos atuadores. O comportamento das perdas, contudo, difere conforme o estado de operação do circuito.

Em condição neutra, ou regime de espera, quando nenhum atuador é acionado, o fluido retorna ao reservatório atravessando a passagem central das válvulas ou a válvula divisora de fluxo, sob pressão reduzida, da ordem de 10 a 20 bar. Nesse estado, a perda energética é modesta, limitada à potência necessária para circular o fluido contra a resistência do circuito de retorno.

Já em regime ativo, quando um implemento é acionado, o carretel da válvula restringe a passagem de retorno e a pressão de toda a vazão da bomba eleva-se ao nível exigido pela carga. Como a bomba de deslocamento fixo entrega vazão constante por uma única via, a parcela não aproveitada pelo atuador é estrangulada sob a pressão de trabalho, dissipando-se integralmente sob a forma de calor. É esse mecanismo, denominado perda por estrangulamento (Rituraj; Vacca; Morselli, 2020), que constitui a principal fonte de ineficiência do sistema de deslocamento fixo nas operações de acionamento hidráulico contínuo, e sobre o qual atua a tecnologia de deslocamento variável, objeto da comparação desenvolvida neste trabalho.

2.3 Arquiteturas de Circuitos Hidráulicos em Máquinas Móveis

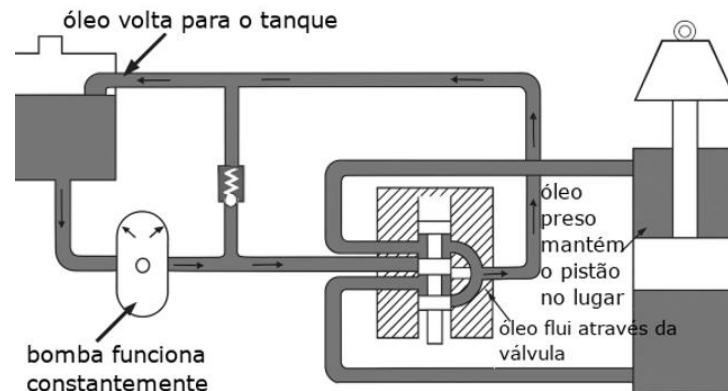
Compreendida a natureza das perdas em regimes de baixa demanda (Seção 2.2), torna-se necessário examinar como as diferentes arquiteturas de circuito organizam o suprimento de fluido pressurizado ao longo do ciclo de trabalho. A literatura da engenharia hidráulica agrupa essas arquiteturas em duas grandes categorias: centro aberto e centro fechado com sensoramento de carga. Cada uma com implicações distintas sobre a eficiência energética global e sobre a controlabilidade dos atuadores (Ivantysyn; Ivantysynova, 2001).

2.3.1 Circuito de Centro Aberto

O circuito de centro aberto caracteriza-se por manter, em condição neutra, uma passagem interna livre entre a linha de pressão da bomba e a linha de retorno ao reservatório, atravessando os corretores de fluxo das válvulas direcionais (Vanlics, 2026) como demonstrado na Figura 1. Nessa arquitetura, a bomba, que é normalmente de deslocamento fixo do tipo de engrenagens externas, exibida na Figura 2, ela entrega vazão contínua e proporcional à rotação do eixo motor, independentemente da demanda dos atuadores. Quando o operador aciona a válvula direcional, o fluxo é redirecionado para o atuador; em repouso, todo o fluido retorna ao tanque atravessando as válvulas com pequena queda de pressão (Target Hydraulics, 2024).

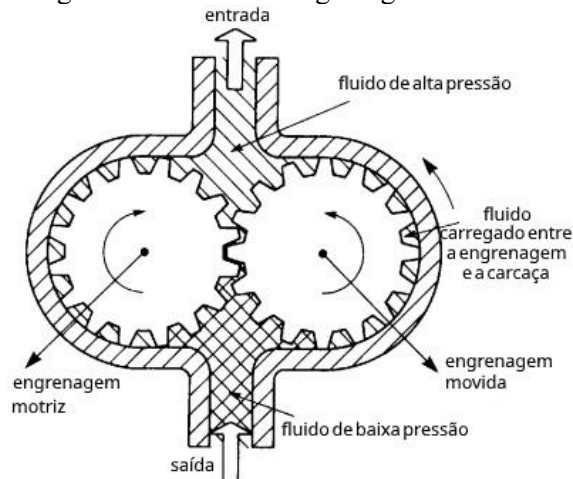
Do ponto de vista energético, esse arranjo apresenta simplicidade construtiva e baixo custo inicial, mas incorre em perdas médias de 15 % a 25 % da potência da bomba na forma de fluido que é desviado dos atuadores ociosos, conforme sistematizado por análises comparativas recentes (Infiabrake, 2026).

Figura 1 – Sistema de centro aberto.



Fonte: Adaptado de Vanlics (2026).

Figura 2 – Bomba de engrenagens externas.



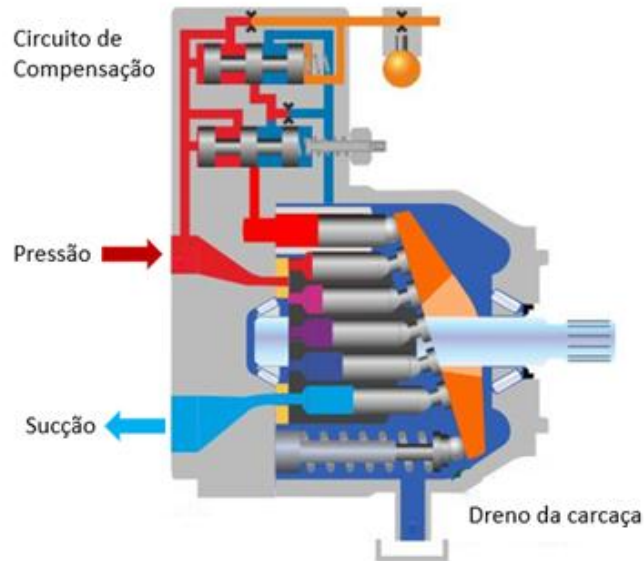
Fonte: Adaptado de Parr (2011).

2.3.2 Circuito de Centro Fechado com Sensoriamento de Carga (Load Sensing)

No circuito de centro fechado, as válvulas direcionais bloqueiam a passagem do fluido em condição neutra, de modo que a linha de pressão permanece isolada do reservatório mesmo em repouso dos atuadores (Vanlics, 2026). Para que essa arquitetura opere em regime energeticamente favorável, a bomba deve ser capaz de modular sua vazão de saída de acordo com a demanda instantânea, essa especificação é desempenhada em máquinas móveis modernas pela bomba de pistões axiais de deslocamento variável como pode-se visualizar na Figura 3.

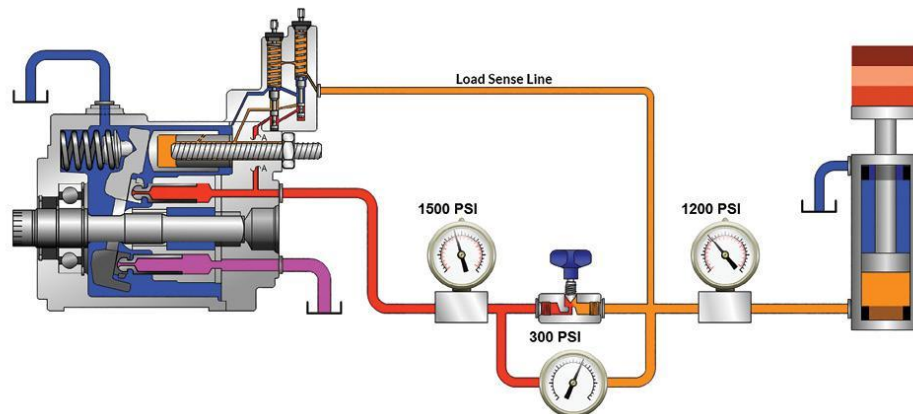
O estado da arte dessa arquitetura, universalmente adotado em tratores agrícolas de média e alta potência, é o sistema de sensoriamento de carga (*Load Sensing*). A Figura 4 demonstra que nesse sistema, uma linha piloto comunica a pressão máxima demandada pelos atuadores diretamente ao compensador da bomba, que ajusta simultaneamente vazão e pressão para atender à demanda com uma margem mínima, tipicamente entre 15 e 25 bar acima da pressão do atuador mais exigente (Danfoss, 2020).

Figura 3 – Bomba de pistão axial



Fonte: Hidráulica & Pneumática (2026).

Figura 4 – Circuito hidráulico com *Load Sensing*



Fonte: Lunchbox Sessions (2026)

2.3.3 O Fator de Atividade Hidráulica e o Regime Anual de Operação

As arquiteturas de circuito descritas nas seções anteriores diferem quanto à intensidade da demanda hidráulica em um dado instante de operação, mas a conversão dessa diferença instantânea em uma economia anual de combustível exige a introdução de duas grandezas temporais complementares: o fator de atividade hidráulica e o regime anual de operação.

Para os fins deste trabalho na Equação 4, define-se o fator de atividade hidráulica, f_a , como a fração do tempo de operação em que o circuito hidráulico opera efetivamente sob a pressão de trabalho do implemento, em contraposição ao tempo em que permanece em regime de espera, com o fluido circulando sob a baixa pressão de desvio discutida na Seção 2.2.3.

$$f_a = \frac{t_{sob\ carga}}{t_{total}}, 0 \leq f_a \leq 1 \quad (4)$$

No Quadro 1 são definidos os valores adotados nesse estudo para diferentes circunstâncias de operação no que se refere à intensidade de operação hidráulica do implemento agrícola. Cabe dizer que os valores não representam medições diretas de tempo sob carga

hidráulica, mas estimativas de engenharia fundamentadas no princípio operacional de cada implemento e em dados de eficiência de campo reportados na literatura.

Quadro 1 – Fator de atividade

Grupo operacional	f_a adotado	Justificativa
Acionamento contínuo	80%	Demanda hidráulica durante a maior parte da operação
Acionamento intermitente	10%	Acionamentos esporádicos ao longo da operação
Levante hidráulico	2%	Acionamento restrito às manobras de cabeceira

Fonte: Autoria própria (2026).

A estimativa de f_a para cada operação apoia-se em dados de eficiência de campo e de tempos e movimentos reportados na literatura de mecanização agrícola. O rendimento operacional, definido por Lal (1983) como a razão entre o tempo efetivo de trabalho e o tempo total, que inclui manobras e interrupções, fornece o arcabouço para a decomposição temporal adotada. Valores específicos de eficiência de campo por operação são reportados por Silva, Alves e Queiroz (2023) para a gradagem, por Farias *et al.* (2018) para a operação com grade niveladora e por Lopes *et al.* (2020) para a subsolagem, os quais fundamentam as faixas de f_a empregadas neste trabalho.

Por fim, o regime anual de operação, representado pelo número de horas trabalhadas por ano, H , converte a economia horária em economia anual, base sobre a qual se calculam os indicadores de viabilidade. Esse parâmetro é dado de gestão de máquinas, e não grandeza hidráulica, sendo fundamentado em levantamentos de utilização de tratores agrícolas (ASABE, 2011). A economia anual de combustível resulta, assim, da composição das três grandezas: a diferença de potência instantânea, a fração de tempo sob carga f_a e o total de horas H .

2.4 Sistemas de Manejo do Solo e o Ciclo de Operações da Cultura da Soja

A caracterização do ciclo de trabalho de um trator agrícola depende diretamente do sistema de manejo do solo em que a máquina é empregada, pois é esse sistema que define as operações realizadas ao longo da safra e, consequentemente, a forma como o tempo de uso do trator é distribuído. No caso da soja, cultura de grande relevância para a mecanização agrícola brasileira, destacam-se dois sistemas principais: o preparo convencional e o sistema de plantio direto.

O preparo convencional caracteriza-se pela mobilização total do solo, mediante o emprego de arados, escarificadores e grades aradoras no preparo primário, seguidos de grades niveladoras no preparo secundário (Embrapa Soja, 2023). Nesse sistema, o tempo do trator é dominado por operações de tração intensa e baixa demanda hidráulica.

O sistema de plantio direto (SPD), por sua vez, fundamenta-se em três pilares: a mínima mobilização do solo, a cobertura permanente por resíduos ou culturas e a diversificação de espécies (Embrapa Soja, 2023). Ao eliminar o revolvimento, o SPD desloca o tempo de máquina para operações de dessecação e pulverização, semeadura direta, manejo mecânico da palhada com rolo-faca, roçadora ou triturador, além da distribuição superficial de insumos.

A quantificação do tempo despendido em cada operação apoia-se nos conceitos de capacidade de campo e eficiência de campo, formalizados por Pacheco (2000), que sistematiza as faixas de velocidade e de eficiência para as principais operações mecanizadas. Estudos de tempos e movimentos específicos, como o de Santos Filho *et al.* (2023) para a semeadura de soja, fornecem parâmetros para a decomposição do ciclo. A distinção entre os dois sistemas de manejo constitui, no presente trabalho, a base para a análise da viabilidade do sistema *Load Sensing* por perfil de utilização.

2.5 O Trator Alvo do Estudo

A definição de um trator de referência é necessária para ancorar a análise em parâmetros técnicos reais e verificáveis, conferindo concretude ao modelo desenvolvido. Adotou-se, para este fim, o trator Valtra BH174 (retratado na Figura 5), da Linha BH Geração 4.

Figura 5 – Trator Valtra BH174



Fonte: Valtra (2024).

Comparam-se duas configurações. A configuração de referência, designada *Standard*, emprega bomba de engrenagens AZPN de deslocamento fixo da *Bosch Rexroth*, representada na Figura 6, operando em circuito de centro aberto com válvula divisora de fluxo compensada, conforme discutido na Seção 2.3. A configuração alternativa, designada *HiFlow*, emprega bomba A10VNO de pistões axiais de deslocamento variável da *Bosch Rexroth*, operando em circuito de centro fechado com sensoramento de carga. As duas configurações (destrinchadas no Quadro 2) compartilham a totalidade dos demais subsistemas do trator, o que constitui o fundamento da análise incremental adotada na avaliação econômica.

Quadro 2 – Configurações hidráulicas da linha Valtra BH

Características	<i>Standard</i>	<i>HiFlow</i>
Modelo da bomba	AZPN	A10VNO
Tipo de bomba	Deslocamento fixo	Deslocamento variável
Mecanismo de deslocamento	Engrenagens Externas	Pistões Axiais
Arquitetura de circuito	Centro aberto	Centro fechado
Pressão máxima	177 bar	196 bar
Vazão da bomba	67 L/min	170 L/min
Rendimento mecânico (η_{mh})	0.9	0.98
Rendimento volumétrico (η_v)	0.85	0.95

Fonte: Adaptado de Valtra (2024) e Bosch Rexroth (2024).

Figura 6 – Bombas hidráulicas comparadas: AZPN e A10VNO



Fonte: Bosch Rexroth (2024).

A distinção construtiva evidenciada na Figura 6 sintetiza o cerne da comparação técnica desenvolvida neste trabalho. A bomba de engrenagens externas, à esquerda, caracteriza-se pela simplicidade construtiva e pelo baixo custo, fornecendo vazão proporcional à rotação do motor de forma constante. A bomba de pistões axiais, à direita, incorpora mecanismo de prato inclinado que permite modular o deslocamento e, por conseguinte, ajustar a vazão à demanda instantânea dos atuadores, característica que fundamenta o ganho de eficiência investigado nos capítulos seguintes.

Os rendimentos volumétrico e mecânico-hidráulico de cada bomba foram adotados a partir de valores típicos reportados na literatura de hidrostática para as respectivas tecnologias (Ivantysyn; Ivantysynova, 2001). Para a bomba de engrenagens, adotaram-se 0,85 e 0,90, resultando em rendimento global de 0,765; para a bomba de pistões axiais, adotaram-se 0,95 e 0,98, resultando em 0,931. Tais valores representam o desempenho em ponto de operação nominal e são coerentes com as faixas características de cada tipo de bomba.

2.6 Fundamentos de Análise Técnico-Econômica

Definido o perfil operacional do trator alvo e o perfil de manejo, torna-se necessário formalizar o instrumental econômico-financeiro utilizado para converter as diferenças de eficiência hidráulica em uma decisão de investimento comparável entre as configurações *Standard* e *HiFlow*.

2.6.1 Análise Incremental de Custos

A análise incremental, ou análise de custos diferenciais, fundamenta-se no princípio de que, na comparação entre duas alternativas, apenas os fluxos de caixa que efetivamente diferem entre elas são relevantes para a decisão, cancelando-se as parcelas comuns, uma vez que estas ocorreriam independentemente da escolha (Blank; Tarquin, 2012). A decisão recai, portanto, exclusivamente sobre o diferencial de investimento e sobre os diferenciais operacionais dele decorrentes.

A pertinência do método ao problema em exame decorre de sua própria estrutura. As configurações comparadas compartilham a totalidade do trator, incluindo motor, transmissão, chassi, rodado e sistema de tração, distinguindo-se unicamente no subsistema de bombeamento hidráulico. Nesse contexto, a utilização do TCO completo de cada configuração implicaria carregar, em ambos os lados da comparação, dezenas de rubricas idênticas que se anulam na comparação final. A análise incremental elimina essa redundância ao isolar três componentes: o investimento incremental I_0 , correspondente ao sobrepreço da configuração de deslocamento variável; a economia operacional anual, constituída pela redução do consumo de combustível; e o ônus anual associado à imobilização do capital adicional.

O ônus do capital incremental é quantificado pelo Fator de Recuperação de Capital, que converte um valor presente em uma série anual uniforme equivalente ao longo do horizonte de análise, incorporando o valor temporal do dinheiro (Blank; Tarquin, 2012).

O custo anual de recuperação do capital incremental é dado pela Equação 5.

$$CR = I_0 \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5)$$

A variável i é a Taxa Mínima de Atratividade e n o horizonte de análise, em anos. Adota-se como Taxa Mínima de Atratividade a taxa efetiva da linha Moderfrota do Plano Safra 2025/2026, por constituir a referência de custo de capital diretamente aplicável ao financiamento de máquinas agrícolas no Brasil (Brasil, 2025). Essa escolha confere aderência ao contexto decisório real do produtor rural, que tipicamente recorre ao crédito rural subsidiado para aquisições dessa natureza.

2.6.2 Métricas de Análise de Investimentos: Payback, VPL, TIR e ROIC

Definidos os fluxos de caixa diferenciais, a decisão de investimento apoia-se em um conjunto de indicadores complementares, cada qual iluminando uma dimensão distinta da viabilidade — o tempo de recuperação, o valor gerado, a rentabilidade intrínseca e a condição-limite de justificação. A adoção de múltiplos indicadores, em vez de um critério único, decorre do reconhecimento de que nenhuma métrica isolada captura simultaneamente liquidez, criação de valor e risco (Blank; Tarquin, 2012).

O *Payback* simples mede o tempo necessário para que a economia acumulada iguale o investimento incremental, respondendo à pergunta sobre em quanto tempo o capital adicional retorna ao investidor. Obtém-se pela razão entre o investimento incremental e a economia anual de caixa, conforme a Equação 6.

$$T_{PB} = \frac{I_0}{E} \quad (6)$$

I_0 é o investimento incremental e E a economia anual de caixa. Sua principal virtude é a leitura imediata do risco de liquidez: quanto menor o *Payback*, mais rapidamente o produtor recupera o desembolso e menor a exposição a incertezas futuras. Sua limitação reside em desconsiderar o valor temporal do dinheiro, tratando fluxos de anos distintos como equivalentes (Yard, 2000).

Essa deficiência é corrigida pelo Valor Presente Líquido (VPL), que consolida o fluxo de caixa incremental trazido a valor presente pela Taxa Mínima de Atratividade, subtraído do investimento inicial, conforme a Equação 7.

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{E}{(1+i)^t} \quad (7)$$

i é a Taxa Mínima de Atratividade e n o horizonte de análise, em anos. Um VPL positivo indica que a economia acumulada, descontada ao custo de oportunidade do capital, supera o investimento incremental, sinalizando a criação de valor econômico e, portanto, a viabilidade da migração tecnológica. Por incorporar simultaneamente o volume, o momento e o custo de oportunidade dos fluxos, o VPL é considerado o critério mais robusto da análise de investimentos (Blank; Tarquin, 2012).

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto que anula o Valor Presente Líquido, isto é, o valor de i que satisfaz a Equação 8.

$$-I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{E}{(1+i)^t} = 0 \quad (8)$$

Interpretada como a rentabilidade intrínseca do investimento, a TIR é confrontada com a Taxa Mínima de Atratividade: um valor superior à TMA sinaliza que o projeto remunera o capital acima de seu custo de oportunidade, sendo, portanto, economicamente atrativo (Blank; Tarquin, 2012).

O Retorno sobre o Capital Investido (ROIC), por sua vez, expressa a razão entre a economia operacional anual proporcionada pela substituição tecnológica e o capital adicional efetivamente empregado, para os fins deste estudo, adota-se uma versão simplificada do ROIC conforme a Equação 9.

$$ROIC = \frac{E}{I_0} \quad (9)$$

O indicador fornece uma taxa de retorno anual comparável diretamente à Taxa Mínima de Atratividade e a aplicações alternativas do capital. Um ROIC superior à TMA reforça a conclusão de criação de valor econômico; um ROIC inferior indica que o produtor obterá melhor resultado aplicando o capital na alternativa de referência (Cortés, 2025). A leitura conjunta dos indicadores é particularmente informativa: enquanto o *Payback* qualifica a velocidade do retorno e o ROIC a sua magnitude anual, o VPL e a TIR sintetizam, respectivamente, o valor criado e a rentabilidade intrínseca ao longo de todo o horizonte.

Cumpra observar que os quatro indicadores anteriores pressupõem um valor definido de economia anual, o qual, por sua vez, depende da intensidade de uso do trator e do regime de solicitação hidráulica ao longo do ciclo. Diante disso, complementa-se a análise com a determinação do ponto de equilíbrio (*break-even*), definido como a condição-limite a partir da qual o investimento se justifica. Formalmente, para um prazo-alvo T^* , o ponto de equilíbrio em horas anuais de operação hidráulica ativa é obtido igualando-se a economia acumulada ao investimento incremental conforme a Equação 10.

$$H_{eq} = \frac{I_0}{e_h \cdot f_a \cdot T^*} \quad (10)$$

Em que e_h é a economia por hora de operação hidráulica ativa e f_a o fator de atividade hidráulica. O ponto de equilíbrio delimita a fronteira de viabilidade sobre o espectro operacional, constituindo critério de decisão diretamente aplicável: a tecnologia justifica-se para perfis de utilização acima do limiar e não se justifica abaixo dele.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve o percurso metodológico adotado para avaliar a viabilidade técnico-econômica da substituição do sistema hidráulico de deslocamento fixo por um sistema de deslocamento variável com sensoriamento de carga, em tratores agrícolas de média potência. A exposição parte da classificação da pesquisa, avança pela definição do objeto e das configurações comparadas e, nos tópicos subsequentes, formaliza o modelo físico, os parâmetros de entrada e o instrumental de análise econômica.

3.1 Classificação da Pesquisa

Quanto à abordagem, a presente pesquisa classifica-se como quantitativa, uma vez que se apoia na modelagem numérica do desempenho energético e da viabilidade econômica das arquiteturas hidráulicas comparadas. Quanto à natureza, caracteriza-se como aplicada, ao

buscar subsídios para uma decisão concreta de configuração de produto no âmbito da indústria de máquinas agrícolas. Quanto aos objetivos, é exploratória e descritiva, pois aprofunda o entendimento de uma questão pouco sistematizada e descreve, de forma comparativa, as características técnicas e econômicas das alternativas.

Quanto aos procedimentos, cumpre estabelecer uma distinção metodológica precisa. O trabalho não se constitui em estudo de caso, uma vez que não investiga uma situação real particular com dados operacionais medidos em campo. Configura-se como modelagem paramétrica, procedimento no qual o comportamento do sistema é representado por um modelo físico-econômico, alimentado por dados de catálogo e de literatura (Miguel, 2007). Diante da inexistência de um levantamento científico do ciclo de trabalho hidráulico específico do trator-alvo, as grandezas operacionais desconhecidas não são arbitradas em um único valor, mas tratadas de forma parametrizada e submetidas à análise de sensibilidade, de modo que a conclusão não repouse sobre um cenário isolado, mas sobre o espectro plausível de operação.

O trator Valtra BH174 é adotado como referência para a análise de tratores agrícolas de média potência, sem caracterizar um estudo de caso específico, uma vez que o objetivo é avaliar uma configuração tecnológica aplicável a essa faixa de produto. Isso afasta a dependência de dados operacionais de uma máquina específica. A análise é conduzida no contexto da cultura da soja, principal cultura de grãos do país, considerando-se os dois sistemas de manejo do solo predominantes — preparo convencional e plantio direto.

3.2 Caracterização dos Sistemas de Manejo e do Ciclo de Operações

A avaliação da economia proporcionada pelo sistema *Load Sensing* não pode ser feita de forma abstrata, pois o benefício energético depende do conjunto de operações que o trator executa ao longo da safra e do tempo despendido em cada uma. Como esse conjunto difere conforme o sistema de manejo do solo, a análise foi conduzida separadamente para os dois sistemas predominantes na sojicultura brasileira: o preparo convencional e o plantio direto.

No preparo convencional, o ciclo compreende operações de mobilização total do solo, subsolagem, aração, gradagem pesada e gradagem niveladora, seguidas da correção e adubação, da semeadura e das pulverizações de manejo. Trata-se de um ciclo dominado, em tempo de trator, por operações de tração intensa e baixa demanda hidráulica. No plantio direto, eliminam-se as operações de revolvimento; o ciclo concentra-se na dessecação e nas pulverizações, na semeadura direta, no manejo mecânico da palhada e na distribuição superficial de insumos, redistribuindo o tempo de máquina para operações de acionamento hidráulico e por tomada de potência, estas diferenças são demonstradas pelo Quadro 3.

Quadro 3 – Pesos operacionais por sistema de manejo (participação no tempo anual de trator).

Operação	Convencional	Plantio direto
Grade Pesada	31,5%	—
Aração	22,5%	—
Grade niveladora	10,1%	—
Semeadura pneumática	13,5%	30,0%
Pulverização	16,9%	37,5%
Calagem	5,6%	12,5%
Manejo mecânico de palha	—	20,0%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Cada operação do ciclo foi caracterizada por três atributos: a vazão hidráulica média demandada, a pressão de trabalho e o fator de atividade hidráulica, definida na seção 2.3.3 como a fração do tempo de operação em que o circuito opera efetivamente sob a pressão de trabalho. A participação de cada operação no tempo total anual do trator foi estimada em horas por

hectare equivalentes, a partir da capacidade e da eficiência de campo reportadas na literatura de mecanização (Pacheco, 2000; Santos Filho *et al.*, 2023) e da composição de operações de cada sistema (Embrapa Soja, 2023).

3.3 Modelagem Física da Economia de Combustível

O modelo físico quantifica a diferença de potência mecânica absorvida por cada configuração, da qual deriva a economia de combustível. Sua formulação apoia-se na distinção operacional entre as arquiteturas, estabelecida no Capítulo 2, e considera dois regimes de funcionamento: o regime ativo, no qual o implemento demanda vazão sob a pressão de trabalho, e o regime de espera, no qual a bomba permanece acionada sem demanda útil dos atuadores.

No regime ativo, a diferença fundamental entre as arquiteturas manifesta-se plenamente. Na configuração *Standard*, ao acionar o implemento, o carretel da válvula de centro aberto restringe a passagem de retorno ao reservatório, elevando a pressão de toda a vazão da bomba ao nível exigido pela carga. Como a bomba de deslocamento fixo possui vazão constante e uma única via de saída, a totalidade da vazão Q_b é pressurizada à pressão de trabalho p , ainda que apenas a parcela Q_{dem} realize trabalho útil no atuador. O excedente $(Q_b - Q_{dem})$ é estrangulado na válvula sob essa mesma pressão de carga, dissipando-se quase que integralmente sob a forma de calor (Seção 2.2.3). A potência mecânica absorvida no regime ativo é dada pela Equação 11.

$$P_{Std}^{ativo} = \frac{p \cdot Q_b}{600 \cdot \eta_{g,Std}} \quad (11)$$

Na configuração *HiFlow*, a bomba de pistões modula seu deslocamento, entregando apenas a vazão demandada, à pressão de carga acrescida da margem de sensoriamento Δp , como a Equação 12 demonstra.

$$P_{HF}^{ativo} = \frac{(p + \Delta p) \cdot Q_{dem}}{600 \cdot \eta_{g,HF}} \quad (12)$$

A potência economizada no regime ativo, $\Delta P_{ativo} = P_{Std}^{ativo} - P_{HF}^{ativo}$, origina-se, assim, de duas fontes simultâneas: a supressão do estrangulamento da vazão excedente, que na arquitetura de centro fechado não existe, e o maior rendimento global da bomba de pistões.

No regime de espera, com as válvulas em posição neutra, a bomba de deslocamento fixo continua a deslocar a totalidade de sua vazão, ainda que sob a pressão reduzida de circulação p_{desvio} , característica da válvula divisora compensada. A bomba de pistões, por sua vez, reduz seu deslocamento a valores próximos de zero, absorvendo apenas a potência residual de suprimento. A potência economizada nesse regime é definida pela Equação 13.

$$\Delta P_{standby} = \frac{p_{desvio} \cdot Q_b}{600 \cdot \eta_{g,Std}} - P_{HF}^{res} \quad (13)$$

Como demonstrada na Equação 14, a economia horária de combustível, em cada regime, obtém-se pela razão entre a potência economizada e o consumo específico do motor, multiplicada pela massa específica e pelo preço do diesel.

$$\Delta L = \frac{\Delta P \cdot bsfc}{\rho} \quad (14)$$

em que $bsfc$ é o consumo específico do motor diesel e ρ a massa específica do óleo diesel S-10.

A economia de uma dada operação, por hora de operação, resulta da composição dos dois regimes, ponderados pelo fator de atividade f_a , conceito definido na Equação 15.

$$E_{op} = [\Delta P_{ativo} \cdot f_a + \Delta P_{standby} \cdot (1 - f_a)] \cdot \frac{bsfc}{\rho} \cdot P_{diesel} \quad (15)$$

A adoção conjunta do fator de atividade e da distinção entre regimes evita a superestimação característica de modelos que assumem pressão plena de trabalho ao longo de toda a jornada, conferindo caráter conservador à estimativa.

3.4 Parâmetros de Entrada e Operações Analisadas

Os parâmetros do modelo dividem-se em duas naturezas: parâmetros técnico-econômicos fixos, comuns a todas as operações, e parâmetros operacionais específicos de cada implemento. O Quadro 4 apresenta os primeiros, com a respectiva origem.

Quadro 4 – Parâmetros Técnico-econômicos do modelo

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão da bomba <i>Standard</i>	Q_b	67 L/min
Rendimento global <i>Standard</i>	$\eta_{g,Std}$	0,765
Rendimento global <i>HiFlow</i>	$\eta_{g,HF}$	0,931
Margem de sensoramento	Δp	18 bar
Pressão de desvio do excedente	p_{desvio}	10 bar
Consumo específico do motor	$bsfc$	225 g/kWh
Massa específica do diesel	ρ	840 g/L
Sobrepço da configuração <i>HiFlow</i>	I_0	R\$ 25.000
Taxa Mínima de Atratividade	i	13,5% a.a.
Horizonte de análise	n	10 anos
Preço do diesel S-10	P_{diesel}	R\$ 7,50/L
Horas anuais de perfil intensivo	H/ano	1000
Potência residual da <i>HiFlow</i>	P_{HP}^{res}	0,5 kW

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

A vazão demandada, pressão de trabalho, fator de atividade e tipo de acionamento foram levantados para as operações que compõem o ciclo da soja nos dois sistemas de manejo. O Quadro 5 consolida esses dados.

Quadro 5 – Parâmetros operacionais por implemento.

Operação	Q_{dem} (L/min)	Pressão (bar)	f_a	Acionamento
Semeadura pneumática	30	130	80%	Hidráulico contínuo
Calagem	40	110	80%	Esteira hidráulica
Pulverização	12	120	10%	Barras hidráulicas
Manejo de palha	40	165	2%	Levante hidráulico
Grade niveladora	40	135	2%	Levante hidráulico
Aração	40	165	2%	Levante hidráulico
Grade pesada	40	175	2%	Levante hidráulico

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Cumprir distinguir, em atenção ao rigor, o status epistemológico de cada dado. As vazões demandadas (Q_{dem}) constituem especificações de catálogo dos fabricantes de implementos, dotadas de lastro documental direto. Os fatores de atividade (f_a), por sua vez, constituem estimativas de engenharia fundamentadas em dados de eficiência de campo reportados na literatura de mecanização agrícola (Lal, 1983; Silva; Alves; Queiroz, 2023; Lopes *et al.*, 2020),

e não medições diretas do tempo sob carga hidráulica no trator-alvo. Essa distinção é declarada explicitamente e enseja a recomendação de validação experimental por telemetria, apresentada nas considerações finais.

3.5 Estrutura da Análise Incremental e dos Indicadores de Decisão

A economia anual de combustível de cada configuração não decorre de uma operação isolada, mas do conjunto de operações que o trator executa ao longo da safra. Como esse conjunto e a distribuição de tempo entre as operações diferem entre os sistemas de manejo, a economia total de cada sistema foi obtida pela ponderação da economia de cada operação pela sua participação no tempo anual de trator, conforme a Equação 16.

$$E_{sistema} = H \cdot \sum_i w_i \cdot E_{op} \quad (16)$$

O regime anual de operação é dado por H , w_i é o peso operacional da operação i (sua fração no tempo total do sistema) e E_{op} a economia por hora dessa operação.

3.6 Instrumental de Análise Econômica

A avaliação econômica adota a análise incremental de custos, fundamentada na Seção 2.6.1, considerando exclusivamente os fluxos que diferem entre as configurações *Standard* e *HiFlow*. Três componentes integram a análise: o investimento incremental I_0 , correspondente ao sobrepreço da configuração de deslocamento variável; a economia operacional anual E , obtida pela composição por sistema de manejo; e o ônus anual de recuperação do capital incremental, computado pelo Fator de Recuperação de Capital (Equação 5). Como as duas configurações compartilham a totalidade dos demais subsistemas do trator, todas as rubricas comuns como o preço-base, operador, pneus e consumo do motor em tração se cancelam e não integram o cálculo.

O fluxo de caixa incremental é constituído pelo desembolso do sobrepreço no instante inicial e pela economia anual de combustível ao longo do horizonte de dez anos. Sobre esse fluxo, calculam-se os quatro indicadores de tomada de decisão: o *Payback* simples, o Valor Presente Líquido, a Taxa Interna de Retorno e o Retorno sobre o Capital Investido. A Taxa Mínima de Atratividade adotada é a da linha Moderfrota do Plano Safra 2025/2026, representativa do custo de capital para aquisição de máquinas agrícolas no Brasil.

Adotam-se como critérios de viabilidade, de forma conjunta: Valor Presente Líquido positivo, Taxa Interna de Retorno superior à Taxa Mínima de Atratividade de 13,5% ao ano e *Payback* inferior ao horizonte de análise. A decisão é tomada separadamente para cada sistema de manejo, de modo a identificar sob quais perfis de utilização a migração para o sistema *Load Sensing* se justifica economicamente. Complementarmente, determina-se o ponto de equilíbrio, que delimita a fronteira de utilização a partir da qual o investimento se torna vantajoso.

3.7 Análise de Sensibilidade

Reconhecendo que a robustez de uma análise de investimentos depende da avaliação sistemática de suas premissas, submeteram-se a variação controlada os parâmetros do modelo, adotando-se o Valor Presente Líquido como métrica de resposta. Procedeu-se, inicialmente, a uma análise da influência relativa de cada parâmetro, mediante a variação de cada variável ao longo de sua faixa plausível, mantidas as demais constantes, o que permitiu hierarquizar os parâmetros por sua amplitude de efeito sobre o resultado.

Dessa hierarquização, o regime anual de operação e o preço do diesel destacaram-se como os parâmetros de maior influência, sendo, por isso, examinados em detalhe, inclusive por meio do cruzamento de ambos em um mapa de calor que delimita a fronteira de viabilidade. O fator de atividade, a Taxa Mínima de Atratividade e o sobrepreço do investimento foram

igualmente avaliados. A pressão de desvio do excedente, por sua vez, revelou influência reduzida sobre o resultado e foi remetida ao apêndice; seu valor de caso-base, de 10 bar, apoia-se na perda de carga do comando de centro aberto *Bondioli DNC65* empregado no trator-alvo, de aproximadamente 7 bar à vazão nominal de 67 L/min, conforme catálogo do fabricante, à qual se somam as perdas de filtragem, arrefecimento e linhas de retorno.

A análise de sensibilidade cumpre, no presente trabalho, a função de aferir a solidez da conclusão obtida para cada sistema de manejo, verificando se a viabilidade do sistema *Load Sensing* se mantém estável dentro das faixas plausíveis dos parâmetros.

3.8 Limitações do Método

Cumprido, por fim, explicitar as limitações do método, em atenção ao rigor científico e à correta delimitação do alcance das conclusões.

A primeira limitação refere-se à distribuição do tempo entre operações: os pesos operacionais de cada sistema de manejo constituem síntese fundamentada em horas por hectare equivalentes, obtidas da literatura de mecanização, e não medições do ciclo real do trator-alvo. Do mesmo modo, os fatores de atividade hidráulica são estimativas de engenharia baseadas na eficiência de campo e no tipo de acionamento, e não registros diretos do tempo sob carga. A determinação empírica de ambos, por instrumentação eletrônica embarcada (*CAN-bus*), constitui o principal desdobramento futuro do trabalho.

A segunda limitação reside na adoção de rendimentos nominais constantes para as bombas, quando, na prática, estes variam com a pressão, a rotação e a temperatura do fluido. Tal simplificação confere caráter conservador à estimativa, uma vez que, sob aquecimento em operação real, a diferença de desempenho entre as bombas tende a ampliar-se em favor da configuração de maior rendimento.

A terceira limitação refere-se à pressão de desvio do excedente, parâmetro condicionado à arquitetura específica do bloco de comando. Esse parâmetro foi tratado na análise de sensibilidade, mitigando o efeito de sua incerteza sobre a conclusão.

Por fim, a análise restringe-se ao domínio de operações compatíveis com a capacidade da configuração de referência e à cultura da soja nos dois sistemas de manejo considerados, não se estendendo a operações que excedam os limites de vazão ou pressão da bomba de engrenagens alvo do estudo, nem a outras culturas cujo ciclo de mecanização apresente composição distinta. Tais limitações, contudo, não comprometem a validade das conclusões dentro do escopo delimitado, uma vez que a análise de sensibilidade demonstra sua estabilidade frente à variação dos parâmetros incertos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos pela aplicação do modelo desenvolvido no Capítulo 3. A exposição parte da economia de combustível calculada para cada operação, avança para a composição dessa economia segundo o sistema de manejo, formaliza os indicadores de viabilidade e encerra com a análise de sensibilidade e a discussão crítica dos achados.

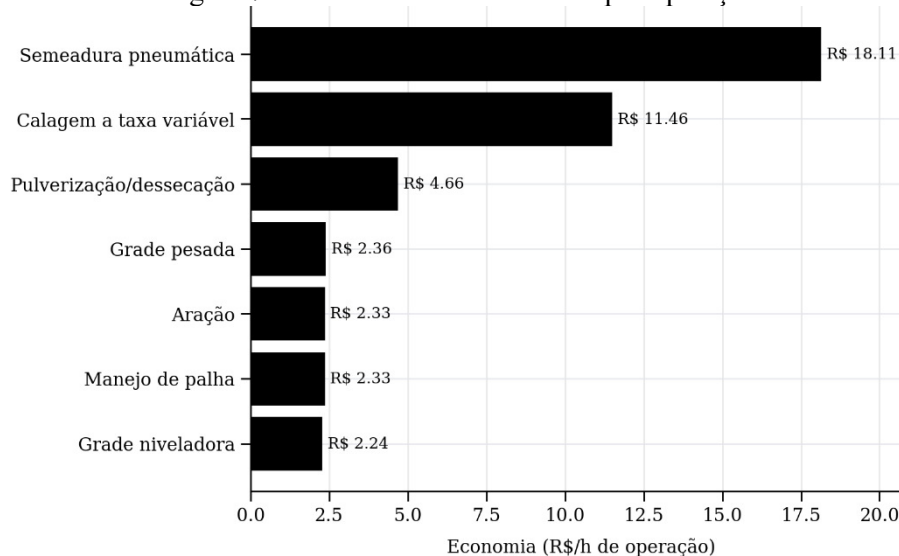
4.1 Economia de Combustível por Operação

A aplicação do modelo físico de dois regimes às operações do ciclo da soja resultou nos valores de economia por hora apresentados na Figura 7.

Os resultados revelam uma nítida estratificação da economia conforme o tipo de acionamento do implemento, o que constitui o principal achado do modelo físico. As operações de acionamento hidráulico contínuo, nas quais o implemento demanda vazão sob pressão durante a maior parte do tempo de trabalho, apresentam economia substancialmente elevada,

alcançando R\$ 18,11 por hora na semeadura pneumática e R\$ 11,46 por hora na calagem a taxa variável. Já as operações de tração ou tomada de potência, nas quais o sistema hidráulico atua apenas no levante de cabeceira, apresentam economia reduzida, da ordem de R\$ 2,30 por hora.

Figura 7 – Economia de combustível por operação



Fonte: Resultados da pesquisa (2026).

Essa diferença de quase dez vezes entre os dois grupos tem origem física clara. Nas operações contínuas, a bomba de deslocamento fixo é obrigada a pressurizar a totalidade de sua vazão à pressão de carga, estrangulando o excedente que não é aproveitado pelo implemento e convertendo-o integralmente em calor. É precisamente esse desperdício que o sistema de deslocamento variável elimina, ao modular a vazão à demanda instantânea. Nas operações de levante, ao contrário, o acionamento hidráulico ocorre em fração ínfima do tempo, de modo que a economia se restringe à supressão do bombeamento em regime de espera, de magnitude bem menor.

Cumpra observar que as operações de levante de cabeceira, a saber a aração, a gradagem pesada, a gradagem niveladora e o manejo de palha, apresentam economia praticamente idêntica, entre R\$ 2,24 e R\$ 2,36 por hora, a despeito de suas diferentes pressões de trabalho. Tal uniformidade decorre do baixo fator de atividade comum a essas operações, que faz com que a parcela dominante da economia provenha do regime de espera, o qual independe da pressão de carga do implemento.

4.2 Composição da Economia por Sistema de Manejo

A economia por operação foi ponderada pela participação de cada operação no tempo anual do trator, segundo os pesos de cada sistema de manejo, adotando-se o regime anual de 1.000 horas, correspondente ao limiar de uso intensivo estabelecido pela literatura de mecanização agrícola (MIALHE, 1974; ASABE, 2011). O Quadro 6 apresenta a economia anual resultante.

Quadro 6 – Economia ponderada por sistema de manejo (H = 1.000 h/ano)

Sistema de Manejo	Economia ponderada (R\$/h)	Economia Anual (R\$/ano)
Plantio Convencional	5,37	5.368
Plantio Direto	9,08	9.078

Fonte: Resultados da pesquisa (2026).

O sistema de plantio direto apresentou economia anual aproximadamente 69% superior à do preparo convencional. Essa diferença expressiva decorre diretamente da composição de cada ciclo. No plantio direto, as operações de acionamento hidráulico contínuo, notadamente a semeadura e a distribuição de insumos a taxa variável, ocupam parcela relevante do tempo de máquina, com 30% e 12,5% respectivamente, e são justamente aquelas em que a bomba de deslocamento fixo mais desperdiça energia. Já o preparo convencional é dominado por operações de tração, como a gradagem pesada, a aração e a subsolagem, que somam mais da metade do tempo de máquina e nas quais o sistema hidráulico atua apenas no levante, resultando em economia modesta.

A economia anual, situada entre R\$ 5.368 e R\$ 9.078, corresponde a cerca de 5% e 8% do consumo total de combustível do trator, respectivamente. Tal magnitude é coerente com a literatura técnica, que reporta participações do subsistema hidráulico superiores a 30% da potência do motor em operações de alta demanda hidráulica, sendo, portanto, plenamente compatível com a ordem de grandeza aqui obtida. A conversão desses valores em indicadores de decisão é apresentada na seção seguinte.

4.3 Indicadores de Viabilidade

A partir do fluxo de caixa incremental de cada sistema, constituído pelo desembolso do sobrepreço de R\$ 25.000 no instante inicial e pela economia anual de combustível ao longo dos dez anos de horizonte, calcularam-se os quatro indicadores de decisão, cujos resultados constam do Quadro 7.

Quadro 7 – Indicadores de viabilidade por sistema de manejo.

Indicador	Preparo convencional	Plantio direto	Critério
<i>Payback</i> simples	4,66 anos	2,75 anos	< 10 anos
VPL (TMA 13,5%)	R\$ 3.555	R\$ 23.291	> 0
TIR	17%	34%	> 13,5%
ROIC	21%	36%	> TMA

Fonte: Resultados da pesquisa (2026).

Os quatro indicadores confirmam a viabilidade econômica da adoção do sistema *Load Sensing* em ambos os sistemas de manejo, ainda que com margens distintas. No plantio direto, o resultado é robusto: o Valor Presente Líquido de R\$ 23.291 aproxima-se do próprio valor do investimento incremental, o *payback* de dois anos e nove meses é bastante inferior à vida econômica considerada, e a Taxa Interna de Retorno de 34% supera em duas vezes e meia a Taxa Mínima de Atratividade.

No preparo convencional, a viabilidade confirma-se com margem mais estreita. O Valor Presente Líquido positivo de R\$ 3.555 e a Taxa Interna de Retorno de 17%, apenas moderadamente acima da Taxa Mínima de Atratividade de 13,5%, indicam que o investimento se justifica, porém com menor folga. Essa diferença entre os sistemas é coerente e informativa, pois demonstra que o retorno do investimento em tecnologia hidráulica de deslocamento variável é tanto maior quanto mais o perfil de uso do trator concentrar operações de acionamento hidráulico contínuo, característica marcante do sistema de plantio direto.

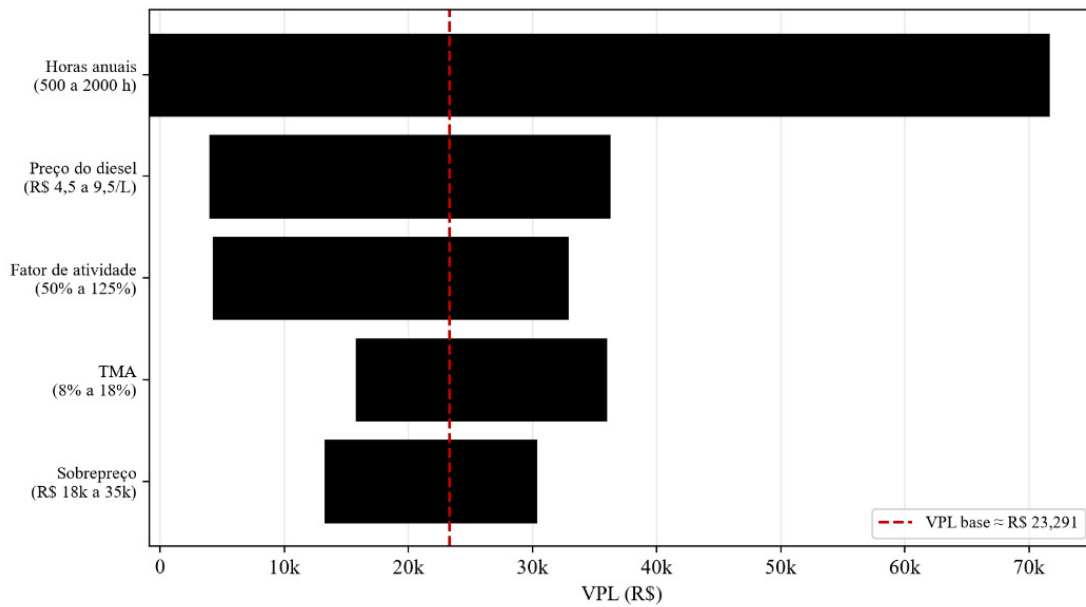
4.4 Análise de Sensibilidade

A robustez dos indicadores foi aferida pela variação controlada dos parâmetros de maior incerteza do modelo. Tomou-se o sistema de plantio direto como referência, por representar o perfil predominante na soja comercial brasileira, e adotou-se o Valor Presente Líquido como métrica de resposta, por sintetizar em um único indicador o efeito acumulado de cada parâmetro ao longo do horizonte de análise.

4.4.1 Hierarquia de Influência dos Parâmetros

Antes de examinar cada parâmetro isoladamente, procedeu-se a uma análise da influência relativa de cada um sobre o resultado, mediante a variação de cada variável ao longo de sua faixa plausível, mantidas as demais constantes. A Figura 8 apresenta essa hierarquia sob a forma de gráfico tornado, no qual o comprimento de cada barra representa a amplitude de variação do Valor Presente Líquido atribuível ao respectivo parâmetro.

Figura 8 – Gráfico tornado da hierarquia de sensibilidade dos parâmetros sobre o VPL.



Fonte: Resultados da pesquisa (2026).

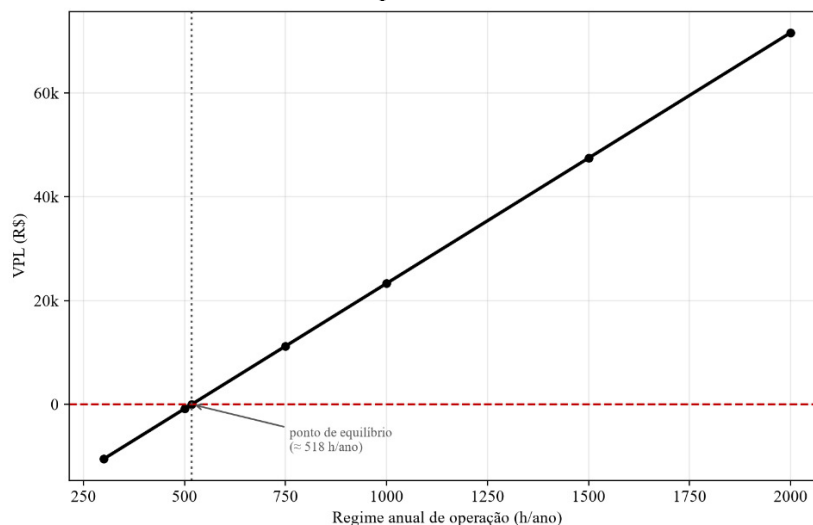
Verifica-se que o regime anual de operação é, de longe, o parâmetro de maior influência, seguido pelo preço do diesel e pelo fator de atividade. A Taxa Mínima de Atratividade e o sobrepreço do investimento exercem influência intermediária, ao passo que outros parâmetros técnicos, como a pressão de retorno e os rendimentos das bombas, revelaram-se de menor peso e foram, por isso, remetidos ao apêndice. Essa hierarquia orientou a seleção das variáveis analisadas em detalhe nas seções seguintes, com destaque para as duas de maior influência.

4.4.2 Regime Anual de Operação

O regime anual de operação mostrou-se o determinante central da viabilidade, o que é coerente com sua natureza, uma vez que multiplica diretamente a economia horária ao longo do ano. A Figura 9 apresenta a variação do Valor Presente Líquido em função das horas anuais de trabalho.

Este é o único parâmetro capaz de tornar o investimento inviável dentro de faixas realistas. Abaixo de aproximadamente 518 horas anuais, o Valor Presente Líquido torna-se negativo, indicando que, em regimes de uso muito reduzido, a economia acumulada não amortiza o investimento incremental. A partir desse limiar, o resultado cresce de forma acentuada, alcançando R\$ 23.291 no regime de uso intensivo de 1.000 horas adotado como referência e ultrapassando R\$ 71.000 em 2.000 horas anuais. Como o regime de referência situa-se com folga acima do ponto de equilíbrio, a conclusão de viabilidade mantém-se sólida.

Figura 9 – Sensibilidade do VPL ao regime anual de operação, com destaque para o ponto de equilíbrio.



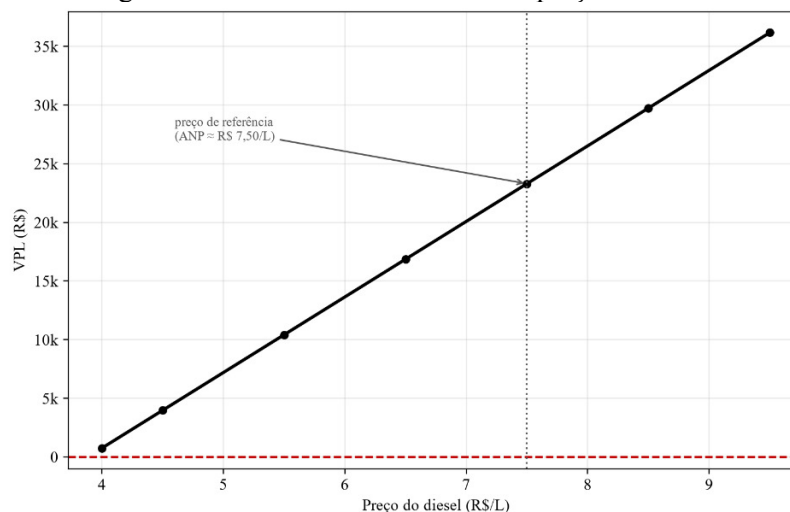
Fonte: Resultados da pesquisa (2026).

4.4.3 Preço do Diesel

O preço do diesel constitui o segundo parâmetro de maior influência, o que decorre de sua função como multiplicador direto do valor monetário da economia energética. A Figura 10 apresenta essa dependência.

O Valor Presente Líquido permanece positivo em toda a faixa analisada, de R\$ 3.975 no cenário de diesel a R\$ 4,50 por litro até cerca de R\$ 36.000 no cenário de R\$ 9,50 por litro. Depreende-se que a elevação do preço do combustível intensifica a vantagem da tecnologia, sem que a conclusão de viabilidade dependa dessa elevação. Trata-se, portanto, de um parâmetro que reforça o resultado, e não que o ameaça.

Figura 10 – Sensibilidade do VPL ao preço do diesel.



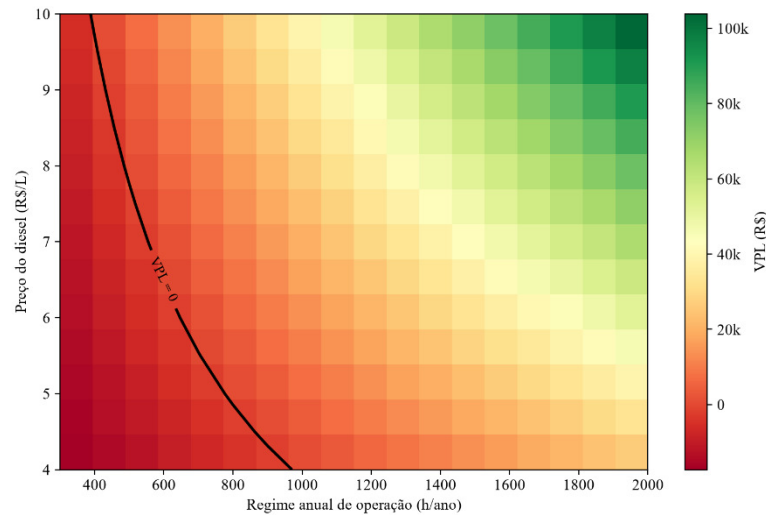
Fonte: Resultados da pesquisa (2026).

4.4.4 Fronteira de Viabilidade

O cruzamento das duas variáveis de maior influência, o regime anual de operação e o preço do diesel, permite delimitar de forma integrada a região de viabilidade do investimento.

A Figura 11 apresenta esse cruzamento sob a forma de mapa de calor, no qual a curva de Valor Presente Líquido nulo separa as combinações que criam valor daquelas que não o criam.

Figura 11 – Mapa de calor do VPL em função do regime anual de operação e do preço do diesel, com a curva de viabilidade nula em destaque.



Fonte: Resultados da pesquisa (2026).

A leitura do mapa evidencia que a inviabilidade se restringe a uma região reduzida, no canto de baixo uso e diesel barato, ao passo que a maior parte do domínio analisado corresponde a Valor Presente Líquido positivo. Para o preço de referência do diesel, a fronteira de viabilidade situa-se em torno de 500 horas anuais, confirmando que o regime de uso intensivo posiciona o investimento confortavelmente na região de criação de valor, mesmo sob cenários de queda expressiva do preço do combustível.

4.4.5 Demais Parâmetros

Os demais parâmetros examinados exerceram influência menor e não alteram a conclusão de viabilidade, conforme detalhado no apêndice. O fator de atividade, apesar de ser o parâmetro de maior incerteza metodológica, manteve o Valor Presente Líquido positivo em toda a sua faixa, variando o resultado entre R\$ 8.077 e R\$ 32.800, o que demonstra a robustez da conclusão frente à principal limitação do modelo. A Taxa Mínima de Atratividade e o sobrepreço do investimento, por sua vez, deslocaram o resultado dentro de margens que preservaram, em todos os cenários, a viabilidade econômica da tecnologia.

4.5 Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos permitem uma leitura integrada que ultrapassa a simples confirmação de viabilidade econômica. Os aspectos a seguir sintetizam os principais achados e situam o estudo frente à literatura.

4.5.1 O Mecanismo Físico da Economia

A estratificação nítida entre operações de acionamento hidráulico contínuo e operações de tração, demonstra que a vantagem do sistema *Load Sensing* se origina predominantemente da supressão do estrangulamento da vazão excedente sob pressão de carga. Nas operações contínuas, como a semeadura pneumática e a distribuição de insumos a taxa variável, a bomba de deslocamento fixo é obrigada a pressurizar a totalidade de sua vazão ao nível exigido pelo implemento, dissipando como calor toda a parcela que não realiza trabalho útil.

É essa perda, e não apenas a diferença de rendimento entre as bombas, que a arquitetura de deslocamento variável elimina. O resultado confirma a fundamentação teórica das perdas

por estrangulamento apresentada na Seção 2.2.3 e explica a razão pela qual a economia dessas operações supera em quase dez vezes a das operações de levante.

4.5.2 A Dependência do Sistema de Manejo

O plantio direto apresentou economia e indicadores substancialmente superiores aos do preparo convencional, com Valor Presente Líquido de R\$ 23.291 contra R\$ 3.555, e Taxa Interna de Retorno de 34% contra 17%. Essa diferença não decorre de uma eficiência intrínseca distinta da tecnologia, mas da composição do ciclo operacional de cada sistema.

Como as operações que definem o plantio direto são justamente aquelas de maior demanda hidráulica contínua, o perfil de uso do trator nesse sistema concentra-se nas condições em que o *Load Sensing* mais economiza. Depreende-se que a recomendação da tecnologia é tanto mais forte quanto mais intensivo for o sistema de produção adotado, característica marcante da agricultura comercial brasileira.

4.5.3 A Magnitude da Economia

Os valores obtidos, correspondentes a cerca de 5% a 8% do consumo total de combustível do trator, dimensionam o ganho de forma realista. Essa ordem de grandeza é compatível com a literatura técnica, que reporta participações do subsistema hidráulico superiores a 30% da potência do motor em operações de alta demanda, o que confere credibilidade aos resultados.

4.5.4 A Robustez da Conclusão

A hierarquia estabelecida pela análise de sensibilidade revelou que o regime anual de operação e o preço do diesel são os parâmetros determinantes, ambos externos à tecnologia e de conhecimento corrente pelo produtor. O regime de operação mostrou-se o único parâmetro capaz de comprometer a viabilidade, e ainda assim apenas em níveis de uso muito reduzido, abaixo do ponto de equilíbrio de aproximadamente 518 horas anuais, valor bastante inferior ao regime de uso intensivo adotado.

Merece destaque o fato de que o fator de atividade, embora seja o parâmetro de maior incerteza metodológica do modelo, exerceu influência que preserva a viabilidade em toda a sua faixa. Esse comportamento desloca a fragilidade do estudo de um parâmetro estimado para variáveis de natureza econômica bem conhecidas, o que fortalece a confiabilidade das conclusões.

4.5.5 Síntese

Em síntese, os resultados indicam que a migração para o sistema hidráulico de deslocamento variável com sensoriamento de carga é economicamente vantajosa nas condições analisadas, com retorno mais expressivo no sistema de plantio direto. O mecanismo de estrangulamento da vazão excedente nas operações de acionamento contínuo constitui o principal determinante do benefício, e a viabilidade mostra-se robusta às incertezas do modelo, dependendo criticamente apenas da intensidade de uso do trator, condição amplamente satisfeita nos perfis de produção comercial da soja.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs-se a avaliar, sob as óticas técnica e econômica, a viabilidade da adoção de um sistema hidráulico de deslocamento variável com sensoriamento de carga, em substituição ao sistema convencional de deslocamento fixo de centro aberto, em tratores agrícolas de média potência aplicados à cultura da soja, tomando o Valtra BH174 como referência da classe. A seguir, sintetizam-se os principais achados, reconhecem-se as limitações do método e apontam-se desdobramentos para investigações futuras.

5.1 Síntese dos Resultados

A análise permitiu estabelecer que a migração para a configuração *HiFlow*, dotada de bomba de pistões axiais A10VNO, é economicamente viável em ambos os sistemas de manejo do solo, sob o regime de uso intensivo de 1.000 horas anuais. No sistema de plantio direto, os indicadores mostraram-se robustos, com Valor Presente Líquido de R\$ 23.291, Taxa Interna de Retorno de 34%, Retorno sobre o Capital Investido de 36% e tempo de retorno de 2,75 anos. No preparo convencional, a viabilidade confirmou-se com margem mais estreita, com Valor Presente Líquido de R\$ 3.555, Taxa Interna de Retorno de 17%, Retorno sobre o Capital Investido de 21% e tempo de retorno de 4,66 anos. Cabe ressaltar, para fins de recomendação prática, que a adoção da tecnologia se justifica para o produtor de uso intensivo, cujo trator opera acima de aproximadamente quinhentas e dezoito horas anuais; abaixo desse limiar, o investimento não se paga ao longo da vida útil, não sendo, portanto, recomendado.

O achado técnico mais relevante do trabalho reside na identificação do mecanismo físico que origina a economia. Demonstrou-se que a vantagem do sistema *Load Sensing* decorre preponderantemente da supressão do estrangulamento da vazão excedente sob pressão de carga, e não apenas da diferença de rendimento entre as bombas. Nas operações de acionamento hidráulico contínuo, como a semeadura pneumática e a distribuição de insumos a taxa variável, a bomba de deslocamento fixo é obrigada a pressurizar a totalidade de sua vazão ao nível exigido pelo implemento, dissipando como calor a parcela não aproveitada. Essa constatação explica a nítida estratificação da economia entre operações contínuas, da ordem de R\$ 18,11 por hora na semeadura, e operações de simples levante de cabeceira, da ordem de R\$ 2,30 por hora.

Decorre desse mecanismo a forte dependência do resultado em relação ao sistema de manejo. Como as operações que definem o plantio direto são justamente aquelas de maior demanda hidráulica contínua, o perfil de uso do trator nesse sistema concentra-se nas condições em que a tecnologia mais economiza, o que explica a economia anual aproximadamente 69% superior à do preparo convencional. Depreende-se que a recomendação da tecnologia é tanto mais forte quanto mais intensivo for o sistema de produção adotado, característica marcante da agricultura comercial brasileira.

A análise de sensibilidade confirmou a solidez dessas conclusões e estabeleceu uma hierarquia de influência entre os parâmetros. O regime anual de operação e o preço do diesel revelaram-se os fatores determinantes, ambos externos à tecnologia e de conhecimento corrente pelo produtor. O regime de operação mostrou-se o único parâmetro capaz de comprometer a viabilidade, e ainda assim apenas em níveis de uso reduzido, abaixo do ponto de equilíbrio de aproximadamente 518 horas anuais no plantio direto, valor bastante inferior ao regime de referência adotado. Merece destaque o fato de que o fator de atividade hidráulica, apesar de ser o parâmetro de maior incerteza metodológica, preservou a viabilidade em toda a sua faixa de variação, o que desloca a fragilidade do estudo de um parâmetro estimado para variáveis de natureza econômica bem conhecidas.

5.2 Limitações do Estudo

O correto dimensionamento do alcance das conclusões exige o reconhecimento das limitações do método. A primeira refere-se à distribuição do tempo entre as operações de cada sistema de manejo, que constitui síntese fundamentada em horas por hectare equivalentes obtidas da literatura de mecanização, e não medição direta do ciclo do trator alvo do estudo. De modo análogo, os fatores de atividade hidráulica são estimativas de engenharia baseadas na eficiência de campo e no tipo de acionamento, e não registros diretos do tempo sob carga.

A segunda limitação reside na adoção de rendimentos nominais constantes para as bombas, quando, na prática, estes variam com a pressão, a rotação e a temperatura do fluido.

Tal simplificação confere caráter conservador à estimativa, uma vez que, sob aquecimento em operação real, a diferença de desempenho entre as bombas tende a ampliar-se em favor da configuração de maior rendimento.

A terceira limitação concerne à pressão de desvio do excedente, parâmetro condicionado à arquitetura específica do bloco de comando, cujo valor de caso-base foi ancorado em dado de catálogo e submetido à análise de sensibilidade, o que mitiga o efeito de sua incerteza. Por fim, a análise restringe-se à cultura da soja e aos dois sistemas de manejo considerados, não se estendendo a operações que excedam a capacidade da configuração de referência nem a outras culturas cujo ciclo de mecanização apresente composição distinta. Tais limitações, contudo, não comprometem a validade das conclusões dentro do escopo delimitado, uma vez que a análise de sensibilidade demonstrou a estabilidade do resultado frente à variação dos parâmetros incertos.

A quarta limitação refere-se ao escopo dos custos considerados. A análise incremental contempla exclusivamente a diferença no consumo de combustível, não incorporando eventuais diferenças no custo de manutenção entre as duas tecnologias. A bomba de pistões axiais, por sua maior complexidade construtiva e maior sensibilidade à contaminação do fluido hidráulico, tende a apresentar custo de reparo superior ao da bomba de engrenagens. A omissão desse componente confere caráter otimista à estimativa de economia líquida, de modo que os indicadores obtidos devem ser interpretados como limite superior. A título de sensibilidade, verifica-se que o Valor Presente Líquido permanece positivo enquanto o custo de manutenção diferencial anual da bomba de pistões não ultrapassar aproximadamente R\$ 4.380 no plantio direto; no preparo convencional, dada a menor economia base, esse limite reduz-se a cerca de R\$ 670 por ano. A quantificação desse custo, a partir de dados de campo de frota, constitui refinamento recomendado para trabalhos futuros.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Os desdobramentos naturais desta pesquisa orientam-se, sobretudo, para a substituição das estimativas por medições diretas. Recomenda-se, prioritariamente, a validação experimental por instrumentação eletrônica embarcada, mediante o registro da pressão e da vazão hidráulicas ao longo de jornadas reais de operação, o que permitiria determinar empiricamente os fatores de atividade e a distribuição do tempo entre operações, calibrando o modelo proposto.

Sugere-se, ademais, a ampliação da análise para outras classes de potência e outras culturas, verificando se a hierarquia de sensibilidade identificada se mantém. Recomenda-se, também, a incorporação de uma análise do regime térmico do circuito, avaliando o impacto da geração de calor sobre o dimensionamento do sistema de arrefecimento e sobre a vida útil dos componentes, dimensão que, embora fisicamente correlata à economia energética, não foi quantificada neste trabalho. Por fim, aponta-se como promissora a investigação de arquiteturas de sensoriamento de carga eletrônico, cujo potencial de otimização em cenários de múltiplos implementos não foi contemplado no escopo aqui delimitado.

REFERÊNCIAS

ABBASI, Rabiya; MARTINEZ, Pablo; AHMAD, Rafiq. The digitization of agricultural industry: a systematic literature review on agriculture 4.0. **Smart Agricultural Technology**, [s. l.], v. 2, art. 100042, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Síntese semanal do comportamento dos preços dos combustíveis**. Brasília, DF: ANP, 2026. Disponível em: [https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-](https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da)

concorrença/preços/síntese-semanal-do-comportamento-dos-preços-dos-combustíveis. Acesso em: 5 jul. 2026.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS (ASABE). **ASAE D497.7**: agricultural machinery management data. St. Joseph: ASABE, 2011.

BLANK, Leland; TARQUIN, Anthony. **Engenharia econômica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

BOSCH REXROTH. **Axial piston variable pump A10VNO series 52 and 53**: RE 92735. Lohr am Main: Bosch Rexroth, 2024. Disponível em: <https://www.boschrexroth.com>. Acesso em: 5 jul. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Plano Safra 2025/2026**. Brasília, DF: MAPA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mda/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/plano-safra-da-agricultura-familiar>. Acesso em: 5 jul. 2026.

CASOLI, Paolo; ZARDIN, Barbara; ARDIZIO, Salvatore; BORGHI, Massimo; PINTORE, Francesco; MESTURINI, Davide. The hydraulic power generation and transmission on agricultural tractors: feasible architectures to reduce dissipation and fuel consumption: Part 2. **E3S Web of Conferences**, [s. l.], v. 197, art. 07010, 2020.

CEROVIĆ, Vera B.; PETROVIĆ, Dragan V. Hidrostatički sistemi prenosa snage poljoprivrednih mašina: zapreminske pumpe. **Poljoprivredna Tehnika**, Beograd, ano 43, n. 1, p. 12-21, 2018.

CORTÉS, Juan Gaytán. Financial and economic indicators: ROIC (Return on Invested Capital), as a metric of financial efficiency. **Mercados y Negocios**, Guadalajara, ano 26, n. 56, 2025.

CULTIVAR. Valtra destaca tratores eficientes para o setor sucroenergético. **Revista Cultivar**, Pelotas, abr. 2026. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br>. Acesso em: 28 jul. 2026.

DANFOSS. **Axial piston pumps and Load Sensing systems: technical information**. Nordborg: Danfoss Power Solutions, 2020.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2023. (Sistemas de Produção, 19).

FARIAS, Marcelo Silveira de; SCHLOSSER, José Fernando; MARTINI, Alfran Tellechea; BERTOLLO, Gilvan Moisés; ALVEZ, Jorge Volpi. Desempenho operacional e energético de um trator agrícola durante operação de gradagem. **Tecno-Lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 22, n. 2, p. 130-135, 2018.

FIALHO, Arivelto Bustamante. **Automação hidráulica**: projetos, dimensionamento e análise de circuitos. 6. ed. São Paulo: Érica, 2011.

HIDRÁULICA & PNEUMÁTICA. **Bombas de deslocamento fixo vs deslocamento variável**. 2026. Disponível em: <https://hidraulicaepneumatica.com/bombas-de-deslocamento-fixo-vs-deslocamento-variavel/>. Acesso em: 6 jul. 2026.

INFIABRAKE. **Válvulas de detecção de carga: comparação de desempenho de centro aberto versus centro fechado**. [s. l.], 2026. Disponível em: <https://pt.infiabrake.com/news/industry-news/opencenter-vs-closedcenter-load-sensing->

IVANTYSYN, Jaroslav; IVANTYSYNOVA, Monika. **Hydrostatic pumps and motors: principles, design, performance, modelling, analysis, control and testing**. New Delhi: Academia Books International, 2001.

LAL, Harbans. Modelo matemático simples do rendimento operacional e quantificação dos seus parâmetros para chassi porta-implementos a tração animal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 18, n. 12, 1983.

LOPES, Arthur Gabriel Caldas; CORREIA, Tiago Pereira da Silva; BRITO, Guilherme Rodrigues de; FARIA, Alexandre Pinto Ferreira de Almeida; SILVA, Paulo Roberto Arbex. Desempenho operacional e custo da subsolagem com e sem rodado duplo no trator agrícola. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 35, n. 3, p. 317-329, 2020.

LUNCHBOX SESSIONS. **Load Sensing pumps & valves**. [s. l.]: CD Industrial Group, 2026. Disponível em: <https://www.lunchboxsessions.com/explore/hydraulics/load-sensing-pumps-valves>. Acesso em: 5 jul. 2026.

MAKKAR, Rahul; AALAM, Badar E; JAIN, Mukesh; ASHWANI. A review of cost analysis study of farm tractor. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 2914-2921, 2020.

MIALHE, Luiz Geraldo. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1974.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Produção**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007.

MOCERA, Francesco; SOMÀ, Aurelio; MARTELLI, Salvatore; MARTINI, Valerio. Trends and future perspective of electrification in agricultural tractor-implement applications. **Energies**, Basel, v. 16, n. 18, art. 6601, 2023.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho e análise de participação do mercado de tratores do Brasil: tendências de crescimento e previsão (2026-2031)**. [S. l.]: Mordor Intelligence, 2026. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/brazil-tractors-market>. Acesso em: 5 jul. 2026.

PACHECO, Edson Patto. **Seleção e custo operacional de máquinas agrícolas**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2000. (Documentos, 58).

PARR, Andrew. **Hydraulics and pneumatics: a technician's and engineer's guide**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011.

RENIUS, Karl Theodor. **Fundamentals of tractor design**. Cham: Springer, 2019.

RITURAJ, Rituraj; VACCA, Andrea; MORSELLI, Mario Antonio. Thermal modelling of external gear machines and experimental validation. **Energies**, Basel, v. 13, n. 11, art. 2920, 2020.

SANTOS FILHO, Sávio Geraldo dos; MARIALVA, Ana Clara Araújo; FARIA, Rafael de Oliveira; MARQUES FILHO, Aldir Carpes. Desempenho operacional da semeadura da soja na microrregião da Serra da Canastra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 52., 2023, Ribeirão Preto. **Anais [...]**. Ribeirão Preto: SBEA, 2023.

SILVA, Tawany Vieira da; ALVES, Raissa Bianchine; QUEIROZ, Renata Fernandes de. Determinação da eficiência de campo de dois tratores agrícolas em ensaio de preparo de solo com grade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 52., 2023, Ribeirão Preto. **Anais [...]**. Ribeirão Preto: SBEA, 2023.

TARGET HYDRAULICS. **Open and closed center hydraulic systems**. [S. l.]: Target Hydraulics, 2024. Disponível em: <https://www.target-hydraulics.com/open-and-closed-center-hydraulic-systems/>. Acesso em: 5 jul. 2026.

VALTRA. **Trator Valtra BH174: especificações técnicas**. Mogi das Cruzes: AGCO, 2024.

VANLICS. **Sistemas hidráulicos de centro aberto e fechado**. 2026. Disponível em: <https://vanlics.com/pt/sistemas-hidraulicos-de-centro-aberto-e-fechado/>. Acesso em: 5 jul. 2026.

YARD, Stefan. Developments of the payback method. **International Journal of Production Economics**, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 155-167, 2000.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Cajazeiras - Código INEP: 25008978
	Rua José Antônio da Silva, 300, Jardim Oásis, CEP 58.900-000, Cajazeiras (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0005-07 - Telefone: (83) 3532-4100

Documento Digitalizado Restrito

TCC - Vinícius

Assunto:	TCC - Vinícius
Assinado por:	Vinícius Araujo
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Restrito
Hipótese Legal:	Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Vinícius Guedes Araujo, ALUNO (201912240013) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CAMPUS CAJAZEIRAS, em 17/08/2026 08:26:08.

Este documento foi armazenado no SUAP em 17/08/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1952941
Código de Autenticação: ce3896f20d

