

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Transformação digital: Uso de dados e simulações de cenários no
planejamento operacional da colheita florestal mecanizada**

Ítalo Lima Nunes
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

ÍTALO LIMA NUNES

**Transformação digital: Uso de dados e simulações de cenários no
planejamento operacional da colheita florestal mecanizada**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Luciano Jose Minette

Coorientadores: Eduardo da Silva Lopes
Arthur Araujo Silva

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

Nunes, Ítalo Lima, 1995-

N972t
2025

Transformação digital: uso de dados e simulações de cenários no planejamento operacional da colheita florestal mecanizada / Ítalo Lima Nunes. – Viçosa, MG, 2025.

1 tese eletrônica (63 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Luciano José Minette.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.025>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Madeira - Exploração - Máquinas. 2. Telemetria.
3. Floresta - Colheita - Modelos matemáticos. 4. Monte Carlo, método de . I. Minette, Luciano José, 1960-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 634.9363

ÍTALO LIMA NUNES

Transformação digital: Uso de dados e simulações de cenários no planejamento operacional da colheita florestal mecanizada

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 8 de julho de 2025.

Assentimento:

Ítalo Lima Nunes
Autor

Luciano Jose Minette
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 29/01/2026 às 14:47:43 e pelo orientador em 29/01/2026 às 16:59:42. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **MSR3.9U59.B8YD** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida;
A minha família, Nídia Niela, Lúcia Silva, João Batista e Thamille pelo amor e apoio;
Ao meu filho João Niela Nunes pelo amor e carinho com o papai;
Ao professor Luciano Minette pela confiança e amizade;
Aos professores Arthur Araújo e Bruno Schettini pela parceria e auxilio durante a pesquisa;
A Marcia Oliveira pelo cuidado com os estudantes e pela amizade durante todos esses anos;
Ao Alexandre e Dilson que são fenômenos e sempre estão dispostos a ajudar todos os estudantes do PPGCF;
Ao departamento de Engenharia Florestal;
A Pós-graduação em Ciência Florestal;
Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

NUNES, Ítalo Lima, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2025. **Transformação digital: Uso de dados e simulações de cenários no planejamento operacional da colheita florestal mecanizada.** Orientador: Luciano Jose Minette. Coorientadores: Eduardo da Silva Lopes e Arthur Araujo Silva.

A adoção de tecnologias digitais no setor florestal vem transformando a forma como os dados operacionais são coletados, processados e utilizados para embasar decisões estratégicas. O objetivo do presente trabalho é demonstrar como o apontamento eletrônico, o diagnóstico operacional e as análises preditivas auxiliam a tomada de decisão. Foi realizada a avaliação do apontamento eletrônico em comparação ao método tradicional em papel, sendo observada uma redução de 96% no tempo de disponibilização das informações. Com os dados obtidos de forma confiável, realizou-se o diagnóstico da operação e a simulação de Monte Carlo para as variáveis de disponibilidade mecânica, eficiência operacional e produtividade, com 1.000 cenários simulados em cada modelo. Os resultados indicaram que, entre os indicadores analisados, houve probabilidade superior a 50% de atingimento dos valores de referência para o *forwarder*, enquanto, para o *harvester*, as probabilidades variaram entre 34% e 45%. Com base nesses dados, foi realizada a análise de viabilidade de modelos de operação de colheita florestal, considerando máquinas próprias e máquinas alugadas. Para esses cenários, os resultados demonstraram que, embora a locação demande menor capital inicial, a operação com máquinas próprias apresentou valor presente líquido positivo, taxa interna de retorno superior a 20% (acima da TMA de 13%) e *payback* de 4,26 anos.

Palavras-chave: custos; Monte Carlo; telemetria

ABSTRACT

NUNES, Ítalo Lima, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2025. **Digital transformation: Use of data and simulations in operational planning of mechanized forest harvesting.** Adviser: Luciano Jose Minette. Co-advisers: Eduardo da Silva Lopes and Arthur Araujo Silva.

The adoption of digital technologies in the forestry sector has been transforming the way operational data are collected, processed, and used to support strategic decision-making. The objective of this study is to demonstrate how electronic data recording, operational diagnostics, and predictive analyses support decision-making. An evaluation was conducted comparing electronic data recording with the traditional paper-based method, and a 96% reduction in information availability time was observed. With the data obtained in a reliable manner, an operational diagnosis and Monte Carlo simulation were carried out for the variables of mechanical availability, operational efficiency, and productivity, with 1,000 scenarios simulated for each model. The results indicated that, among the analyzed indicators, there was a probability greater than 50% of achieving reference values for the forwarder, while for the harvester, the probabilities ranged from 34% to 45%. Based on these data, a feasibility analysis of forest harvesting operation models was performed, considering owned machinery and leased machinery. For these scenarios, the results demonstrated that, although leasing requires lower initial capital investment, operations with owned machinery presented a positive net present value, an internal rate of return above 20% (higher than the minimum attractive rate of return of 13%), and a payback period of 4.26 years.

Keywords: costs; Monte Carlo; telemetry

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO I – APONTAMENTO ELETRÔNICO E ANÁLISES PROBABILÍSTICAS PARA TOMADA DE DECISÃO NA GESTÃO FLORESTAL

Figura 1 - Arquitetura do sistema CAN.....	21
Figura 2 - Total de horas apontadas analisadas para o <i>harvester</i>	23
Figura 3 – Indicadores de desempenho do <i>harvester</i> com apontamento eletrônico e papel	24
Figura 4 - Diagnóstico dos tempos de parada mecânica (%) para o <i>harvester</i>	25
Figura 5 - Diagnóstico dos tempos de parada operacional (%) para o <i>harvester</i>	26
Figura 6 - Total de horas apontadas analisadas para o <i>forwarder</i>	27
Figura 7 – Indicadores de desempenho do <i>forwarder</i> com apontamento eletrônico e papel.....	28
Figura 8 - Diagnóstico dos tempos de parada mecânica (%) para o <i>forwarder</i>	29
Figura 9 - Diagnóstico dos tempos de parada operacional (%) para o <i>forwarder</i>	29
Figura 10 - Histograma de frequência para a disponibilidade mecânica (%) do corte com <i>harvester</i>	31
Figura 11 - Histograma de frequência para a eficiência operacional (%) do corte com <i>harvester</i>	32
Figura 12 - Histograma de frequência para variável produtividade m ³ /hora do <i>harvester</i>	33
Figura 13 - Histograma de frequência para variável disponibilidade mecânica do <i>forwarder</i>	33
Figura 14 - Histograma de frequência para variável eficiência operacional do <i>forwarder</i>	34
Figura 15 - Histograma de frequência para variável produtividade m ³ /hora do <i>forwarder</i>	35

CAPÍTULO II – MODELOS DE NEGÓCIO DE OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA CUT-TO-LENGTH

Figura 1 - Produtividade do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> em função do volume médio individual (VMI)	50
Figura 2 - Custos de corte mecanizado com <i>harvester</i> (esquerda) e custos com baldeio mecanizado com <i>forwarder</i> (direita).....	53

Figura 3 - Custos de corte mecanizado com <i>harvester</i> na modalidade <i>rental</i> (esquerda) e custos com baldeio mecanizado com <i>forwarder</i> na modalidade <i>rental</i> (direita)	54
Figura 4 - Custos da colheita florestal R\$/m ³ na modalidade de máquinas própria e <i>rental</i>	55
Figura 5 - Custos da colheita florestal R\$/m ³ na modalidade de máquinas próprias (esquerda) e máquinas <i>rental</i> (direita)	56
Figura 6 - Custos da colheita florestal R\$/m ³ nos cenários avaliados entre 2025 – 2029	57

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I – APONTAMENTO ELETRÔNICO E ANÁLISES PROBABILÍSTICAS PARA TOMADA DE DECISÃO NA GESTÃO FLORESTAL

Tabela 1 – Tempo (horas) do envio da informação para o banco de dados a partir do momento que é gerada.....23

Tabela 2 - – Parâmetros utilizados para o *harvester* e *forwarder* na análise de Monte Carlo.....30

CAPÍTULO II – MODELOS DE NEGÓCIO DE OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA CUT-TO-LENGTH

Tabela 1 – Taxa SELIC e prêmio de risco médio do período de 2020 a 2024.....46

Tabela 2 – Quadro de mão de obra de gestão e apoio operacional dimensionado para o estudo.....48

Tabela 3 – Modelo de distribuição de trabalho considerando a escala 6X2 em turnos de 8 horas.....48

Tabela 4 – Premissas técnicas utilizadas para análise financeira referente ao corte com o *harvester*.....51

Tabela 5 – Premissas técnicas utilizadas para análise financeira referente ao baldeio com *forwarder*.....52

Tabela 6 – Fluxo de caixa do investimento em máquinas versus o modelo de máquinas *rental*.....57

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	11
CAPÍTULO I – APONTAMENTO ELETRÔNICO E ANÁLISES PROBABILÍSTICAS PARA TOMADA DE DECISÃO NA GESTÃO FLORESTAL	18
1. INTRODUÇÃO	18
2. METODOLOGIA	19
2.1. Caracterização da área	19
2.2. Conjunto avaliado	19
2.3. Disponibilidade mecânica	20
2.4. Eficiência operacional	20
2.5. Taxa de utilização	20
2.6. Captação das informações	20
2.6.1. Transmissão dos dados.....	21
2.7. Monte Carlo.....	22
2.8. Diagnóstico operacional.....	22
2.9. Análises estatísticas	22
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
3.1. Transmissão dos dados.....	22
3.2. Indicadores operacionais do <i>harvester</i>.....	23
3.3. Indicadores operacionais do <i>forwarder</i>.....	26
3.4. Análise de Monte Carlo.....	29
4. CONCLUSÃO	36
5. REFERÊNCIAS	37
CAPÍTULO II – MODELOS DE NEGÓCIO DE OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA CUT-TO-LENGTH.....	42
1. INTRODUÇÃO	42
2. METODOLOGIA	43
2.1.1. Caracterização da área	43
2.1.2. Sistema de colheita	43
2.1.3. Disponibilidade mecânica	44
2.1.4. Eficiência operacional	44
2.1.5. Taxa de utilização	44
2.1.6. Produtividade	44
2.1.7. Consumo de combustível	45
2.1.8. Mão de obra de manutenção	45
2.1.9. Avaliação financeira	45

2.2. Taxa Mínima de Atratividade.....	46
2.2.1. Valor Presente Líquido	46
2.2.2. Taxa Interna de Retorno.....	47
2.2.3. Payback	47
2.2.4. Depreciação.....	47
2.2.5. Tecnologia e comunicação.....	48
2.2.6. Gestão e apoio operacional.....	48
2.2.7. Mão de obra operacional.....	48
2.2.8. Remuneração de capital.....	49
2.2.9. Custo de produção.....	49
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4. CONCLUSÃO	60
5. REFERÊNCIAS	61

INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos anos, a cadeia produtiva florestal brasileira tem demonstrado crescimento econômico acima da média nacional. Entre 2010 e 2021, enquanto o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro acumulou alta real de 7,4%, o valor adicionado da cadeia florestal registrou um incremento de 20,5%, com destaque para o ano de 2016 como período de maior incremento (IBA, 2025). Essa expansão é sustentada pelos investimentos em ativos florestais, pesquisa e desenvolvimento (P&D), processos industriais e tecnologias digitais. O setor de árvores cultivadas vai investir mais de R\$ 100 bilhões entre 2022 e 2028, destinados a novas plantas, modernização de operações, automação de processos e adoção de soluções digitais (IBA, 2024).

Nesse contexto, a colheita florestal mecanizada ganha protagonismo, pois além de demandar elevados investimentos em ativos fixos, representa até 50% do custo total da madeira colocada na fábrica (Santos et al., 2018).

A colheita florestal mecanizada no sistema de toras curtas (*Cut-to-Length* – CTL) é comumente executada por meio da operação integrada de duas máquinas principais: o *harvester* (HV) e o *forwarder* (FW). O *harvester* pode consistir em uma escavadeira hidráulica adaptada com cabeçote florestal ou em uma máquina de pneus projetada especificamente para o corte florestal. Sua função abrange todas as etapas do processamento primário da madeira, incluindo o corte, a derrubada, o desgalhamento, o descascamento, o traçamento nas dimensões previamente especificadas e a disposição organizada dos feixes ao longo do talhão (Strandgard et al., 2019; Ghaffariyan; Dupuis, 2021).

O *forwarder*, por sua vez, é uma máquina de pneus destinada ao baldeio da madeira, sendo responsável por coletar os feixes processados pelo *harvester*, acondicioná-los no compartimento de carga traseiro e transportá-los até áreas de estocagem. Essas áreas são previamente definidas de forma estratégica, visando otimizar a logística de transporte até a unidade industrial, minimizando deslocamentos, custos e impactos ambientais (Britto et al., 2017; Louis et al., 2021);

A crescente competitividade do setor exige o aperfeiçoamento de ferramentas de gestão operacional e financeira, sendo a digitalização das operações e o uso do apontamento eletrônico instrumentos estratégicos para otimização da performance e mitigação de riscos. A integração de sensores embarcados, redes de transmissão e sistemas analíticos permite a coleta automatizada de dados de desempenho, com maior precisão, velocidade e confiabilidade.

A colheita florestal mecanizada é influenciada pelos seguintes fatores:

Ambiente (condições físicas de solo, declividade, condições climáticas como chuva e nevoeiros que dificultam a visibilidade);

Características do talhão (distância média de baldeio, volume médio individual da árvore; manejo subsequente e proximidades de linhas de transmissão);

Planejamento operacional (sequenciamento de talhões e projetos, logística interna, ponto de módulo, rotinas de troca de turno, abastecimento e outros);

Condições da máquina (manutenções preventivas, lubrificação, calibração da máquina base, cabeçote do *harvester* e garra do *forwarder*);

Operação da máquina (treinamentos específicos para cada modelo de máquina, fadiga e experiência).

Tecnologias como telemetria e redes de sensores embarcadas em máquinas como harvesters e forwarders permitem o registro de variáveis essenciais à gestão, como produtividade (m^3/h), consumo de combustível, disponibilidade mecânica, eficiência operacional e taxa de utilização (Diniz et al., 2020). Os dados são transmitidos por meio de canais como Bluetooth, Wi-Fi, satelital ou GSM para plataformas centralizadas de monitoramento (Sichonany et al., 2012), viabilizando análises em tempo real e decisões mais ágeis e assertivas (Brous et al., 2019). A possibilidade de tratar esses dados com abordagens estatísticas e estocásticas, como a simulação de Monte Carlo, permite ainda maior robustez nas previsões operacionais e financeiras, ao quantificar incertezas e modelar cenários de risco (De Sousa; Longhini, 2021; Ferraz et al., 2024; Silva, 2024).

Adicionalmente, o setor enfrenta desafios macroeconômicos relevantes. Em 2022, o custo de produção da madeira aumentou 9%, enquanto em 2021 o crescimento foi de 24%, ambos acima do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) de 5,8% em 2023 (IBA, 2024). O cenário de inflação elevada e desvalorização cambial compromete o poder de compra, impactando diretamente os modelos de contratação, a aquisição de novos ativos e a gestão do capital investido nas operações florestais. Diante disso, a utilização de dados operacionais integrados a análises financeiras oferece não apenas ganhos técnicos, mas também maior controle orçamentário e previsibilidade econômica.

Atualmente, o modelo cut-to-length (CTL) é amplamente utilizado na indústria de celulose, sendo composto por duas máquinas principais: o *harvester*, responsável pelo corte, processamento e traçamento da madeira; e o *forwarder*, responsável pelo baldeio e empilhamento junto à estrada (Munis et al., 2022). O elevado custo de aquisição e operação dessas máquinas exige decisões estratégicas sobre o modelo de negócio a ser adotado: modelo próprio ou modelo *rental* (Silva, 2024; da Hora, 2017).

Portanto, o uso combinado de apontamento eletrônico, diagnóstico operacional, modelagem estatística e análise financeira constitui uma estratégia essencial para aumentar a

eficiência operacional, mitigar riscos aumentar competitividade da colheita florestal mecanizada no Brasil.

REFERÊNCIAS

- BRITTO, P.C.; Jaeger, D.; Hoffmann, S.; Robert, R.C.G.; Fantini, A.C.; Vibrans, A.C. Productivity assessment of timber harvesting techniques for supporting sustainable forest management of secondary Atlantic Forests in southern Brazil. **Annals of Forest Research**, v. 60, n. 2, p. 203-215, 2017.
- BROUS, P.; JANSSEN, M.; HERDER, P. Internet of Things adoption for reconfiguring decision-making processes in asset management. **Business Process Management Journal**, v. 25, n. 3, p. 495-511, 2019.
- DA HORA, A.B. Panoramas Setoriais 2030: Papel e Celulose. In Panoramas setoriais 2030: Desafios e Oportunidades para o Brasil; **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**: Rio de Janeiro, Brasil, p. 79–91. 2017. ISBN 9788587545633.
- DE SOUSA, B.M.; LONGHINI, T.M. Ganho de produtividade com rastreamento de máquinas de terraplanagem no serviço de indústria de celulose. **Exacta**, 2021.
- DINIZ, C.C.C.; LOPES, E.S.; KOEHLER, H.S.; MIRANDA, G.M.; PACCOLA, J. Comparative analysis of maintenance models in forest machines. **Floresta e Ambiente**, v. 27, 2020.
- FERRAZ, C.P.A.; Manoel, M.P.D.S.; Chaves, J.V.B.; Aiello, L.H.F.; Silva, G.S.D.; De Medeiros, G. A.; Ribeiro, A.Í. Environmental impacts of mechanized timber harvesting in eucalyptus plantations in Brazil. **Forests**, v. 15, n. 8, p. 1291, 2024.
- GHAFFARIYAN, M.R.; DUPUIS, E. Analysing the impact of harvesting methods on the quantity of harvesting residues: an Australian case study. **Forests**, v. 12, n. 9, p. 1212, 2021.
- IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2024**. Brasil. Brasília, 2024. Disponível em: [relatorio2024.pdf \(iba.org\)](https://iba.org/relatorio2024.pdf). Acesso em: 04 out. 2024.
- IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2025**. Brasil. Brasília, 2025. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2025.
- LOUIS, L.T.; KIZHA, A.R.; DAIGNEAULT, A.; HAN, H.S.; WEISKITTEL, A. Factors affecting operational cost and productivity of ground-based timber harvesting machines: a meta-analysis. **Current Forestry Reports**, v. 8, n. 1, p. 38-54, 2022.
- MUNIS, R.A.; ALMEIDA, R.O.; CAMARGO, D.A.; DA SILVA, R.B.G.; WOJCIECHOWSKI, J.; SIMÕES, D. Machine Learning Methods to Estimate Productivity of Harvesters: Mechanized Timber Harvesting in Brazil. **Forests**, 13, 1068. 2022. <https://doi.org/10.3390/f13071068>.
- SANTOS, D.W.F.S.; FERNANDES, H.C.; VALENTE, D.S.M.; GOMES, B.M.; DADALTO, J.P.; LEITE, E.S. Desempenho técnico e econômico de distintos modelos de forwarders. **Nativa**, v. 6, n. 3, p. 305-308, 2018.

SICHONANY, O.R.D.A.O.; SCHLOSSER, J.F.; MEDINA, R.D.; ROGGIA, I.B.; LÔBO, J. S.; SANTOS, F.B.D. Telemetria na transmissão de dados de desempenho de máquinas agrícolas utilizando tecnologias GSM/GPRS e ZigBee. **Ciência Rural**, v. 42, p. 1430-1433, 2012.

SILVA, N. Medidas de núcleo de inflação para o Brasil baseadas no método wavelets. **Revista Brasileira de Economia**, v. 78, p. e042024, 2024.

STRANDGARD, M.; MITCHELL, R.; WIEDEMANN, J. Comparison of productivity, cost and chip quality of four balanced harvest systems operating in a *Eucalyptus globulus* plantation in Western Australia. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 40, n. 1, p. 39-48, 2019.

ABSTRACT

With the expansion of automation and the use of artificial intelligence across several sectors, the forestry sector has increased the level of digitalization and process automation in order to advance system integration, improve decision-making accuracy, and enhance operational management. In this context, telemetry and digital data recording have become the focus of mechanized operations, especially in forest harvesting, due to their significant contribution to the final cost of wood. The objective of this study was to demonstrate the potential of electronic data recording and telemetry in harvester and forwarder operations, and how operational diagnostic analyses and probabilistic approaches contribute to more assertive decision-making. The use of electronic data recording resulted in a 96% reduction in the average time required to access machine and production information, as well as a reduction in paper usage in field operations. A statistically significant difference was observed for the operational efficiency indicator when comparing the electronic data recording model with the conventional model. In the Monte Carlo analyses, the targets for mechanical availability and productivity of the harvester showed probabilities above 40% of being achieved, while the probability of achieving the operational efficiency target was 31.74%. For the forwarder, the probability of reaching the targets was greater than 50% for all evaluated indicators. The use of probabilistic analyses enables the definition of scenarios and provides a long-term perspective on the forest harvesting process. The application of predictive tools combined with electronic data recording allows the creation of dynamic and predictive indicators to support operational management and decision-making.

Keywords: Data; forest harvesting; telemetry.

RESUMO

Com a expansão da automação e uso de inteligência artificial em diversos segmentos, o setor florestal tem elevado o grau de digitalização e automação de processos para avançar em integrações de sistemas, tomada de decisão assertiva e gestão da operação. Nesse contexto, a telemetria e apontamento digital tem sido o foco das operações mecanizadas, em especial na colheita florestal, dado a sua representatividade no custo final da madeira. O objetivo do estudo foi demonstrar o potencial do apontamento eletrônico e telemetria em *harvester* e *forwarder* e como as análises de diagnóstico operacional e probabilísticas contribuem para decisões assertivas. Com o uso do apontamento eletrônico houve redução em 96% do tempo médio para acesso as informações das máquinas e da produção, e redução do uso de papel nas operações de campo. Houve diferença estatística para o indicador de eficiência operacional do modelo de apontamento eletrônico em relação ao modelo convencional. Para as análises de Monte Carlo, as metas de disponibilidade mecânica e produtividade do *harvester* obtiveram probabilidade acima de 40% de ocorrer, e meta de eficiência operacional foi de 31,74%. A probabilidade do *forwarder* atingir a meta foi maior que 50% em todos os indicadores avaliados. O uso de análises probabilísticas permite a definição de cenários e visão a longo prazo sobre o processo de colheita florestal, o uso de ferramentas preditivas aliada ao apontamento eletrônico permite a criação de indicadores flutuantes e preditivos para a gestão operacional e tomada de decisão.

Palavras chave: Dados; colheita florestal; telemetria.

CAPÍTULO I – APONTAMENTO ELETRÔNICO E ANÁLISES PROBABILÍSTICAS PARA TOMADA DE DECISÃO NA GESTÃO FLORESTAL

1. INTRODUÇÃO

Na última década, a cadeia produtiva florestal apresentou, em média, desempenho significativamente acima do PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro, em termos reais, enquanto o PIB do país cresceu 7,4% de 2010 a 2021, o valor adicionado da cadeia florestal apresentou incremento de 20,5%, no mesmo período, sendo o ano de 2016 o ano de desempenho superior (IBA, 2024). O setor de árvores cultivadas possui investimentos (2022-2028) de mais de R\$100 bilhões em florestas, P&D, operações, modernização de fábricas ou novas unidades, aporte que resultará em aumento de eficiência, tecnologia e avanços sustentáveis (IBA, 2024).

Diante da maior competitividade do setor e da demanda por maior controle das operações, o desenvolvimento de tecnologias de transmissão e apontamento proporciona melhorias técnicas e oportunidade para análise das operações florestais e principalmente da colheita florestal, sobretudo pelo impacto econômico, dada a alta participação no custo final da produção florestal e os riscos de perdas associados a essa atividade (Machado; Lopes 2000; Schettino et al., 2015).

Portanto, o gerenciamento digital da colheita através dos dados, integrando diferentes plataformas permite que os gestores accessem e monitorem esses dados, obtendo informações de qualidade para a tomada de decisão (Brous; Janssen; Herder, 2019; Ben-Daya; Hassini; Bahroun, 2020). Assim, a eficiência da operação é elevada uma vez que, quando de posse de informações de qualidade, os riscos da operação são minimizados ou pode-se tomar decisões com menor tempo (Ross, 2010; De Sousa; Longhini, 2021).

Dentro desta realidade, algumas variáveis podem ser consideradas como principais na gestão do desempenho de máquinas de colheita florestal: produtividade, consumo de combustível, disponibilidade mecânica, eficiência operacional e taxa de utilização (Diniz et al., 2020).

A utilização de redes de sensores do harvester e forwarder, conectados a um sistema de dados, permite medir diversas variáveis importantes para todo o processo, os dados coletados remotamente necessitam ser transmitidos para uma central de armazenamento para seu monitoramento, avaliação e controle. A telemetria é a transferência de dados provindos de uma ou mais máquinas remotas, permitindo uma comunicação instantânea, via Bluetooth, Wi-Fi ou *Global System for Mobile communications* (GSM) (Sichonany et al., 2012).

Não somente é importante a captação dos dados, mas também é necessário compreendê-los para que a tomada de decisão seja mais assertiva e minimize as imprecisões, o uso de ferramentas probabilísticas permite mensurar a variabilidade de cenários e reduzir o efeito das incertezas. O método de Monte Carlo consiste em simulações estatísticas baseadas em um grande número de amostras dos parâmetros de interesse, com o objetivo de estimar numericamente o impacto do risco e da incerteza sobre um determinado processo ou sistema (Wang et al., 2025)

Diante desse contexto, o objetivo do estudo foi avaliar as diferenças entre os sistemas de apontamento eletrônico e manual em operações de colheita no sistema *Cut-to-Length* (CTL), realizar diagnóstico operacional e aplicar o método de Monte Carlo para prever cenários probabilísticos e mensurar incertezas associadas ao processo.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização da área

O estudo foi realizado com máquinas desenvolvendo trabalhos em povoamentos com clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, plantado em espaçamento 3,5 x 2,6 metros, sendo o corte raso realizado aos 6,5 anos, quando as árvores apresentavam volume médio individual (VMI) entre 0,16 a 0,33m³. Os povoamentos estavam localizados na região sul do Estado da Bahia (16°21'S e 39°32'W), a declividade variou de 2° a 26° sendo que a maior parte do período a operação foi realizada em áreas de relevo suave ondulado.

O clima predominante na região é do tipo Af, com verão chuvoso e inverno seco, segundo a classificação climática de Köpen, que apresenta precipitação anual de, aproximadamente, 1.200 mm, com temperatura média anual de 24,5°C. Os solos mais comuns são Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo (Embrapa, 2006).

2.2. Conjunto avaliado

Foram avaliadas oito máquinas Ponsse, sendo quatro harvester ergo e quatro forwarder elephant king, com média de 24.000 horas de operação. Sendo coletados de forma simultânea os dados de apontamento durante 2.000 horas para cada máquina, utilizando o sistema de apontamento digital e o apontamento manual. A análise abrangeu três turnos de operação e 32 operadores. A variação do desempenho desses operadores foi assumida como mínima, após considerar fatores como formação, experiência e familiaridade com as máquinas em uso, em que foram observados em plenas condições operacionais. O sistema de colheita adotado foi o

de “toras curtas” (*cut-to-length*), com toras de 6,50 metros de comprimento, em que o corte e processamento das toras foram realizados pelo *harvester*. A extração da madeira foi realizada em forma de baldeio pela máquina florestal *forwarder*.

2.3. Disponibilidade mecânica

A disponibilidade mecânica (DM) foi obtida por meio do percentual do tempo que a máquina esteve apta a realizar o trabalho (Equação 1).

$$DM (\%) = \left(1 - \left(\frac{Hm}{Ht}\right)\right) * 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde: DM = Disponibilidade mecânica (%); Hm = tempo de paradas para manutenção e reparos (horas); Ht = tempo de trabalho programado (horas).

2.4. Eficiência operacional

A eficiência operacional foi definida como o percentual do tempo das atividades efetivas, englobando todas as que resultaram em produção (Equação 2).

$$EO (\%) = 1 - \left[\left(\frac{Ho}{Ht - Hm} \right) * 100 \right] \quad \text{Equação 2}$$

Onde: EO = Eficiência operacional (%); Ho = tempo de paradas operacionais (horas)

2.5. Taxa de utilização

A Taxa de utilização ou grau de utilização representa o percentual de tempo que o equipamento operou efetivamente, sendo calculado pela equação 3.

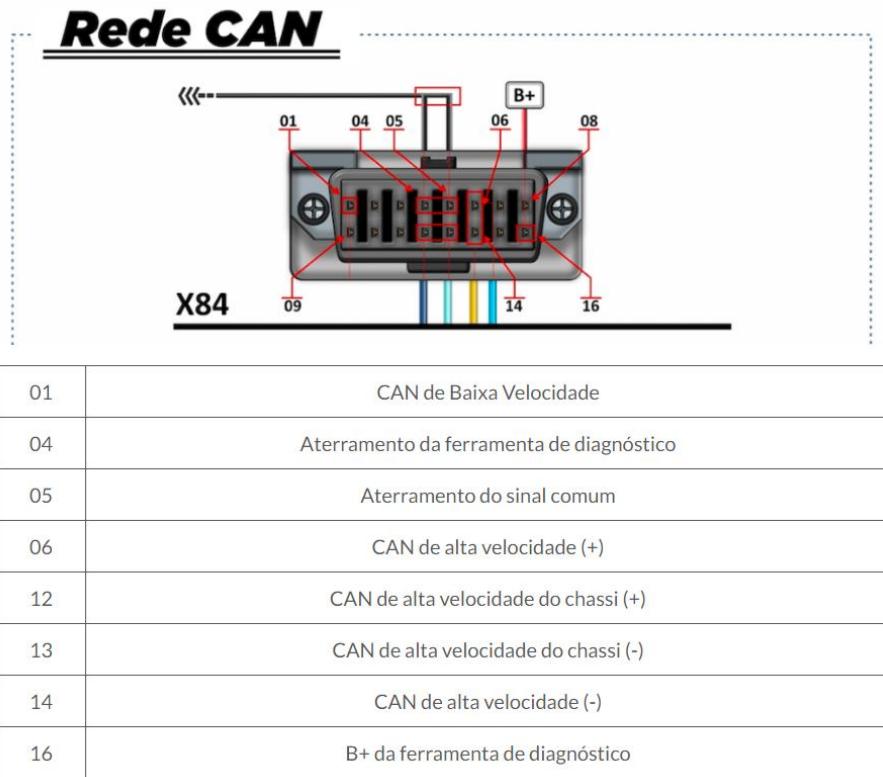
$$TU = DM \times EO \quad \text{Equação 3}$$

Onde: TU = Taxa de utilização (%); DM = disponibilidade mecânica (%); EO = Eficiência operacional (%).

2.6. Captação das informações

As informações relacionadas ao funcionamento da máquina e controle de paradas é realizada através do barramento CAN (*Controller Area Network*), interligando os módulos (2 ou mais) conforme sua arquitetura e com resistência de terminação. O barramento CAN é um protocolo de comunicação serial que permite a troca de informações entre diferentes dispositivos eletrônicos em um sistema (Figura 1), e é conhecido por sua confiabilidade, resistência a interferências e capacidade de suportar longas distâncias de comunicação (Holzleitner et al., 2011; Liu et al., 2017; Müller; Jaeger; Hanewinkel, 2019).

Figura 1 - Arquitetura do sistema CAN



Fonte: Rabelo (2022).

Os sensores correspondentes enviam os dados para o barramento CAN, que é acessado por um sistema de monitoramento central. Esse sistema pode alertar os operadores sobre condições anormais e fornecer informações em tempo real para auxiliar na manutenção preventiva.

2.6.1. Transmissão dos dados

Após a coleta, os dados são enviados para a nuvem, quando disponível de sinal a transmissão ocorria em tempo real e os dados eram armazenados nos sistemas da empresa. As opções de transmissão incluíram:

- Wifi: Quando havia disponibilidade de cobertura de rede wifi (2.4 GHz), com os dados sendo transmitidos/recebidos diretamente do servidor.
 - GSM (GPRS/2G/3G/4G): Em áreas com cobertura de rede GSM (GPRS/EDGE/3G/4G), a transmissão também ocorrendo diretamente do servidor.
 - M2M: Em situações em que a máquina opera em uma zona sem sinal de cobertura, utilizou-se coletores instalados nas próprias máquinas. Sendo coletados os dados das

máquinas e, posteriormente, quando o equipamento (tela de apontamento) estava em áreas com sinal GSM ou WiFi, disponibilizando as informações para a nuvem.

2.7. Monte Carlo

A técnica conhecida como simulação de Monte Carlo permite realizar milhares de simulações com variáveis independentes. O método de Monte Carlo é amplamente utilizado para estimar a distribuição de resultados baseados em variáveis de entrada e a distribuição associada (Silva, et al., 2014). O método baseia-se na frequência de ocorrência da variável que se aproxima da probabilidade matemática de ocorrência do mesmo fenômeno, quando a simulação é repetida diversas vezes. Foram realizadas as seguintes etapas:

- Identificação das variáveis de entrada que apresentavam correlação com o resultado final, selecionando a média e o desvio padrão;
- Para a simulação do modelo, foram gerados números aleatórios, com 1.000 simulações, considerando uma distribuição normal, obtendo-se uma série de valores para as variáveis em estudo (Disponibilidade mecânica, Eficiência Operacional, Taxa de utilização, Horas trabalhadas e Produtividade m³/hora);
- Analisou-se a probabilidade de ocorrência do valor observado de cada cenário em seu respectivo histograma de frequência. Tal probabilidade corresponde ao ponto em que a curva de frequência se cruza com o limite inferior da curva da frequência cumulativa.

2.8. Diagnóstico operacional

A partir do apontamento eletrônico, os dados foram tabulados para identificar os quais foram as atividades que foram mais representativas para a disponibilidade mecânica e a eficiência operacional.

2.9. Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos à análise de variância entre e dentro os modelos de apontamento, a comparação das médias foi feita pelo teste de Tukey, utilizando-se o programa estatístico R.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Transmissão dos dados

Houve redução de 95,9% no tempo de disponibilidade da informação em relação ao apontamento manual, ou seja, a partir do momento em que ocorreu o evento, em cerca de 2 horas a informação já estava disponível para consulta, já para o apontamento manual o período

médio foi de 47 horas (Tabela 1). Essa redução possibilita aos gestores um maior controle da operação do *harvester* e *forwarder*, ganhos logísticos para movimentação de máquinas, acompanhamento do ritmo para verificação de estoque de madeira esteirada e empilhada. É possível ainda verificar as variações no tempo médio de reparo de máquinas, deslocamento improdutivo de máquina, e outras informações que afetam a Disponibilidade Mecânica (DM), Eficiência Operacional (EO), Produtividade (m^3) e Taxa de Utilização (TU).

Tabela 1 – Tempo (horas) do envio da informação para o banco de dados a partir do momento que é gerada.

Máquina	Digital (h)	Papel (h)
Harvester/Forwarder	1,92a	47,67b

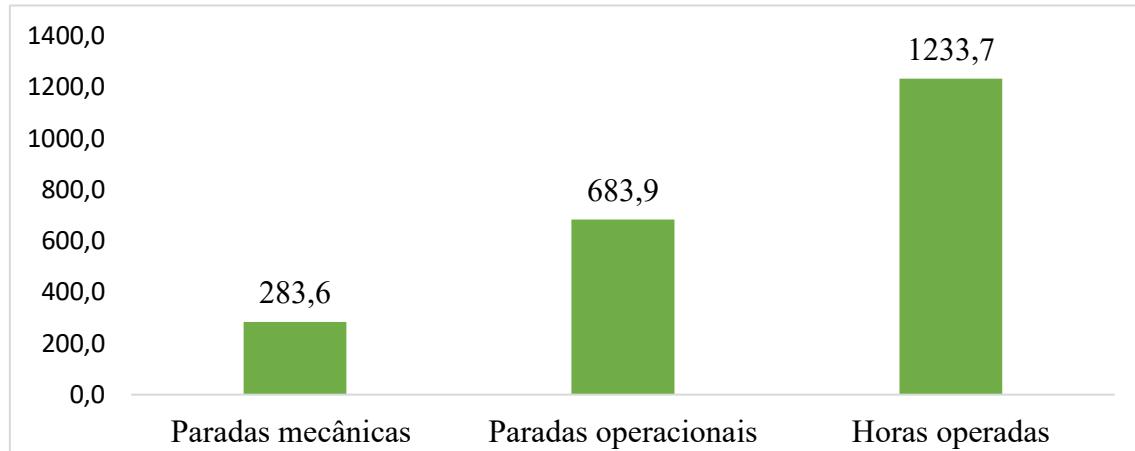
Médias seguidas das mesmas letras na coluna não diferem entre si ($\alpha = 5\%$)

Resultado similar foi encontrado por De Abreu e Ribeiro (2019) ao utilizar telemetria e transmissão de dados para máquinas florestais, obtendo uma redução de 98% do tempo de disponibilidade da informação, provendo ganhos na redução da digitação dos dados por parte do operador, ganhos na redução da digitação e erros de dados por transcrição dos antigos boletins de apontamento para o sistema florestal.

3.2. Indicadores operacionais do *harvester*

Foram analisadas 2.201,2 horas com o apontamento eletrônico referente aos *harvesters* ao longo do estudo (Figura 2), sendo observado que 56,05% do tempo programado para a execução do trabalho foi consumido pelos tempos produtivos da máquina, valor similar ao encontrado por Rodrigues et al., (2018), que avaliou *harvester* de esteira com 10.600 horas e observou tempos produtivos de 60%.

Figura 2 – Total de horas apontadas analisadas para o *harvester*

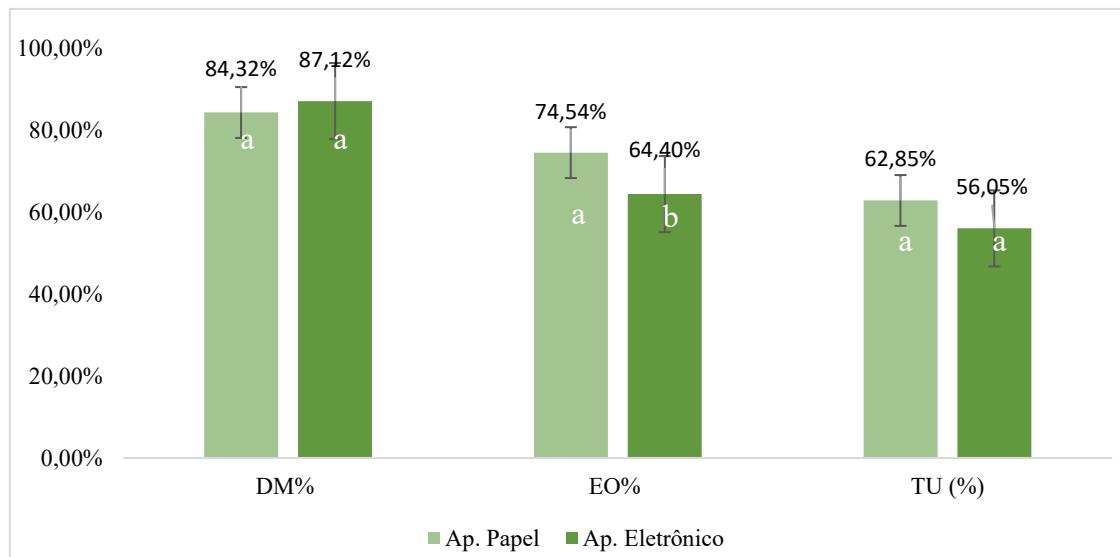


Do período total avaliado, 1233,7 horas foram referentes a operação de corte e processamento da madeira, etapa que compreende a derrubada, desgalhamento, descascamento,

traçamento e formação de feixes no telhão. Do total, 683,9 horas (31,07%) foram referentes paradas operacionais que impactam a eficiência operacional (EO) das máquinas. Foram registradas 283,6 horas referentes a paradas mecânicas, ou seja, período que a máquina não estava disponível para a operação, que representa 12,88% do tempo total avaliado.

A DM variou entre 84,32% e 87,12% entre os cenários avaliados, uma diferença de 2,8%, não havendo diferença estatística a 5% de significância (Figura 3). A análise da EO evidenciou uma variação significativa de 10,3% ao longo do período avaliado, havendo diferença estatística. O fator que explica essa diferença é a característica do apontamento eletrônico, visto que, quando a máquina fica parada por mais de 2 minutos o sistema entende que a máquina está em parada operacional, outra justificativa é o delay da informação, o apontamento eletrônico registra a nível de segundos, diferente do apontamento manual que o menor nível é minutos. A TU variou de 62,85% a 56,05%, não havendo diferença estatística.

Figura 3 – Indicadores de desempenho do *harvester* com apontamento eletrônico e papel



Legenda: DM – Disponibilidade mecânica; EO - Eficiência operacional; TU – Taxa de utilização.
Médias seguidas das mesmas letras na coluna não diferem entre si ($\alpha = 5\%$)

O uso de tecnologias digitais para colheita está trazendo ganhos de performance, gestão do ativo e otimizações, permitindo maiores rendimentos e resultados, bem como aumento da eficiência da operação (Häggström; Lindroos, 2016; Choudhry; O'kelly, 2018).

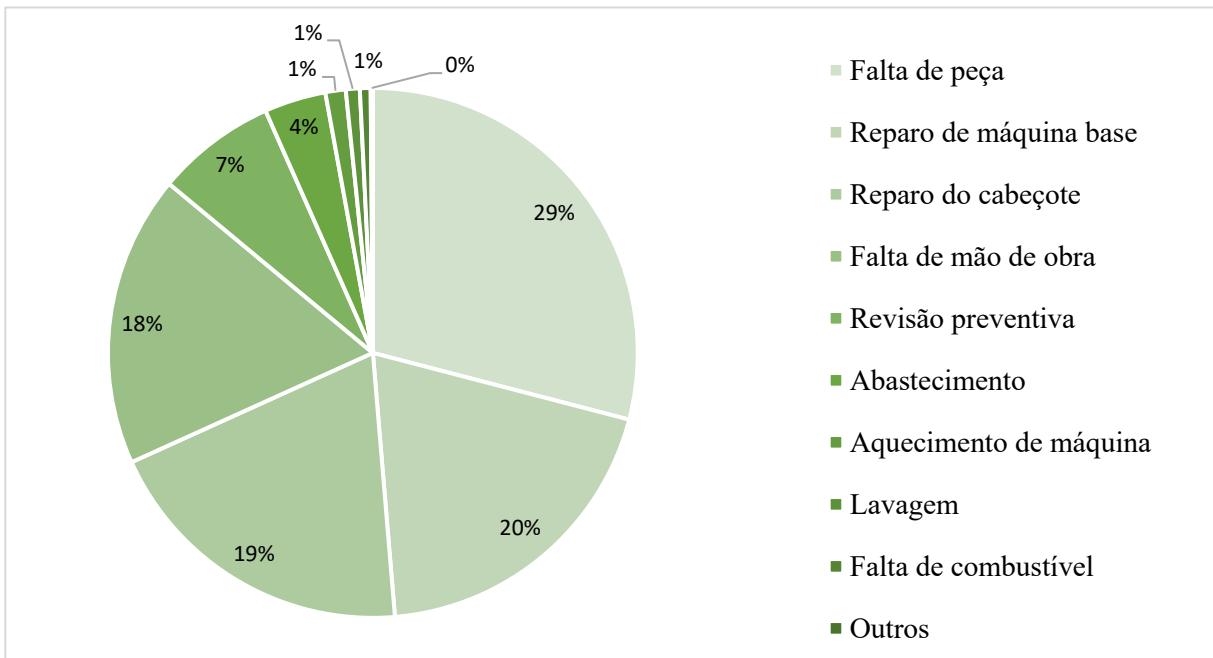
Conforme a Figura 4, a EO média do apontamento eletrônico foi de 64,4%. Valor similar ao encontrado por Seixas e Batista (2014), 66,2%, avaliando 4 modelos de *harvester* de esteira e de pneus.

A DM do *harvester* foi de 87,12%, valor semelhante ao encontrado por Linhares et al., (2012), para o mesmo modelo de máquina florestal (86,6%), essa diferença pode ser resultante

do horímetro médio das máquinas, 24.000 horas contra 5.000 horas do estudo citado acima, visto que máquinas em final de vida útil tendem a ter grandes intervenções.

De acordo com a Figura 4, é possível observar que de todas as atividades que compõem as paradas mecânicas, a falta de peça foi o principal fator de impacto negativo na disponibilidade mecânica, com 29% do tempo. Em sequência, destacam-se os reparos do cabeçote (20%) e da máquina base (19%), os quais, somados à indisponibilidade por falta de peças, representam 68% do total de horas. As atividades de manutenção preventiva representam apenas 7% do tempo total de paradas. A maior parte do tempo consumido pela manutenção mecânica foi causada pela necessidade de trocas das mangueiras do sistema hidráulico do implemento, resultado similar ao encontrado por Rodrigues et al., (2018), que também identificaram o sistema hidráulico como principal fator relacionado a disponibilidade mecânica.

Figura 4 – Diagnóstico dos tempos de parada mecânica (%) para o *harvester*

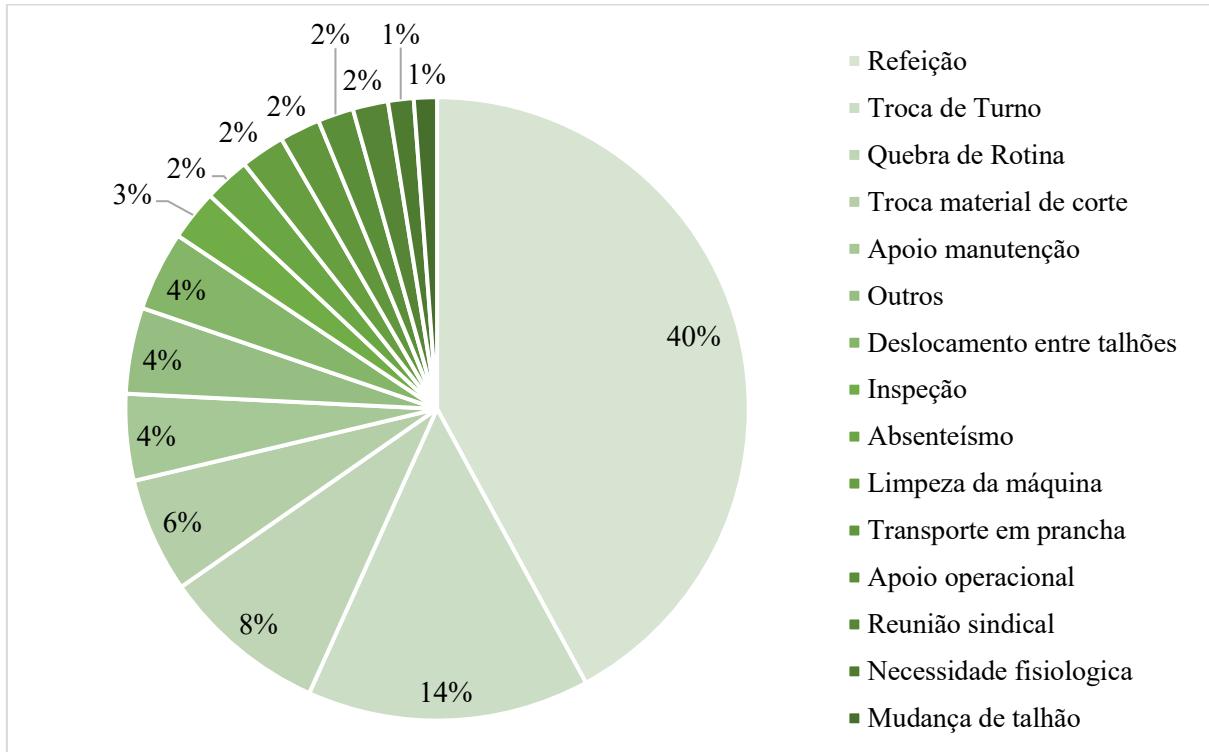


De acordo com Silva, et al., (2010) e Linhares, et al., (2012) as máquinas que permanecem paradas aguardando peças e manutenção, podem ter o período de espera reduzido com ações de rotina eficiente com a otimização do estoque, uso de dados para análise de tendência e Monte Carlo para análise de quebras, reduzindo os tempos ineficientes (Holzinger, et al., 2022).

De acordo com o diagnóstico da operação do HV, as atividades que compõem a eficiência operacional são apresentadas na Figura 5. Os períodos destinados à alimentação, troca de turno e eventos de quebra de rotina foram responsáveis por aproximadamente 62% do total de horas improdutivas registradas durante a operação. A introdução de turnos sobrepostos e o uso de operadores stand-by podem reduzir as horas em que as máquinas ficaram paradas

por questões operacionais, principalmente nos horários destinados a troca de turno e refeição, maximizando o uso da máquina e, consequentemente, a produção diária em m³/máquina.

Figura 5 – Diagnóstico dos tempos de parada operacional (%) para o *harvester*



Silva (2017), observou que a parada para quebra de rotina foi o principal indicador para a eficiência operacional (36%), já Linhares et al., (2012), quantificou que a estação do ano tem influência na eficiência operacional, demonstrando que o planejamento anual das empresas florestais deve considerar esses fatores para determinar uma colheita florestal aderente ao processo.

3.3. Indicadores operacionais do *forwarder*

Foram analisadas 2.201,4 horas com o apontamento eletrônico referente ao FW ao longo do estudo (Figura 6), sendo observado que 59,83% do tempo programado para a execução do trabalho foi consumido pelos tempos produtivos da máquina. Fiedler et al., (2017) avaliando dois modelos de FW encontrou a porcentagem média de horas operacionais de 59% a 62% para os modelos avaliados, demonstrando similaridade com os valores encontrados no presente estudo e a padronização das operações nas diferentes empresas florestais do Brasil. No estudo conduzido por Linhares et al., (2012) avaliando forwarder, foi registrado 84,7% de horas operacionais em máquinas no primeiro ano de vida útil. Esse resultado diverge dos dados observados no presente estudo, que analisou máquinas em etapa avançada do ciclo de vida, caracterizadas por maior desgaste e maior frequência de intervenções mecânicas.

Figura 6 - Total de horas apontadas analisadas para o forwarder



Do período total avaliado, 1317,1 horas foram referentes a operação de baldeio, etapa que compreende o carregamento, deslocamento e empilhamento da madeira na borda do talhão; 543,0 horas (24,66%) foram referentes a horas improdutivas que são horas que impactam a eficiência operacional (EO), 341,3 horas foram referentes a paradas mecânicas, ou seja, período que a máquina não estava disponível para a operação, que representa 15,51% do período total avaliado. A produção média para o período foi de 52,06 m³/hora.

Não foram observadas diferenças estatísticas quando aplicado teste Tukey a 5% de significância para as variáveis analisadas (Figura 7), ou seja, não houve alteração dos indicadores apenas pela mudança do modelo de apontamento eletrônico. A DM do forwarder foi de 84,49%, valor superior ao encontrado por Lacerda et al., (2015) que ao avaliar forwarder em diferentes regiões observou DM média de 79,8%. Já Linhares et al., (2012), observou DM de 92% avaliando o desempenho de forwarder, esta diferença pode ser explicada pelo fato das máquinas do presente estudo estarem programadas para operar em três turnos de 8 horas e não dois turnos como no estudo da autora citada.

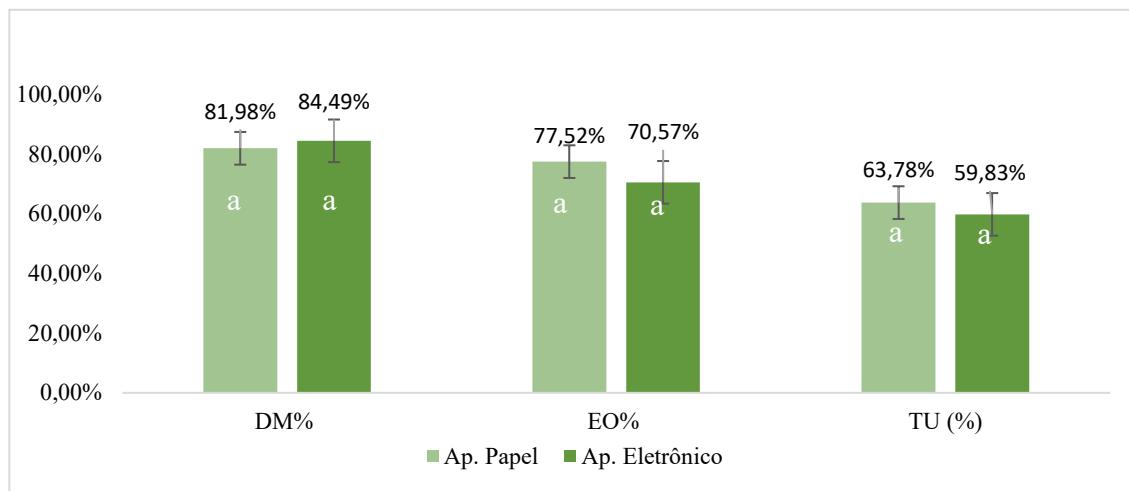
Não foram observadas diferenças estatísticas significativas ao se aplicar o teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis analisadas (Figura 7), indicando que a substituição do modelo de apontamento manual pelo sistema eletrônico não resultou, por si só, em alterações significativas nos indicadores operacionais avaliados.

A disponibilidade mecânica (DM) média observada para o forwarder foi de 84,49%, resultado superior ao encontrado por Lacerda et al., (2015), que, ao avaliar máquinas similares em diferentes regiões operacionais, identificou uma média de DM de 79,8%. Por outro lado, o valor obtido neste estudo foi inferior ao relatado por Linhares et al., (2012), que registrou DM de 92% em *forwarders* avaliados em fase inicial de operação. Esta diferença pode ser explicada pelo fato das máquinas do presente estudo estarem programadas para operar em três turnos de 8 horas e não dois turnos como no estudo da autora citada, visto que o maior volume de horas

operadas vai ocasionar o maior desgaste da máquina, outro ponto é que não há mais brechas para revisões preventivas sem afetar a DM, visto que todos os turnos estão programados para operação.

Figura 7 – Indicadores de desempenho do *forwarder* com apontamento eletrônico e papel

Legenda: DM – Disponibilidade mecânica; EO -Eficiência operacional; TU – Taxa de utilização. Médias



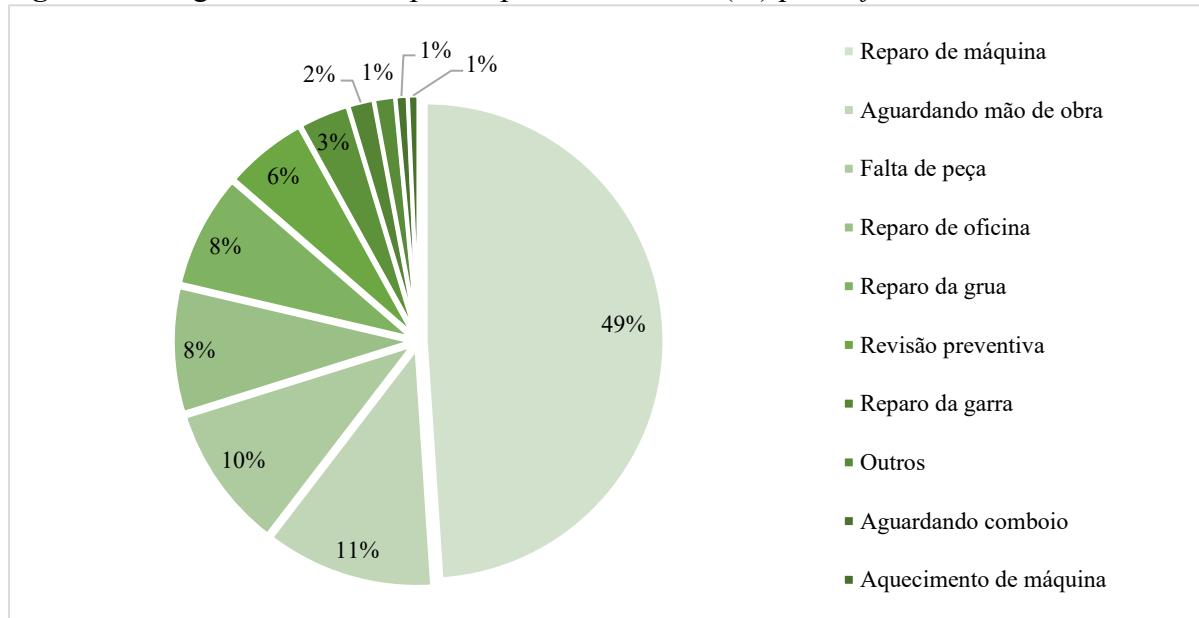
seguidas das mesmas letras na coluna não diferem entre si ($\alpha = 5\%$).

A EO média foi de 70,57%, Lacerda et al., (2015) observou EO média de 79% avaliando 4 regiões distintas, demonstrando que o planejamento da operação e execução das atividades programadas permitem alcançar indicadores próximos a 80%.

A produtividade média foi de 51,38 m³/hora, valor superior ao identificado por Santos et al., (2018), que avaliando *forwarder* do mesmo modelo observou médias de 44,16 m³/hora. O volume médio individual das árvores constitui um fator determinante para a produtividade das operações de baldeio, uma vez que influencia diretamente a eficiência de uso da garra de carregamento e descarregamento (Tiernan et al., 2004; Proto et al., 2018). Quanto maior o volume por árvore, maior a eficiência no aproveitamento da capacidade da garra, reduzindo o número de ciclos necessários por viagem.

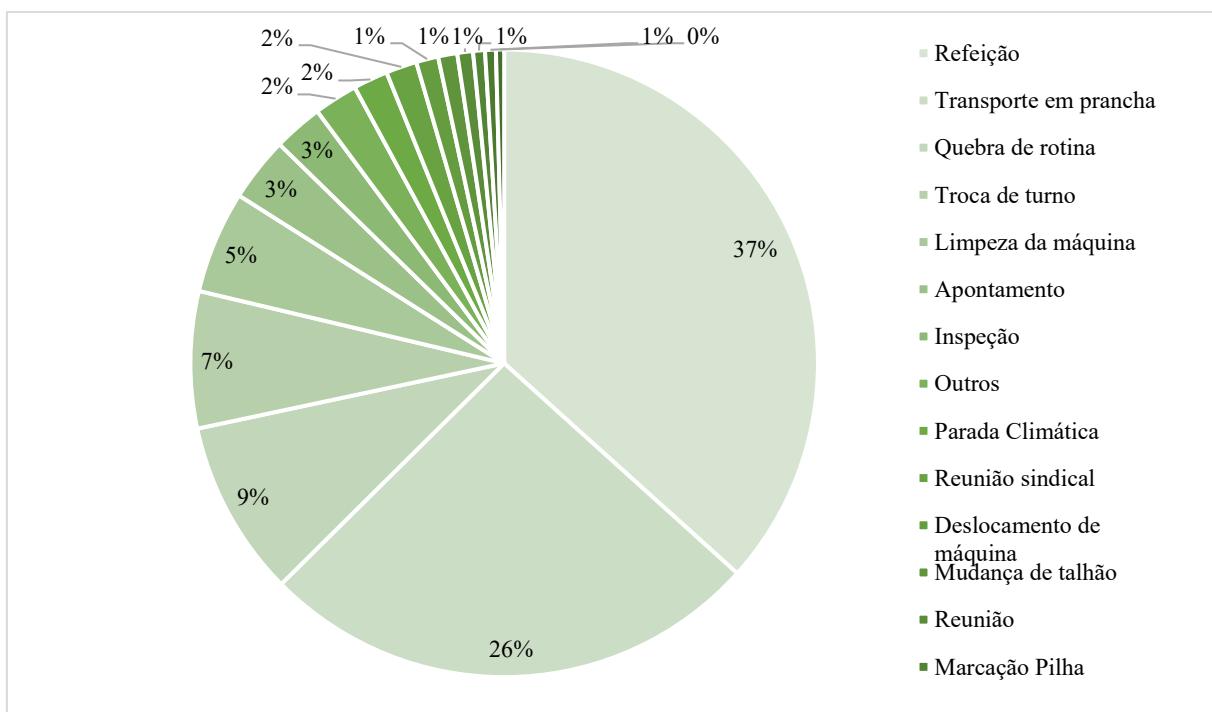
Conforme ilustrado na Figura 8, o reparo da máquina base foi o principal fator de parada mecânica, representando 47% do tempo total, resultado atribuído ao horímetro elevado (24.000 horas). Em seguida, destaca-se o aguardo por mão de obra, com 11%. Segundo Jacobs et al., (2022), falhas por quebra e desgaste de materiais são críticas para o *forwarder*, sendo os furos em mangueiras hidráulicas os mais recorrentes, devido à alta demanda de mangueiras na máquina base e na garra. No presente estudo, os reparos da máquina base e da grua somaram 54% das paradas, reforçando o potencial das manutenções preditivas para aumentar a disponibilidade mecânica (DM).

Figura 8 - Diagnóstico dos tempos de parada mecânica (%) para o forwarder



A Figura 9 apresenta os componentes que impactam a eficiência operacional (EO), sendo que os tempos destinados à refeição, transporte em prancha e quebras de rotina representam 71,66% do total de ineficiência. A adoção de operadores reservas para cobrir períodos de refeição e transições operacionais pode mitigar perdas produtivas, elevando a EO e, consequentemente, a produtividade em m³/hora.

Figura 9 - Diagnóstico dos tempos de parada operacional (%) para o forwarder



3.4. Análise de Monte Carlo

Na realização das 1.000 simulações da análise de Monte Carlo, foram utilizadas como variáveis de entrada as médias e os desvios padrão de quatro parâmetros operacionais:

disponibilidade mecânica (DM), eficiência operacional (EO) e produtividade ($m^3/hora$). A Tabela 2 apresenta os valores médios dessas variáveis e a probabilidade de ocorrência dos resultados simulados, separadamente para o *harvester* e o *forwarder*.

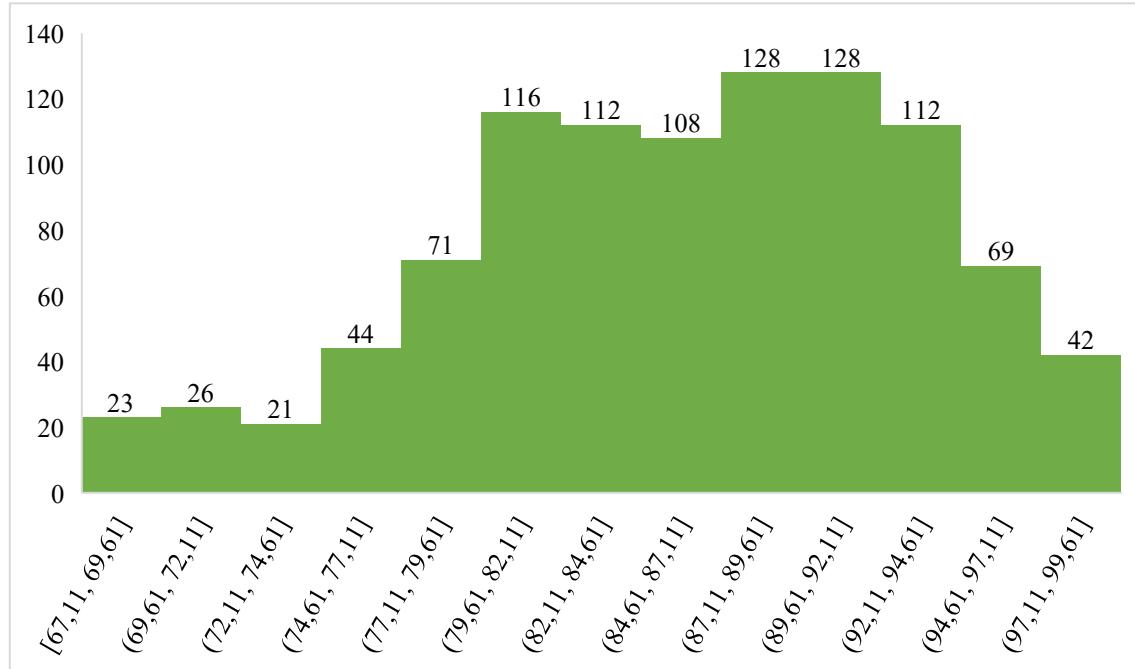
Tabela 2 – Parâmetros utilizados para o *harvester* e *forwarder* na análise de Monte Carlo

Máquina	Variável	Média	Desvio	Valor referência
HV	DM (%)	87,12	8,60	88,90
	EO (%)	64,40	11,79	70,00
	Produção (M^3/h)	23,07	8,59	24,00
FW	DM (%)	84,49	11,06	85,60
	EO (%)	70,57	9,62	70,00
	Produção (M^3/h)	51,38	10,14	54,00

Legenda: DM – Disponibilidade mecânica; EO - Eficiência operacional

Para determinar a probabilidade de ocorrência da DM%, foi encontrada a frequência da classe em que estava contida a média amostral para cada cenário (Figura 10). O eixo X representa intervalos da disponibilidade mecânica (%), o eixo Y indica a frequência de ocorrência para cada faixa de DM%. A DM (%) variou de 67,11% a 99,61% ao longo de 1.000 simulações, com mediana de 86,04%, valor próximo a média do estudo. A meta estabelecida de 88,90% apresentou probabilidade de atingimento de 41,78%. A distribuição foi aproximadamente normal com assimetria à direita, indicando maior concentração de cenários abaixo da meta. Essa assimetria ocorre quando o valor esperado excede a mediana (Silva et al., 2014). A cauda alongada à esquerda sinaliza a presença de cenários com baixa DM, sugerindo possíveis eventos de falhas operacionais.

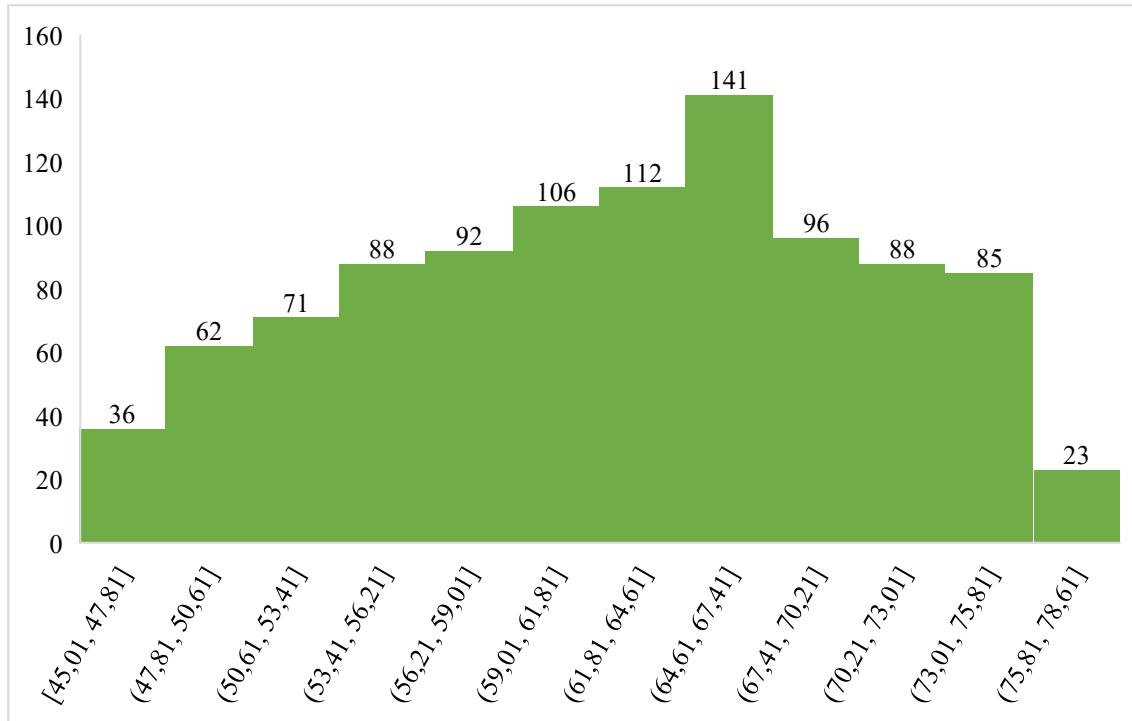
Figura 10 - Histograma de frequência para a disponibilidade mecânica (%) do corte com *harvester*



A eficiência operacional (EO) variou entre 45,0% e 76,9% (Figura 11), com mediana de 62,92% e média de 64,40%. A mediana inferior à média indica uma distribuição assimétrica à esquerda, com concentração de valores abaixo da média. A meta estipulada de 70% apresenta uma probabilidade de atingimento de apenas 31,74%, evidenciando um desvio em relação ao desempenho esperado. O pico de frequência foi registrado no intervalo de 64,61% a 67,41%, com 141 ocorrências, representando o valor mais provável da EO para o cenário analisado.

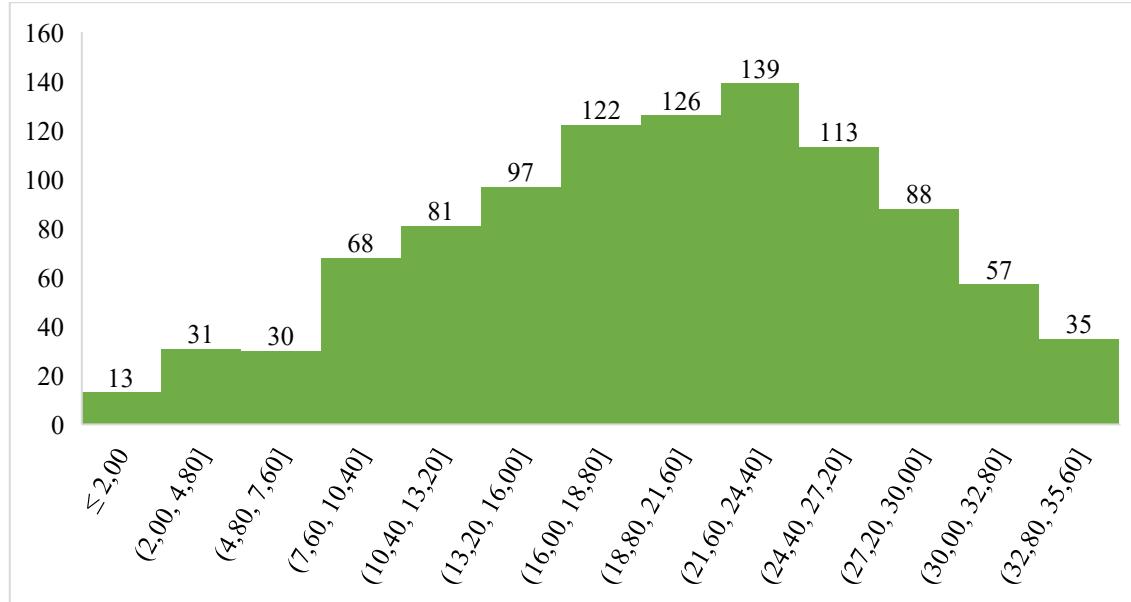
A cauda alongada para a esquerda demonstra a presença de simulações com baixa eficiência operacional, alertando para possíveis eventos relacionados a gestão de rotina.

Figura 11 - Histograma de frequência para a eficiência operacional (%) do corte com *harvester*



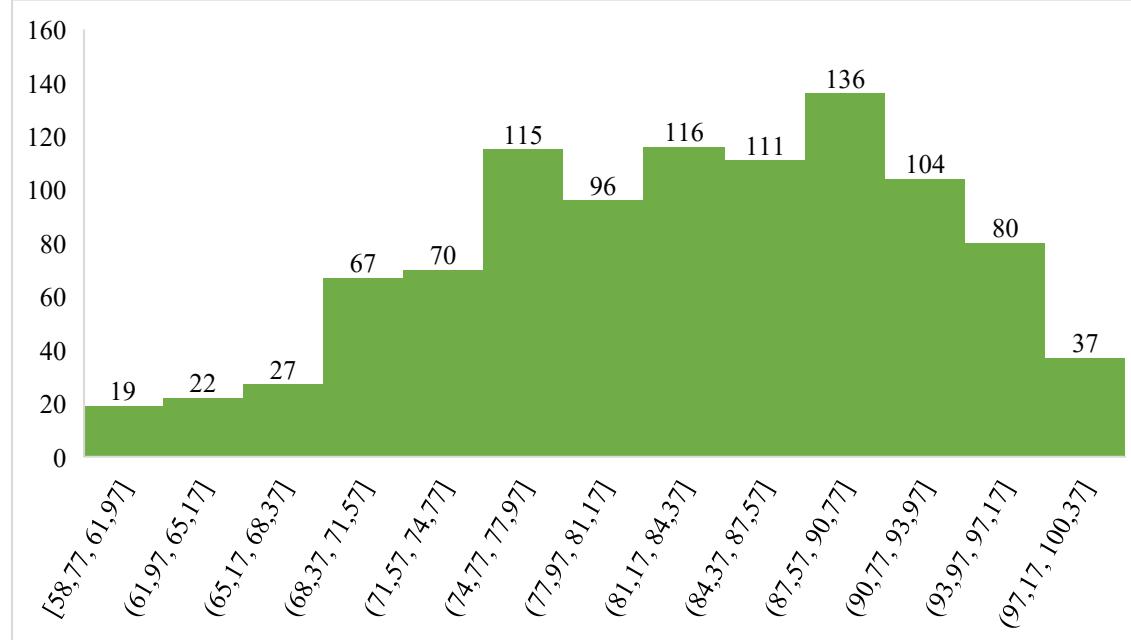
Conforme a Figura 12, a produtividade variou de 2,0 a 35,6 m³/hora, com distribuição assimétrica à direita (positiva), indicando maior concentração de valores entre 16,0 e 27,2 m³/hora. A média observada foi de 23,04 m³/hora, inferior à meta estabelecida, cuja probabilidade de atingimento foi de 45,67%. Casos com produtividade inferior a 5 m³/hora sugerem a ocorrência de falhas operacionais, restrições topográficas ou interferências externas. Por outro lado, os cenários acima de 30 m³/hora refletem situações atípicas, possivelmente associadas a florestas com elevado volume médio individual (VMI). De acordo com Drinko et al. (2015), *harvesters* tendem a apresentar ganhos expressivos de produtividade quando o VMI excede 0,2 m³.

Figura 12 - Histograma de frequência para variável produtividade m³/hora do *harvester*



O histograma para a DM do *forwarder* (Figura 13) demonstra distribuição normal com uma assimetria leve a esquerda, indicando maior concentração de valores acima da média. A disponibilidade mecânica (DM) variou entre 58,77% e 100%, considerando 1.000 simulações. A maioria dos cenários encontra-se concentrada no intervalo de 80% a 90%, evidenciando um comportamento centralizado em torno da média. A meta estabelecida para DM é de 85,6%, sendo que a probabilidade de atingimento foi estimada em 54%.

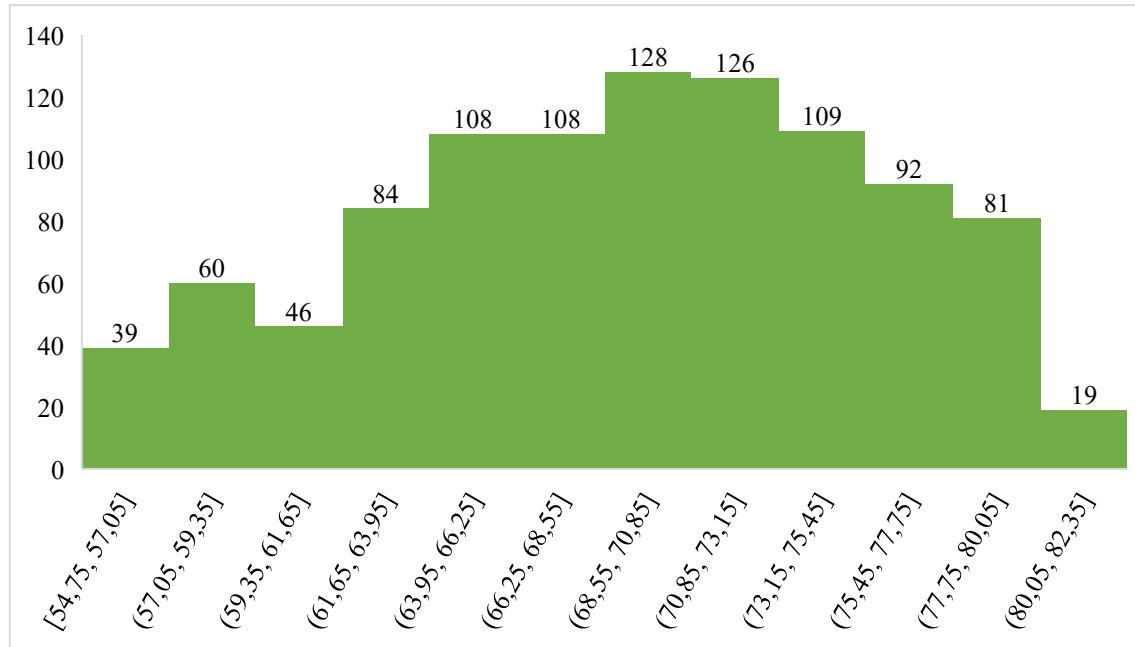
Figura 13 - Histograma de frequência para variável disponibilidade mecânica do *forwarder*



A Figura 14 apresenta a distribuição da eficiência operacional (%) do *forwarder*, obtida por meio de simulações de Monte Carlo. Os valores variaram de 54,75% a 82,35%, com distribuição normal e leve assimetria à esquerda. Cerca de 72% das simulações concentram-se

entre 66,25% e 77,75%, indicando alta previsibilidade e estabilidade operacional. A moda, localizada entre 70,85% e 73,15%, representa o valor mais provável de eficiência. A média estimada foi de 70,75%, superando ligeiramente a meta estabelecida de 70%, com uma probabilidade de atingimento de 52,36%, o que aponta para margem de melhoria operacional.

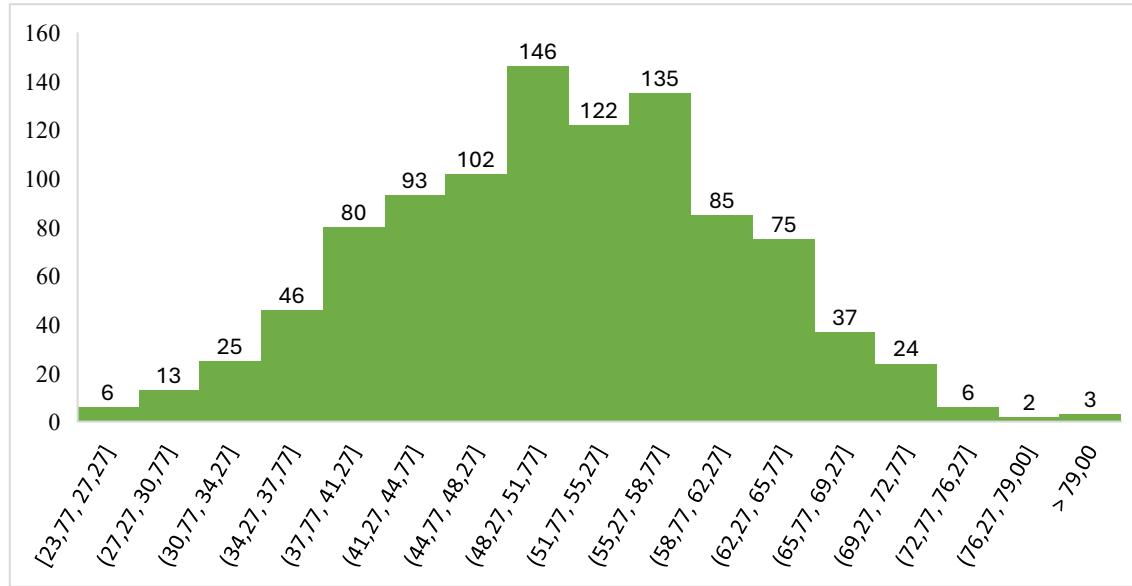
Figura 14 - Histograma de frequência para variável eficiência operacional do *forwarder*.



A Figura 15 apresenta o histograma de frequência da produtividade do baldeio com *forwarder*, expressa em m³/hora. A distribuição é aproximadamente normal com assimetria à direita, evidenciando a ocorrência de cenários com produtividade acima da média, que foi de 51,38 m³/hora. A classe modal, com maior frequência (146 ocorrências), está situada entre 48,27 e 51,77 m³/hora, intervalo que inclui a média observada, o que demonstra estabilidade operacional e baixa dispersão nos resultados. Esse comportamento sugere consistência no desempenho das operações de baldeio, com influência direta de variáveis operacionais como distância média de baldeio, volume médio individual (VMI) e declividade do terreno, fatores críticos que condicionam a eficiência do FW.

A distância média de baldeio pode ser trabalhada com estratégias de tamanho e formato de talhão e densidade de estradas, atualmente mais de 60% das áreas baldeadas pelo FW possuem distâncias entre 200 e 499 metros de distância afetando diretamente o rendimento das máquinas (Lundbäck et al., 2024).

Figura 15 - Histograma de frequência para variável produtividade m³/hora do *forwarder*



O valor de referência estabelecido para a produtividade do baldeio com *forwarder* foi de 54 m³/hora, sendo que a probabilidade de atingimento dessa meta é de 60,2%, conforme os resultados das simulações probabilísticas. Di Fulvio et al., (2024) observaram que a produtividade média de FW no Brasil é de 52 m³/hora, valor coerente com a referência adotada no presente estudo, indicando que o desempenho operacional analisado está dentro dos parâmetros esperados para a realidade florestal nacional.

4. CONCLUSÃO

O apontamento eletrônico representa um avanço significativo na gestão florestal de precisão, ao possibilitar a redução no tempo de geração e consolidação das informações operacionais, permite a integração entre dados de telemetria e registros de apontamento, promovendo uma análise mais robusta e detalhada das operações. Essa sinergia amplia a capacidade de monitoramento em tempo real, favorecendo a tomada de decisão baseada em dados.

O diagnóstico operacional permitiu compreender os gargalos da operação, onde foi observado que a gestão de peças é um fator que potencializa alta ou baixa disponibilidade mecânica.

Todas as metas do *harvester* estão abaixo de 50% de ocorrer, o que pode ocasionar desvios no planejamento a longo prazo caso não haja a implementação de ações mitigadoras ou a revisão do indicador no planejamento de corte. As metas do FW estão com probabilidade de ocorrerem acima de 50%, permitindo maior controle sobre variações a longo prazo.

A simulação de Monte Carlo é extremamente útil pois permite a simulação de cenários preditivos, antecipando variações e otimizando decisões, possibilitando a priorização de investimentos e melhorias operacionais.

5. REFERÊNCIAS

- BEN-DAYA, M.; HASSINI, E.; BAHROUN, Z. Internet of things and supply chain management: a literature review. **International Journal of Production Research**, v. 57, n.15-16, p. 4719-4742. 2020.
- BROUS, P.; JANSSEN, M.; HERDER, P. Internet of Things adoption for reconfiguring decision-making processes in asset management. **Business Process Management Journal**, v. 25, n. 3, p. 495-511, 2019.
- CHOUDHRY, H.; O'KELLY, G. Precision forestry: a revolution in the woods. **Basic materials, paper & forest products**, 2018.
- DE ABREU, A.D.; DE LANA, J.A.S.; RIBEIRO, R.N. Floresta 4.0 - integrando as operações de colheita florestal com SAP ECC. **Impact Awards** 2019.
- DE SOUSA, B.M.; LONGHINI, T.M. Ganho de produtividade com rastreamento de máquinas de terraplanagem no serviço de indústria de celulose. **Exacta**, 2021.
- DI FULVIO, F.; ACUNA, M.; ACKERMAN, P.; ACKERMAN, S.; SPINELLI, R.; ABBAS, D.; ... & GUERRA, S.P.S. Benchmarking operational conditions, productivity, and costs of harvesting from industrial plantations in different global regions. **International Journal of Forest Engineering**, v. 35, n. 2, p. 225-250, 2024.
- DINIZ, C.C.C.; LOPES, E.S.; KOEHLER, H.S.; MIRANDA, G.M.; PACCOLA, J. Comparative analysis of maintenance models in forest machines. **Floresta e Ambiente**, v. 27, 2020.
- DRINKO, C.H.; LOPES, E.S.; OLIVEIRA, F.M. Produtividade e Custos do Corte de Pinus com harvester de pneus e esteiras. **Enciclopédia Biosfera: Centro Científico Conhecer, Goiânia-GO**, v. 11, n. 22, p. 3664-3667, 2015.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa do Solo. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: **Embrapa**, 2006
- FIEDLER, N.C.; CARMO, F.C.D.A.D.; MINETTE, L.J.; SOUZA, A.P.D. Análise operacional da colheita florestal em sistema mecanizado de toras curtas. **Revista Árvore**, v. 41, p. e410301, 2017.
- HÄGGSTRÖM, C.; LINDROOS, O. Human, technology, organization and environment—a human factors perspective on performance in forest harvesting. **International Journal of Forest Engineering**, v. 27, n. 2, p. 67-78, 2016.
- HOLZLEITNER, F.; STAMPFER, K.; VISSER, R. Utilization rates and cost factors in timber harvesting based on long-term machine data. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 32, n. 2, p. 501-508, 2011.
- HOLZINGER, A.; SARANTI, A.; ANGERSCHMID, A.; RETZLAFF, C.O.; GRONAUER, A.; PEJAKOVIC, V.; STAMPFER, K. Digital transformation in smart farm and forest operations needs human-centered AI: challenges and future directions. **Sensors**, v. 22, n. 8, p. 3043, 2022.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2024.** Brasil. Brasília, 2024. Disponível em: [relatorio2024.pdf \(iba.org\).pdf](https://relatorio2024.pdf (iba.org).pdf) Acesso em: 04 out. 2024.

JACOBS, H.; COELHO, V.C.M.; DE OLIVEIRA, F.M. Jack-knife method applied in failure analysis of harvester and forwarder. **Revista Técnico Científica do CREA-PR.** p. 1-15. 2022.

LACERDA, L.C.; FIEDLER, N.C.; CHICHORRO, J.F.; DO CARMO, F.C.D.A.; MENDONÇA, A.R. Análise operacional da extração florestal mecanizada em módulos próprios e terceirizados. **Nativa**, v. 3, n. 3, p. 205-209, 2015.

LINHARES, M.; SETTE JÚNIOR, C.R.; CAMPOS, F.; YAMAJI, F. M. Eficiência e desempenho operacional de máquinas harvester e forwarder na colheita florestal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, p. 212-219, 2012.

LIU, P. F.; LI, X.; YANG, S.; ZU, M.Y.; LIU, P.; ZHANG, B; ZHENG, L.R.; ZHAO, H.; YANG, H.G. Ni2P (O)/Fe2P (O) interface can boost oxygen evolution electrocatalysis. **ACS Energy Letters**, v. 2, n. 10, p. 2257-2263, 2017.

LUNDBÄCK, M.; LINDROOS, O.; SERVIN, M. Rubber-tracked forwarders—Productivity and cost efficiency potentials. **Forests**, v. 15, n. 2, p. 284, 2024.

MACHADO, C.C.; LOPES, E.S. Análise da influência do comprimento de toras de eucalipto na produtividade e custo da colheita e transporte florestal. **Revista Cerne**, v. 6, n. 2, p. 124-129, 2000.

MÜLLER, F.; JAEGER, D.; HANEWINCKEL, M. Digitization in wood supply—A review on how Industry 4.0 will change the forest value chain. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 206-218, 2019.

PROTO, A.R.; MACRÌ, G.; VISSER, R.; HARRILL, H.; RUSSO, D.; ZIMBALATTI, G. Factors affecting forwarder productivity. **European Journal of Forest Research**, v. 137, p. 143-151, 2018.

RABELO, L. **Rede CAN: o que é e como funciona?** 2022. Disponível em: <https://blog.simplusbr.com/rede-can/>. Acesso em: 20 maio 2022.

RODRIGUES, C.K.; LOPES, E.D.S.; DE OLIVEIRA, D.; SAMPIETRO, J.A. Influência do volume das árvores no desempenho do processador florestal harvester em povoamento de eucalipto. **Biofix Scientific Journal**, 3(2), 237-242. 2018.

ROSS, D.F.; WESTON, F.S.; STEPHEN, W. **Introdução às tecnologias de gerenciamento da cadeia de suprimentos.** Crc Press, 2010.

SANTOS, D.W.F.S.; FERNANDES, H.C.; VALENTE, D.S.M.; GOMES, B.M.; DADALTO, J.P.; LEITE, E.S. Desempenho técnico e econômico de distintos modelos de forwarders. **Nativa**, v. 6, n. 3, p. 305-308, 2018.

SEIXAS, F.; BATISTA, J.L. Comparação técnica e econômica entre harvesters de pneus e com máquina base de esteiras. **Ciência Florestal**, v. 24, p. 185-191, 2014.

SCHETTINO, S.; MINETTE, L.J.; SOUZA, A.P. Correlação entre volumetria de florestas de eucalipto e produtividade e custos de máquinas de colheita de madeira. **Revista Árvore**. Viçosa, v. 39, n. 5, p. 935-942, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000500016>

SICHONANY, O.R.D.A.O.; SCHLOSSER, J.F.; MEDINA, R.D.; ROGGIA, I.B.; LÔBO, J. S.; SANTOS, F.B.D. Telemetria na transmissão de dados de desempenho de máquinas agrícolas utilizando tecnologias GSM/GPRS e ZigBee. **Ciência Rural**, v. 42, p. 1430-1433, 2012.

SILVA, A.A. Desenvolvimento do indicador de eficiência global de máquinas de colheita florestal (EGMF). 2017. Tese (Doutorado Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

SILVA, C.S.J.; OLIVEIRA, A.D.D.; COELHO JUNIOR, L.M.; SCOLFORO, J.R.S.; SOUZA, Á.N.D. Viabilidade econômica e rotação florestal de plantios de candeia (*Eremanthus erythropappus*), em condições de risco. **Cerne**, v. 20, n. 1, p. 113-122, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602014000100015>.

SILVA, E.N.D.; MACHADO, C.C.; MINETTE, L.J.; SOUZA, A.P.D.; FERNANDES, H.C.; SILVA, M.L.D.; JACOVINE, L.A. Avaliação técnica e econômica do corte mecanizado de *Pinus* sp. com harvester. **Revista Árvore**, 34, 745-753. 2010.

TIERNAN, D.; ZELEKE, G.; OWENDE, P.M.O.; KANALI, C.L.; LYONS, J.; WARD, S.M. Effect of working conditions on forwarder productivity in cut-to-length timber harvesting on sensitive forest sites in Ireland. **Biosystems engineering**, v. 87, n. 2, p. 167-177, 2004.

WANG, Z.; MENG, Y.; WANG, Y. Uncertainty and sensitivity analysis of core flow distribution optimization using Monte-Carlo method and Wilks' formula. **Progress in Nuclear Energy**, v. 186, p. 105828, 2025.

ABSTRACT

The Brazilian pulp and paper industry is experiencing an expansion cycle, with investments estimated at R\$ 105 billion by 2028, boosting the contribution of the forestry sector to the national GDP. This growth occurs in a context of significant increases in operational costs, influenced by the appreciation of the U.S. dollar, rising prices of inputs such as fertilizers, and the domestic macroeconomic scenario. Forest harvesting, which can account for up to 50% of the final cost of wood delivered to the mill, thus becomes a strategic stage for the sector's competitiveness. The present study evaluated the economic feasibility of the mechanized cut-to-length (CTL) harvesting system under two operational models: company-owned machinery and rented machinery (rental). The research was conducted in *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* stands in southern Bahia, at 6.5 years of age, with an average individual volume ranging from 0.16 to 0.33 m³. Technical data were collected from harvester and forwarder. Indicators such as mechanical availability, operational efficiency, productivity, and fuel consumption were analyzed. Harvester productivity ranged from 13.9 m³/h to 37.0 m³/h, while forwarder productivity varied between 49.2 m³/h and 66.8 m³/h. The cutting cost using company-owned machines was estimated at R\$ 20.64/m³, and forwarding at R\$ 12.25/m³, resulting in a total harvesting cost of R\$ 32.89/m³. In the rental model, the total cost increased to R\$ 39.10/m³, with equipment rental accounting for nearly 40% of the total cost. In both models, fuel and labor also represented a significant portion of operational expenses. For the company-owned machinery scenario, the initial investment amounted to R\$ 34.79 million, and the annual savings compared to the outsourced model reached R\$ 11.15 million. The project presented a positive net present value of R\$ 5.76 million, an internal rate of return of 20%, and a discounted payback period of 4.26 years. The results indicate that, even amid elevated cost levels and economic volatility, operating with company-owned machines is more competitive than renting machinery for mechanized forest harvesting. Productivity and operational indicators directly affect the cost per cubic meter, reinforcing the importance of maintenance management, operational planning, and the appropriate selection of the harvesting system. Although the owned-machinery model offers greater competitiveness, the rental model provides enhanced flexibility and lower initial capital requirements, which may be essential under adverse investment conditions.

Keywords: Costs; financial viability; internal rate of return (IRR).

RESUMO

A indústria brasileira de papel e celulose vive um ciclo de expansão, com investimentos previstos de R\$ 105 bilhões até 2028, impulsionando a participação do setor florestal no PIB. Esse crescimento ocorre em um ambiente de forte elevação de custos operacionais, influenciados pela valorização do dólar, encarecimento de insumos como fertilizantes e cenário macroeconômico interno. A colheita florestal, que pode representar até 50% do custo final da madeira entregue à fábrica, torna-se assim uma etapa estratégica para a competitividade do setor. O presente estudo avaliou a viabilidade econômica do sistema de colheita mecanizado *cut-to-length* (CTL) em dois modelos de operação: máquinas próprias e máquinas alugadas (*rental*). O trabalho foi realizado em povoamentos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* no sul da Bahia, com corte aos 6,5 anos, volume médio individual entre 0,16 e 0,33 m³. Os dados técnicos foram coletados de *harvester* e *forwarder* Ponsse Elephant King. Foram analisados indicadores como disponibilidade mecânica, eficiência operacional, produtividade, consumo de combustível. A produtividade do *harvester* variou de 13,9m³/h a 37,0 m³/h, e a do *forwarder*, entre 49,2m³/h e 66,8 m³/h. O custo do corte com máquinas próprias foi estimado em R\$ 20,64/m³ e o do baldeio em R\$ 12,25/m³, resultando em custo total de colheita de R\$ 32,89/m³. Na modalidade *rental*, o custo total subiu para R\$ 39,10/m³, sendo o aluguel responsável por quase 40% do custo total. Nos dois modelos, combustível e mão de obra também compõem parcela significativa da operação. No cenário com máquinas próprias, o investimento inicial foi de R\$ 34,79 milhões e a economia anual, em relação ao modelo terceirizado, foi de R\$ 11,15 milhões. O projeto apresentou valor presente líquido positivo de R\$ 5,76 milhões, taxa interna de retorno de 20% e *payback* descontado de 4,26 anos, confirmado a viabilidade econômica do investimento. Os resultados apontam que, mesmo em um contexto de custos elevados e volatilidade econômica, a operação com máquinas próprias é mais competitiva que o aluguel de máquinas na colheita florestal mecanizada. A produtividade e os indicadores operacionais influenciam diretamente o custo por metro cúbico, reforçando a importância da gestão de manutenção, do planejamento operacional e da escolha adequada do sistema de colheita. Embora o modelo próprio ofereça competitividade o modelo *rental* oferece maior flexibilidade e menor necessidade de capital inicial o que pode ser fundamental em condições adversas de investimento.

Palavras chave: Custos; taxa interna de retorno; viabilidade financeira.

CAPÍTULO II – MODELOS DE NEGÓCIO DE OPERAÇÕES DE COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA CUT-TO-LENGTH

1. INTRODUÇÃO

Em 2024 a indústria de papel e celulose anunciou investimentos de R\$ 105 bilhões até 2028, com abertura de novas fábricas, ampliação de plantas já existentes e obras de infraestrutura logística para escoamento da produção, entre outras ações (Brasil, 2024). Com esse volume de investimentos e a geração de empregos diretos e em oportunidades significativas no efeito renda potencializa ainda mais a participação do setor florestal no resultado do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil (Da Hora, 2017; IBA, 2025).

As políticas internas e externas têm influência direta no desempenho da economia de base florestal, nos últimos anos os custos das empresas florestais apresentaram elevação, influenciados principalmente pela valorização do dólar no período, que impactou diretamente os custos industriais e o preço dos fertilizantes, o custo médio teve alta de 24% em 2021 e 9% em 2022 e 6,3% em 2023 e 2024 (IBA, 2025). O índice ficou bem acima da inflação medida pelo Índice de Preços ao Consumidor Ampliado (IPCA), 4,05%, em 2024 (IBA, 2025). A alta inflação atrelada à desvalorização da moeda brasileira resulta em menor poder de compra de produtos internos e externos, dificultando a aquisição de bens de capital resultando em possíveis mudanças de modelos de operação (Silva, 2024).

O custo de madeira é composto por diversas operações (pesquisa e planejamento, produção de mudas, silvicultura, estradas, colheita e transporte florestal), dentre as operações citadas a colheita florestal pode representar até 50% do custo final da madeira colocada nas fábricas ou em centros consumidores (Santos et al., 2018). Para o sistema de corte CTL mecanizado, é comumente utilizado no Brasil o conjunto do *harvester* e *forwarder*. O *harvester* tem a finalidade de realizar o corte, desgalhamento, descascamento, traçamento e disposição da madeira em feixes nas medidas especificadas de acordo com a capacidade de dos veículos de transporte e das mesas de picagem das unidades fabris, já o *forwarder* tem a finalidade de realizar o baldeio da madeira disposta no talhão para ao lado da estrada, formando pilhas de madeira para o carregamento e transporte (Munis et al., 2022).

Em função do elevado capital demandado para a aquisição destas máquinas atrelado com as diferentes estratégias utilizadas pelas grandes companhias, podem ser utilizados diferentes modelos de negócio – modelo próprio, onde a empresa internaliza toda a operação (máquinas e mão de obra); modelo *rental* (modelo de aluguel de máquinas e operação com mão de obra própria); modelo terceirizado (operação completamente terceira, esse modelo pode ser

remunerado por custo fixo e variável ou somente variável utilizando o metro cúbico (m^3) colhido como unidade de medida para faturamento.

O objetivo do trabalho é realizar avaliação econômica de sistema de colheita mecanizado *CTL* em modelo de operação própria com aquisição de máquinas e operação própria com máquinas *rental*.

2. METODOLOGIA

2.1.1. Caracterização da área

O estudo foi realizado com máquinas desenvolvendo trabalhos em povoamentos com clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, plantado em espaçamento 3,5 x 2,6 metros, sendo o corte raso realizado aos 6,5 anos, quando as árvores apresentavam volume médio individual (VMI) entre 0,16 a 0,33 m^3 . Os povoamentos estavam localizados na região sul do Estado da Bahia (16°21'S e 39°32'W), a declividade variou de 2° a 26° sendo que a maior parte do período a operação foi realizada em áreas de relevo suave ondulado.

O clima predominante na região é do tipo Af, com verão chuvoso e inverno seco, segundo a classificação climática de Köpen, que apresenta precipitação anual de, aproximadamente, 1.200 mm, com temperatura média anual de 24,5°C. Os solos mais comuns são Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo (Embrapa, 2006).

2.1.2. Sistema de colheita

O sistema de colheita avaliado para aquisição dos dados técnicos para simulação da viabilidade financeira foi o de toras curtas (*cut-to-length*), com o eito de derrubada composto por quatro linhas de árvores. As atividades de derrubada, desgalhamento, descascamento e traçamento eram realizadas árvore a árvore. A queda das árvores era direcionada sobre as árvores em pé e as toras, com 6,5 m de comprimento, eram empilhadas em área já colhida perpendicularmente à linha de plantio. O *harvester* era da marca Ponsse modelo ergo, com média de 24.000 horas de operação, sendo coletados, os dados de apontamento durante 2.000 horas. O baldeio foi realizado com um *forwarder* marca Ponsse modelo Elephant King com médias de 20.000 horas, sendo coletados, os dados de apontamento durante 2.200 horas.

2.1.3. Disponibilidade mecânica

A disponibilidade mecânica (DM) foi obtida por meio do percentual do tempo que a máquina esteve apta a realizar o trabalho (Equação 1).

$$DM (\%) = \left(1 - \left(\frac{Hm}{Ht} \right) \right) * 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde: DM = Disponibilidade mecânica (%); Hm = tempo de paradas para manutenção e reparos (horas); Ht = tempo de trabalho programado (horas).

2.1.4. Eficiência operacional

A eficiência operacional foi definida como o percentual do tempo das atividades efetivas, englobando todas as que resultaram em produção (Equação 2).

$$EO (\%) = 1 - \left(\left(\frac{Ho}{Ht - Hm} \right) * 100 \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde: EO = Eficiência operacional (%); Ho = tempo de paradas operacionais (horas).

2.1.5. Taxa de utilização

A Taxa de utilização ou grau de utilização representa o percentual de tempo que o equipamento operou efetivamente, sendo calculado pela equação 3.

$$TU = DM \times EO \quad \text{Equação 3}$$

Onde: TU = Taxa de utilização (%); DM = disponibilidade mecânica (%); EO = Eficiência operacional (%).

2.1.6. Produtividade

A produtividade foi estimada em metros cúbicos de madeira processada por hora efetiva de trabalho ($m^3 \text{ he}^{-1}$), equação 4.

$$P = \frac{V}{He} \quad \text{Equação 4}$$

onde, P - produtividade ($m^3 \text{ he}^{-1}$); v – volume, em metros cúbicos de madeira (m^3); he – tempo efetivo de trabalho (horas).

O volume, em metros cúbicos de madeira processada, foi calculado multiplicando-se o número de árvores pelo volume médio obtido por meio de inventário.

Foi realizada a curva de produtividade relacionada a produção do *forwarder*.

2.1.7. Consumo de combustível

Consumo de combustível por m³ foi obtida de acordo a equação 5 semelhante a utilizada por Lopes (2007), em análise técnica e econômica de um sistema de colheita florestal.

$$EE = \frac{CSE}{P} \quad \text{Equação 5}$$

Onde, EE – Eficiência energética da máquina avaliada (litros/m³); CSE – Consumo específico efetivo; P - produtividade (m³ he⁻¹).

2.1.8. Mão de obra de manutenção

O cálculo de necessidade de mão de obra de manutenção mecânica para o conjunto de máquinas florestais foi calculado de acordo o total de horas das máquinas paradas. Como eficiência da mão de obra, foi considerado uma taxa de 80% de eficiência (espera de peças, aguardando mão de obra) sendo expressa pela equação 6 abaixo:

$$HDM = \text{Carga horária mensal} \times f(\%) \quad \text{Equação 6}$$

Onde: HDM – Horas disponíveis de mão de obra (horas); Carga horária mensal (horas) – f (%) – Fator de eficiência da manutenção.

Foi considerado o valor de 80% de eficiência e carga horária de 200 horas/mês, obtendo o seguinte resultado – 0,8*200 = 160 horas/mês por cada recurso.

Para o cálculo da quantidade de recursos necessários, utilizou-se a equação 7 abaixo:

$$NM = \frac{((1-E0)*Ht)*n}{HDM} \quad \text{Equação 7}$$

Onde: NM – Número de mecânico(as); EO – Eficiência Operacional (%); n – Número de máquinas totais; HDM – Horas disponíveis de mão de obra (horas).

2.1.9. Avaliação financeira

Os custos operacionais foram adaptados de acordo com a metodologia proposta pela *American Society of Agricultural Engineers* (ASAE, 2001) foram expressos em reais (BRL). Para conversão de custos de máquinas foi considerado como taxa de câmbio o preço da moeda estrangeira medido em unidades e frações da moeda nacional, que era de R\$ 5,51 com base na média entre 01/06/2024 e 04/10/2024 (Banco Central Do Brasil, 2024). Para estimar os custos operacionais foram considerados os custos fixos (telemetria, mão de obra, gestão e custo de aluguel para o modelo de locação) e variáveis (combustíveis, reparos e manutenção e

lubrificantes) foram evidenciados de forma separada os custos de depreciação e remuneração de capital.

O custo operacional foi obtido pelo somatório dos custos fixos e variáveis e o custo de colheita florestal por meio da divisão dos custos operacionais pela produtividade. Para as análises foi considerado uma vida útil de 5 anos, com um valor residual de 10%. Para o custo de combustível foi utilizado a média de janeiro a agosto de 2024 da Agência Nacional de Petróleo referente ao município de Três Lagoas – MS que foi de R\$6,00 para o litro do diesel S10.

2.2. Taxa Mínima de Atratividade

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) é considerada uma taxa de referência quando se trata de investimentos de viabilidade financeira. Pode ser entendida como a taxa mínima que um determinado investidor pretende receber em um investimento. A TMA é uma taxa que deve ser composta por uma taxa de juros básica (livre de risco) e uma taxa de juros que representa a compensação pelo risco que o investidor deseja correr para investir seu capital. Nesse estudo, foi utilizado a taxa SELIC média entre o período de 2020 e 2024 (Banco Central do Brasil, 2025) correspondente ao mês de março de cada período + 5% (prêmio pelo risco).

Tabela 1 – Taxa SELIC e prêmio de risco médio do período de 2020 a 2024

Item	SELIC (%)	Prêmio (%)	Total (%)
2020	3,65%	5%	8,65%
2021	2,75%	5%	7,75%
2022	11,75%	5%	16,75%
2023	13,75%	5%	18,75%
2024	10,75%	5%	15,75%
Média	8,53%	5%	13,53%

2.2.1. Valor Presente Líquido

O valor presente líquido (VPL) – Equação 8 considera explicitamente o valor do dinheiro no tempo. Consiste em técnicas que descontam os fluxos de caixa a uma taxa especificada. Essa taxa consiste no retorno mínimo que um projeto precisa proporcionar para manter inalterado o valor de mercado da empresa (taxa mínima de atratividade) (Gitman, 2002; Correio et al., 2021).

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{FCj}{(1+TMA)^j} \quad \text{Equação 8}$$

onde, FC - Fluxo de caixa; TMA - Taxa mínima de atratividade, j - período de cada fluxo de caixa.

2.2.2. Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR), (Equação 9), é a taxa de juros que equaliza o valor presente das receitas e despesas de um projeto de investimento. Em outras palavras, é a taxa onde o valor presente líquido é igual a zero. O projeto de investimento será considerado viável, se sua TIR for igual ou maior ao custo de oportunidade dos recursos para sua implantação. Assim, quanto maior a TIR do projeto, maior será sua atratividade.

A TIR é calculada com base na equação abaixo:

$$\sum_{j=0}^n \frac{FCj}{(1+I^*)^t} = 0 \quad \text{Equação 9}$$

onde, FC - Fluxo de caixa; j - período de cada fluxo de caixa; I* - taxa interna de retorno.

2.2.3. Payback

O *payback* é o tempo necessário para que a empresa retorne o investimento inicial realizado em um projeto, calculado a partir das entradas de caixa. No caso de uma série mista de entradas no fluxo de caixa, as entradas de caixa anuais precisam ser acumuladas até a recuperação do investimento inicial, o *payback* pode ser calculado com base na equação 10 abaixo.

$$PB = A + \frac{B}{C} \quad \text{Equação 10}$$

Onde, PB – *Payback* (anos); A é o último ano com um VPL acumulado negativo, B é o valor absoluto do VPL acumulado no final do ano A, e C é o fluxo de caixa anual total durante o ano após A.

2.2.4. Depreciação

Para o cálculo de depreciação foi considerado o método linear, onde é realizada a subtração do valor de aquisição inicial com relação ao valor final dividido pelo período avaliado de acordo com a equação 11 abaixo:

$$D = \frac{Vi - Vf}{T} \quad \text{Equação 11}$$

Onde: Vi – Custo de aquisição do parque avaliado – Vf – Valor residual do parque avaliado; T – Tempo avaliado (horas, meses ou anos).

2.2.5. Tecnologia e comunicação

Para o cálculo de custos de tecnologia e comunicação foram estabelecidos os critérios de soma dos equipamentos sendo: Rádio fixo para máquinas e veículos de apoio, sistema de telemetria e apontamento eletrônico, internet satelital para módulo de apoio e câmeras de monitoramento para máquinas e veículos.

2.2.6. Gestão e apoio operacional

A gestão e apoio operacional é fundamental para a continuidade e suporte com itens necessários de uma operação florestal. Para a composição de custos e viabilidade financeira, foram considerados os quantitativos de acordo a tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Quadro de mão de obra de gestão e apoio operacional dimensionado para o estudo

Cargo	Unitário
Coordenador de operações	1
Supervisor de operações	2
Motorista comboista	2
Motorista de caminhão Pipa	2
Assistente técnico	2
Auxiliar de serviços gerais	2
Técnico de segurança	1

2.2.7. Mão de obra operacional

A mão de obra operacional foi considerada como custo fixo devido ao modal avaliado ser 100% com a mão de obra própria e não terceirizada. O quantitativo de colaboradores foi considerando a escala 6X2, com 8 horas trabalhadas e atuando em três turnos com quatro letras com base na tabela 3 abaixo:

Tabela 3 – Modelo de distribuição de trabalho considerando a escala 6X2 em turnos de 8 horas

Escala de operação									
Turno	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo	Segunda	
1	A	A	A	A	A	A	D	D	
2	C	C	B	B	B	B	B	B	
3	D	D	D	D	C	C	C	C	
Descanso	B	B	C	C	D	D	A	A	

O total de colaboradores da operação do corte com *harvester* foi de 26 colaboradores, já considerando a substituição em período de férias, para a operação do baldeio com *forwarder*, o

quantitativo dimensionado foi de 13 colaboradores, já contabilizando a substituição em período de férias.

2.2.8. Remuneração de capital

A remuneração de capital foi calculada com base no valor investido do conjunto total de máquinas para funcionamento pleno da operação, aplicando-se ao investimento uma taxa de juros correspondente, nesse trabalho, utilizou-se uma taxa real de juros de 13,56% a.a. O período de avaliação para o cálculo da remuneração foi de 60 meses e foi considerado um residual de 10%.

2.2.9. Custo de produção

Os dados necessários para determinar custo operacional através do somatório dos custos fixos (depreciação, juros, telemetria, salário dos operadores, salário da equipe de apoio e gestão, custos de vigilância e aluguel de veículos) e variáveis (combustível, graxas e lubrificantes, óleo hidráulico, pneus, manutenção e reparos). O custo de produção foi calculado através da Equação 12, sendo expresso em R\$/m³.

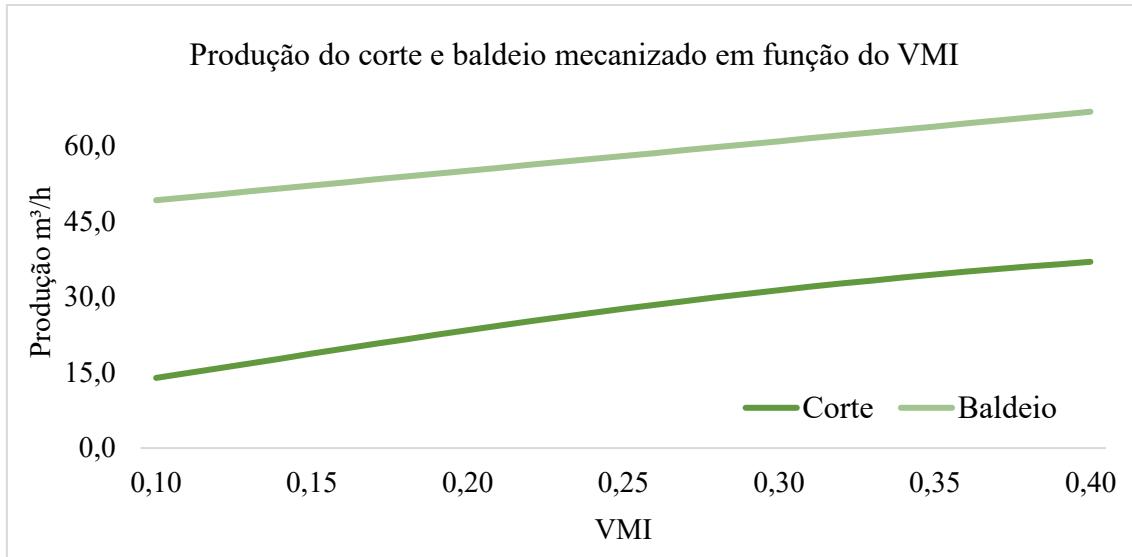
$$CP = \frac{CT}{P} \quad \text{Equação 12}$$

Onde, CP - custo de produção (R\$/m³); CT = custo operacional total (R\$); e P = produção (m³).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 demonstra a influência do VMI na produção em m³/hora das operações de corte e baldeio mecanizado. A produtividade efetiva variou de 13,9 a 37,0 m³/hora com a variação de 0,10 a 0,40 do VMI em m³, ou seja, a produtividade variou até 62% considerando os extremos. Este resultado condiz com Simoes e Fenner (2010), que avaliaram a influência do volume e declividade na produtividade da colheita florestal e observaram um valor entre 18,72 e 39,71 m³/hora, número semelhante ao encontrado no presente estudo.

Figura 1 - Produtividade do *harvester* e *forwarder* em função do volume médio individual (VMI)



De acordo Obi e Visser, (2017), o volume individual das árvores e o volume total de madeira disponível no povoamento a ser extraído, influenciam diretamente a produtividade do sistema de colheita florestal a ser adotada, pois, quanto maior for a quantidade de madeira em uma determinada área, maior será a produtividade, visto que, reduz a necessidade de deslocamentos durante as operações de corte, derrubada, processamento e traçamento para o *harvester*, e de carregamento para o preenchimento da caixa de carga para o FW.

Conforme a Figura 1, o baldeio, que compreende as operações de carregamento e descarregamento da madeira, é diretamente impactado em função do volume médio individual (VMI). Isso ocorre em virtude da variação do volume de madeira disposto no interior do talhão, e consequentemente, a diferença de distância entre os feixes de toras, considerando o VMI de 0,10 a 0,40. A produtividade do *forwarder* oscilou entre 49,2 e 66,8 m³/h, representando uma variação de 26%, com influência direta no custo operacional por metro cúbico (R\$/m³). Resultados semelhantes foram encontrados por Strandgard et al. (2017), que observaram redução no tempo de carregamento em áreas com maior volume de madeira por árvore, evidenciando comportamento inverso em florestas com menor VMI.

Os cálculos de viabilidade financeira foram realizados com base nos dados apresentados na Tabela 4, considerando uma produção total de 952.902 m³ de madeira utilizando seis máquinas de corte florestal. A análise incorporou a variação da disponibilidade mecânica (DM) ao longo do tempo, influenciada pelo avanço do horímetro das máquinas. De acordo com Machado (2014), a redução da DM está associada ao aumento da vida útil dos equipamentos, em virtude do desgaste progressivo de componentes mecânicos. Tal comportamento impacta diretamente a eficiência operacional e os custos de produção, reforçando a importância da

gestão proativa da manutenção e do planejamento da renovação da frota para garantir a sustentabilidade econômica da operação.

Tabela 4 – Premissas técnicas utilizadas para análise financeira referente ao corte com o *harvester*

Descrição/ano	2025	2026	2027	2028	2029
VMI – M ³	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Espaçamento - m ²	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Volume por hectare - M ³	288,89	288,89	288,89	288,89	288,89
Produtividade - M ³ /hora	26,64	26,64	26,64	26,64	26,64
Nº de máquinas	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
DM (%) - <i>Harvester</i>	92%	90%	88%	87%	85%
EO (%) - <i>Harvester</i>	75%	75%	75%	75%	75%
TU (%) - <i>Harvester</i>	69%	68%	66%	65%	64%
Horas operadas Dia	16,56	16,23	15,90	15,59	15,27
Horas operadas - Mês	496,80	486,86	477,13	467,58	458,23
Horas operadas Ano	5.961,60	5.842,37	5.725,52	5.611,01	5.498,79
Produtividade - M ³ /hora	26,64	26,64	26,64	26,64	26,64
Produção diária - M ³	441,16	432,34	423,69	415,21	406,91
Produção mensal - M ³	13.234	12.970	12.710	12.456	12.207
Produção Anual - M ³	158.817	155.640	152.527	149.477	146.487
Produção total - M³/ano	952.902	933.844	915.167	896.864	878.927

Onde: VMI – Volume médio individual; DM (%) – Disponibilidade mecânica; EO (%) – Eficiência Operacional; TU (%) – Taxa de utilização.

A vida útil projetada foi de 28 mil horas, valor similar ao encontrado por Linhares et al., (2012), adota vida útil em torno de 25 mil horas operadas. Foi considerado 5 anos como vida útil das máquinas, Rodrigues et al., (2024), identificou o 5º ano de operação como o ótimo para substituição da máquina, sendo esse o referencial amplamente utilizado por empresas florestais de grande porte. Esse marco reflete o equilíbrio entre custo de manutenção, eficiência operacional e valor residual da frota.

A análise de viabilidade financeira foi baseada nos dados da Tabela 5, considerando a capacidade de disponibilidade de feixes de madeira para serem baldeadas, portanto, nos anos em que a capacidade do *forwarder* for maior que a do *harvester*, será considerada a produção do HV na análise financeira, para o ano 1 a produção do FW é de 997.925 m³ de madeira com três máquinas de baldeio. Esse volume superou em 4,7% a capacidade teórica de corte anual com seis máquinas.

Referente ao *forwarder*, a produtividade média foi de 58,6 m³/hora, representando uma capacidade de 924 m³ por dia de operação, quando considerado o parque de máquinas, a

produtividade média foi cerca de 8,8% inferior ao registrado por Nunes (2020), que identificou produtividade média de 64,3 m³/hora em operações na região de Três Lagoas – MS, entre os fatores que explicam a divergência identificada, destaca-se o impacto do relevo nas condições de trabalho e na produtividade das máquinas.

A média mensal de horas operadas foi de 473,04 horas, resultado compatível com os achados de Linhares et al., (2012), que observaram médias de 480 horas/mês, mesmo em condições variáveis de distância de baldeio. Para a análise financeira foi considerada a produção do *harvester* como premissa financeira devido a disponibilidade de madeira esteirada para baldeio.

Tabela 5 – Premissas técnicas utilizadas para análise financeira referente ao baldeio com *forwarder*

Descrição/ano	2025	2026	2027	2028	2029
Nº de máquinas	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
DM (%) - Forwarder	90%	88%	86%	82%	78%
EO (%) - Forwarder	73%	73%	73%	73%	73%
TU (%) - Forwarder	66%	64%	63%	60%	57%
Horas operadas Dia	15,77	15,45	15,14	14,39	13,67
Horas operadas mês	473,04	463,58	454,31	431,59	410,01
Horas operadas Ano	5.676,48	5.562,95	5.451,69	5.179,11	4.920,15
Produtividade - M ³ /hora	58,60	58,60	58,60	58,60	58,60
Produção diária - M ³	924,00	905,52	887,41	843,04	800,89
Produção mensal - M ³	27.720,14	27.165,74	26.622,43	25.291,30	24.026,74
Produção Anual - M ³	332.641,73	325.988,89	319.469,12	303.495,66	288.320,88
Produção total - M³/ano	997.925	977.967	958.407	910.487	864.963

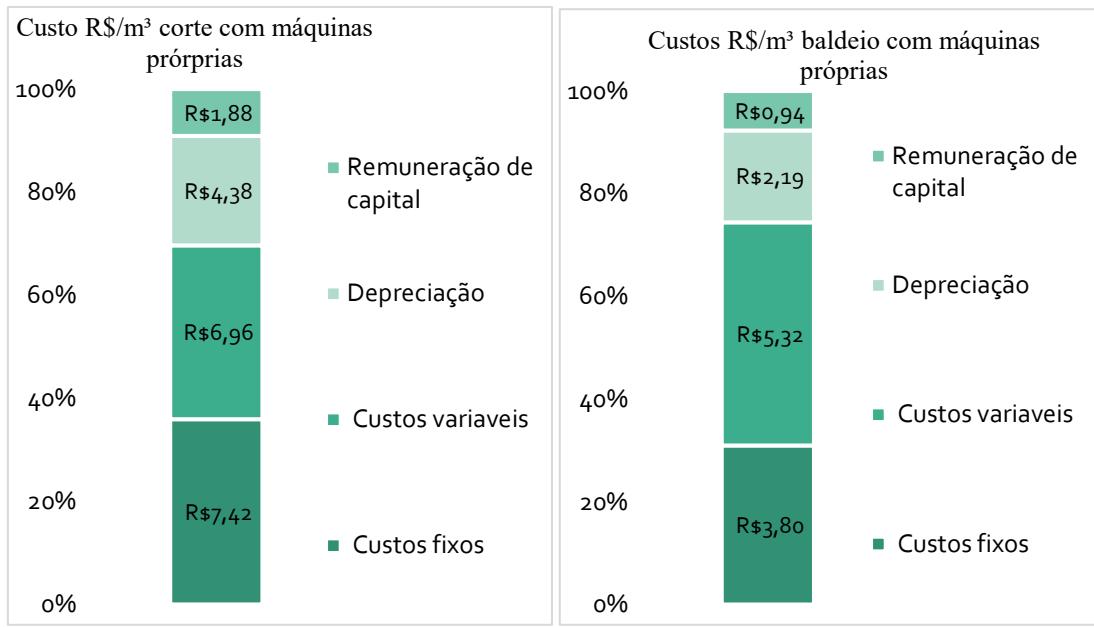
DM (%) – Disponibilidade mecânica; EO (%) – Eficiência Operacional; TU (%) – Taxa de utilização.

Conforme os dados apresentados na Figura 2, o custo médio do corte florestal com *harvester* foi de R\$ 20,64/m³. Em comparação, Louis et al., (2022) reportaram um custo médio de US\$ 3,12/m³ para a América do Sul. Considerando a taxa cambial média de R\$ 5,51/US\$, o custo convertido seria de R\$ 17,19/m³, valor inferior ao encontrado neste estudo. Essa diferença pode ser atribuída à inflação acumulada entre os períodos de análise (2022 a 2024), com taxa SELIC média de 12,08%, impactando diretamente os custos operacionais.

Leite et al., (2014), ao analisar áreas declivosas, identificou um custo de US\$ 145,29/h. Com base em uma produtividade de 31,5 m³/h, esse valor corresponde a R\$ 25,40/m³, após conversão cambial. A principal justificativa para a diferença entre os estudos é a jornada diária

de trabalho: enquanto Leite et al., (2014) considerou dois turnos com 16 horas por dia, o presente estudo adota um regime de 24 horas/dia, diluindo os custos fixos, refletindo na redução do custo por metro cúbico.

Figura 2 - Custos de corte mecanizado com *harvester* (esquerda) e custos com baldeio mecanizado com *forwarder* (direita)



Observando o setor de colheita florestal a média global do custo da colheita em R\$/m³ é de 19,98 US\$ ou 110,08 R\$ (Louis, et al., 2022), valor superior ao encontrado no estudo, demonstrando a competitividade e atratividade do setor florestal brasileiro. Realizando um detalhamento dos custos encontrados para o corte, foi observado que 36% é custo fixo, os custos com depreciação e remuneração de capital representam 30% do da composição total, valor próximo ao encontrado por Silva et al., (2010) avaliando *harvester* em colheita de pinus.

O custo do baldeio com *forwarder* foi de 12,25 R\$/m³, Camargo (2013), observou valor médio de 12,51 R\$/m³ com produção de 41,63 m³/hora, os valores encontrados são similares em termos de custo unitário, mas quando considerado a produtividade, há uma diferença de 16,97 m³/hora, 58,6m³/hora versus 41,6 m³/hora, esse aumento de produtividade permitiu que os custos de colheita permanecessem equilibrados, visto que quando comparado os dois trabalhos as máquinas e equipamentos sofreram reajuste de 77%. Santos, et al., (2016), avaliando baldeio com FW observou custo de produção médio de 10,88 R\$/m³, considerando a inflação e correção de valor entre os períodos avaliados, o valor corrigido seria de 16,22 R\$/m³, valor superior ao encontrado no presente estudo.

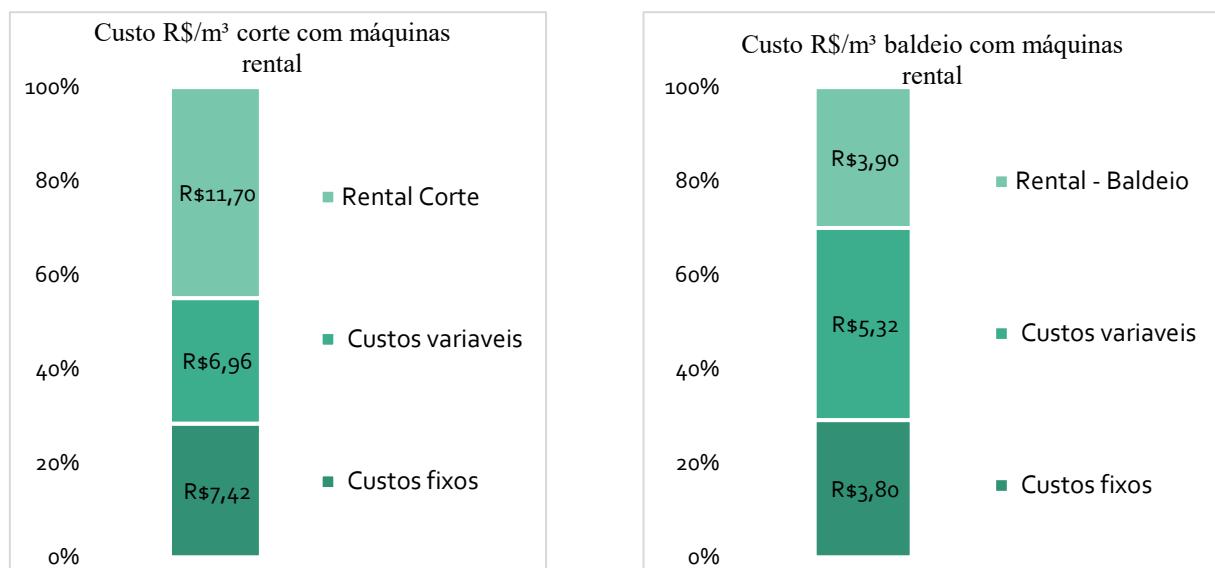
O custo fixo, remuneração de capital e depreciação representam 57% da composição do custo de baldeio, valor superior ao encontrado por Simões e Fenner (2010) que identificaram

que os custos fixos representavam 36% da formação total. A depreciação representa 18% do custo do baldeio, valor menor que o do corte que foi de 21%, os valores da depreciação demonstram o impacto do custo das máquinas na formação do CP. O comportamento do custo de produção é altamente dependente dos indicadores de performance de disponibilidade mecânica, eficiência operacional e produtividade, sendo que o aumento das horas efetivas de trabalho e da produtividade da máquina resultam na redução do custo de baldeio.

De acordo com os gráficos na Figura 3, o custo do corte com máquinas *rental* é de 26,08 R\$/m³, representando um valor 26% maior que a modalidade de aquisição de máquinas, o custo de aluguel representa 44% da composição total do custo, em comparação, a remuneração de capital e a depreciação representam 30% do CP para a atividade de corte com máquinas próprias.

Yiridoe, et al., (2023), menciona que os custos de remuneração de capital e depreciação podem chegar a representar até 40% da composição do CP, sendo que esse valor é variável em função da máquina definida, demanda de mercado, taxa de juros aplicada e valor da moeda.

Figura 3 - Custos de corte mecanizado com *harvester* na modalidade *rental* (esquerda) e custos com baldeio mecanizado com *forwarder* na modalidade *rental* (direita)

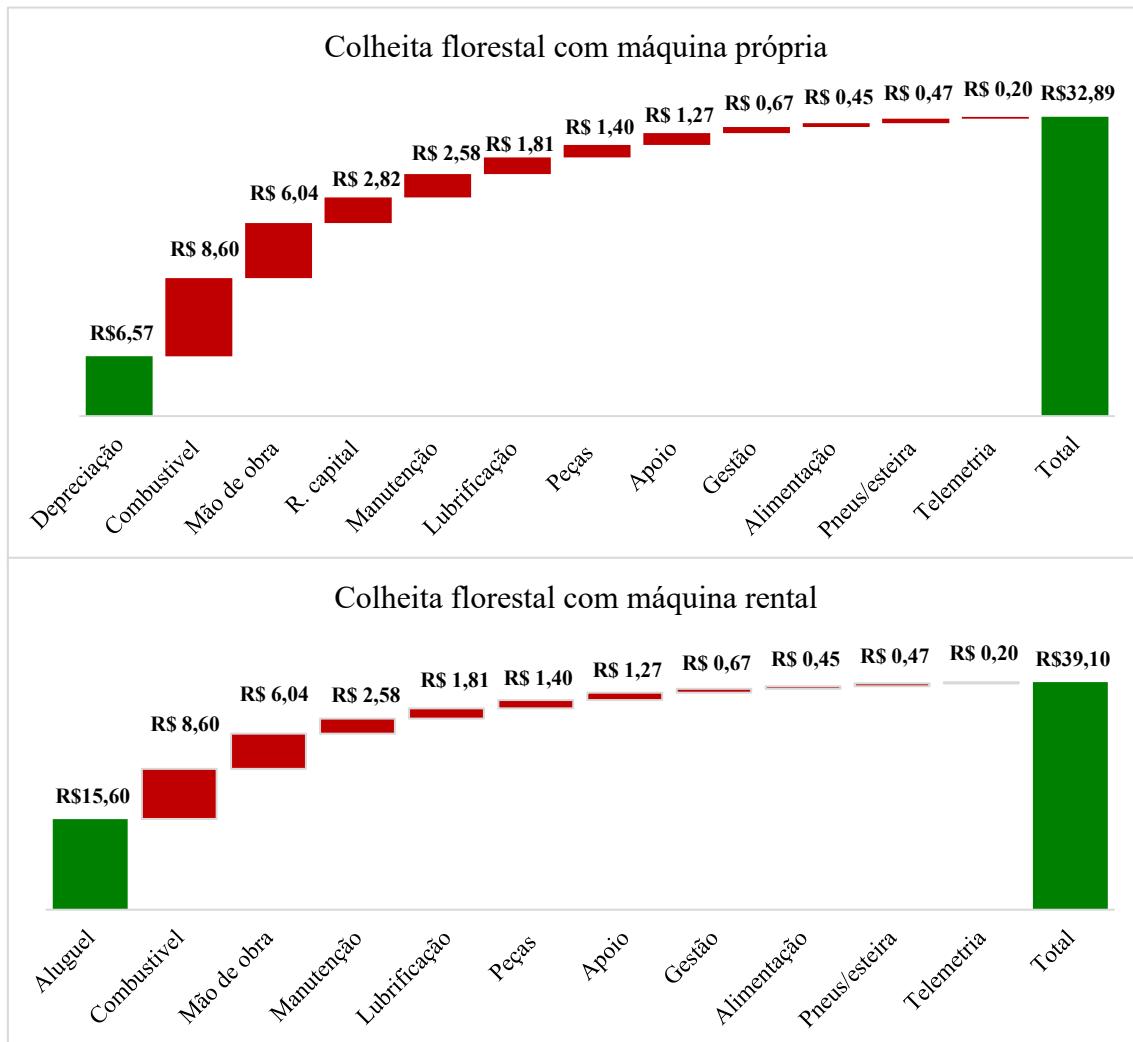


O custo total do baldeio foi estimado em R\$ 13,02/m³, valor 6% superior ao custo da operação com máquinas próprias. Na modalidade de aluguel, o item custo de locação representou 30% do custo de produção (CP) do baldeio, evidenciando seu impacto significativo na composição total. A depreciação e remuneração de capital representam 25,5% do CP para as máquinas destacando o peso dos custos fixos no modelo de propriedade.

As máquinas alugadas de baldeio possuem CP 14% inferior em relação ao corte com máquinas alugadas, isso se deve a produção das máquinas que auxilia na diluição de custo, sendo 26,6 m³/hora para o corte e 58,6 m³/hora para o baldeio.

A Figura 4 apresenta a formação dos custos da colheita florestal para os modelos avaliados, destacando-se que, na modalidade *rental*, o aluguel das máquinas representa 39% do custo total da operação. Em seguida, os itens combustíveis (22%) e mão de obra (15,4%) compõem, junto ao aluguel, 77% do custo total da colheita. Os dados são consistentes com Leite (2012), que, ao analisar um sistema de colheita de toras curtas, identificou o combustível representando 20% do custo total, valor próximo ao do presente estudo. No entanto, a participação da mão de obra naquele estudo foi de 6,6%, valor inferior aos 15,4% encontrados em 2024. Essa diferença pode ser atribuída à inflação acumulada e à valorização do salário mínimo brasileiro. Entre 2012 e 2024, o salário mínimo passou de R\$ 612 para R\$ 1.412, o que representa um aumento de 130,7% no valor nominal e impacta diretamente os custos operacionais atrelados à força de trabalho.

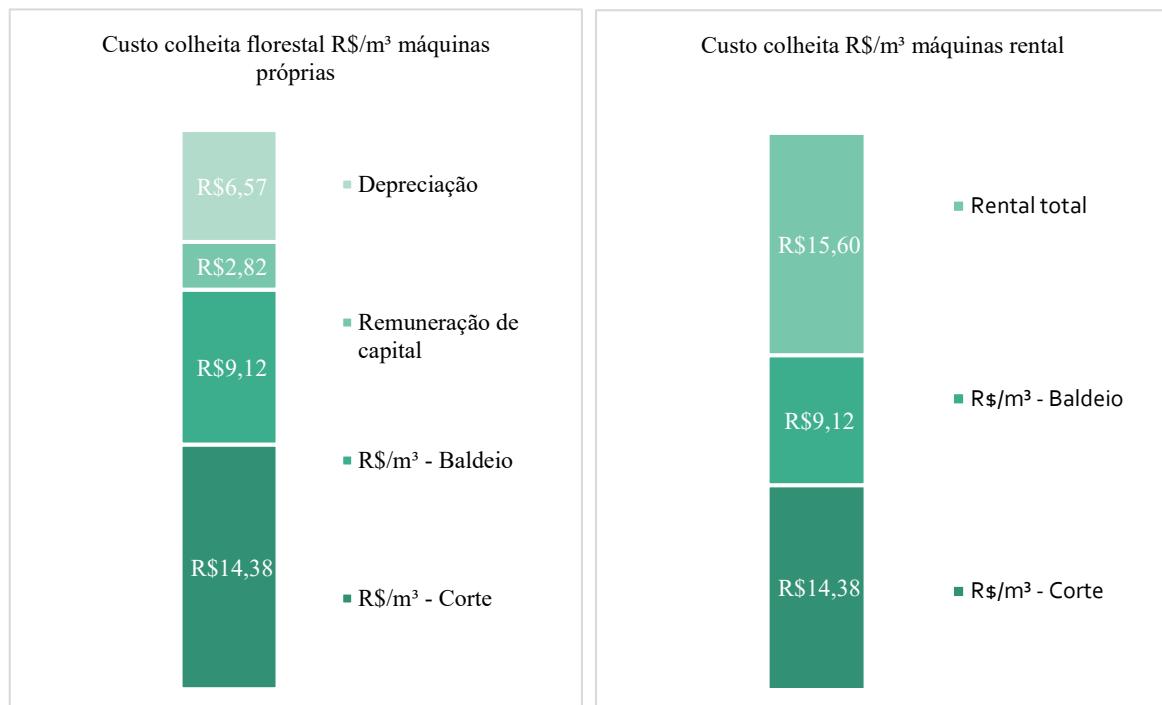
Figura 4 - Custos da colheita florestal R\$/m³ na modalidade de máquinas própria e *rental*



No cenário com máquinas próprias, os custos de depreciação e remuneração de capital representaram 28,5% do custo total da colheita, valor alinhado aos estudos de referência na área. Leite (2012) identificou participação de 21,8%, enquanto Simões et al. (2014) reportaram 27% ao avaliarem operações mecanizadas de colheita florestal. A remuneração média de capital adotada foi de 8,6% ao ano, valor próximo ao de Nascimento et al. (2011), que encontraram um valor médio de 10% em modelos de colheita com *feller buncher* e *skidder*.

O custo da colheita florestal com máquinas próprias é de 32,89 R\$/m³ (Figura 5), sendo que o custo de depreciação e remuneração de capital representam 28,5% da composição total. Para as máquinas *rental*, o custo total da operação é de 39,1 R\$/m³, valor 18,8% superior ao custo com máquinas próprias. Nesse cenário, o custo de aluguel das máquinas representa 39,8% da composição total. A diferença em R\$/m³ é de 6,21, evidencia que, considerando apenas as tarifas, a modalidade própria ainda é viável economicamente quando comparada ao modelo de locação. Eliasson, et al., 2021, avaliando colheita florestal com máquinas Ponnse, chegou a um custo de 75,4 R\$/m³, valor justificado devido ao sortimento de espécies (spruce, pinus e decíduas).

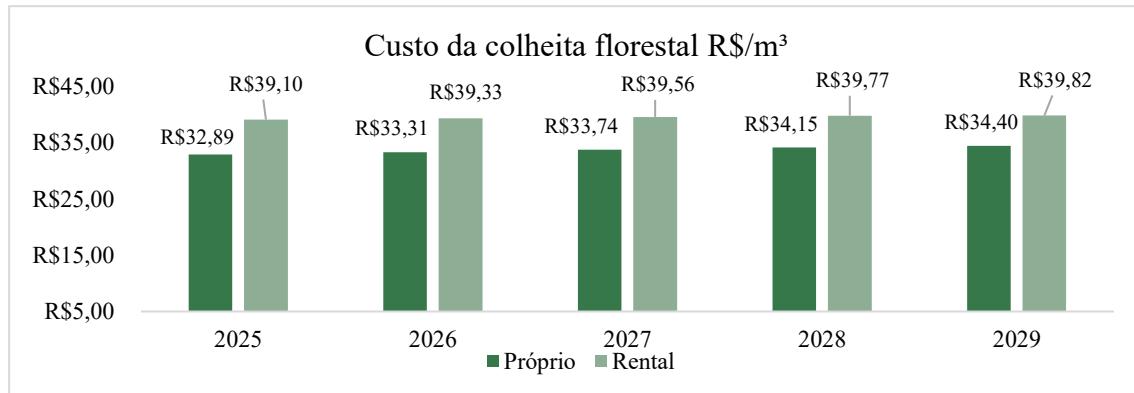
Figura 5. Custos da colheita florestal R\$/m³ na modalidade de máquinas próprias (esquerda) e máquinas *rental* (direita)



De acordo com a Figura 6, observa-se uma flutuação ao longo dos anos nos custos de colheita florestal. O impacto é mais acentuado nas máquinas próprias em relação as alugadas, dado que os custos de depreciação e remuneração de capital são proporcionalmente

relacionados às horas produzidas. A diferença no ano 0 é de 6,21 R\$/m³, e reduz no ano 5 para 5,42 R\$/m³, resultando na diminuição de 0,79 R\$/m³, o que representa 3,13% da diferença total. Tal comportamento evidencia a diminuição da vantagem econômica relativa das máquinas próprias ao longo do tempo, ainda que o modelo se mantenha mais competitivo.

Figura 6 - Custos da colheita florestal R\$/m³ nos cenários avaliados entre 2025 – 2029



Com base no fluxo de caixa da Tabela 6, o modelo de aquisição de máquinas apresenta uma economia anual de R\$ 11,15 MBRL/ano, desconsiderando o investimento inicial em CAPEX. Ao incluir o investimento, o projeto mantém-se economicamente viável, com um Valor Presente Líquido (VPL) positivo de R\$ 5,76 MBRL, indicando potencial de retorno financeiro ao longo do ciclo de vida analisado. Esse resultado é reforçado pela Taxa Interna de Retorno (TIR) de 20%, superior a Taxa Mínima de Atratividade de 13,53%, o que valida a atratividade do investimento sob a ótica financeira.

Tabela 6 – Fluxo de caixa do investimento em máquinas versus o modelo de máquinas *rental*

Descrição	0	1	2	3	4	5
Custo próprio (MBRL)		R\$ 22.395	R\$ 22.395	R\$ 22.395	R\$ 22.395	R\$ 22.395
Custo máq. terceiras (MBRL)		R\$ 33.543	R\$ 33.543	R\$ 33.543	R\$ 33.543	R\$ 33.543
Diferença (MBRL)		R\$ 11.148	R\$ 11.148	R\$ 11.148	R\$ 11.148	R\$ 11.148
Investimento (MBRL)	-34.790					
Residual (MBRL)						3.479
Fluxo de Caixa (MBRL)	-34.790	11.148	11.148	11.148	11.148	14.627
VPL (MBRL)	5.762,90					
TIR (%)	20%					
PAYBACK (anos)	4,26					
Débito (MBRL)		-R\$ 34.790	-R\$ 24.971	-R\$ 16.321	-R\$ 8.703	-R\$ 1.992
VP (MBRL)		R\$ 9.819	R\$ 8.649	R\$ 7.618	R\$ 6.710	R\$ 7.755
Saldo		-R\$ 24.971	-R\$ 16.321	-R\$ 8.703	-R\$ 1.992	R\$ 5.763

Onde: MBRL - milhões de Reais; VPL – Valor Presente Líquido; TIR (%) – Taxa Interna de Retorno; VP – Valor Presente.

De acordo com Zhu et al., (2017), projetos devem ser aceitos quando a Taxa Interna de Retorno (TIR) excede a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), rejeitados quando a TIR for inferior, e considerados indiferentes quando ambas forem equivalentes. No presente estudo, a TIR de 20% supera a TMA de 13,53%, calculada com base na taxa SELIC acrescida de um prêmio de risco de 5%, o que confirma a viabilidade financeira do projeto. Com base no fluxo de caixa analisado, verifica-se que a patrimonialização de máquinas e equipamentos é economicamente viável. O *payback* descontado foi de 4,26 anos, indicando que o investimento será recuperado a partir do 4º ano de operação. Resultado semelhante foi reportado por Santos et al., (2016), que identificaram retorno no 4º ano ao avaliarem a viabilidade de sistemas mecanizados de colheita florestal.

A opção pelo modelo de locação de máquinas e equipamentos é viável mediante a indisponibilidade de investimento inicial, ou seja, quando a empresa não possui caixa para a aquisição e patrimonialização do bem. A implantação de novas fábricas e a maior disponibilidade de celulose no mercado pode causar redução de preços e impactar a disponibilidade de investimento. Heimann et al., (2023), avaliaram a tendência de exportação de celulose para os Estados Unidos nos últimos 20 anos e observaram uma grande variação do valor de exportação dessa commodity, e concluiu que essa instabilidade de preços dificulta a definição de estratégias para as empresas do segmento.

Existe alguns fatores que podem influenciar na dinâmica de tomada de decisão das empresas florestais em relação ao modelo de negócio a ser adotado: (i) aumento crescente de escala, com aumento da intensidade de capital; (ii) movimento latente de fusões e aquisições e redução no número de empresas; (iii) acirramento da concorrência; (iv) elevado poder de barganha de clientes e fornecedores (produtores de papel e de químicos, por exemplo); (v) canais de distribuição e logística globais (mercado consumidor distante do mercado produtor); e vi) comportamento cíclico de preços (Biazus et al., 2010).

Yoshida e Kohroki (2019) demonstraram que, no Japão, o modelo rental de máquinas florestais tem impulsionado significativamente o setor, sobretudo entre pequenos produtores com restrições de capital para investimento. No Brasil, embora o aluguel de máquinas seja amplamente consolidado em diversos segmentos industriais, sua adoção na colheita florestal ainda é recente. Essa limitação se deve às especificidades operacionais dos equipamentos florestais, que exigem compatibilidade com características de sítio, declividade e modelo de colheita. Contudo, observa-se uma tendência de entrada de grandes players do setor de locação

no mercado florestal (abrangendo colheita e silvicultura) o que tende a aumentar a oferta e competitividade, tornando os custos mais atrativos para grandes empresas do setor.

4. CONCLUSÃO

O cenário com máquinas próprias apresentou viabilidade financeira comparado com o modelo *rental*;

A TIR de 20% demonstra que mesmo com a alta taxa de atratividade 13,3%, ainda é possível obter retornos financeiros com a primarização da atividade;

A inflação acumulada no Brasil para o ano de 2025 – 15%, pode causar inviabilidade financeira de projetos e até a sustentabilidade de algumas operações no mercado interno;

A inflação dos últimos anos no Brasil aumentou consideravelmente o custo de produção quando comparado internamente, no entanto, ainda quando comparado com os custos de outros países, o Brasil segue competitivo no setor, demonstrando resiliência e versatilidade.

A recente expansão de fábricas no Brasil, aliada às variáveis econômicas relacionadas à balança comercial exerce impacto direto sobre o preço da celulose, principal produto do setor florestal. Alterações políticas e variações inflacionárias têm potencial para modificar significativamente as estratégias empresariais quanto à decisão entre internalização, terceirização ou locação de máquinas e equipamentos.

5. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, Rio de Janeiro. ANP, Série histórica do levantamento de preços. 2024. Disponível em: [Série histórica do levantamento de preços — Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis \(www.gov.br\)](https://www.gov.br/seriehistorica/levantamento-de-precos-agencia-nacional-petroleo-gas-natural-biocombustiveis). Acesso em: 04 de outubro de 2024.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. ASAE EP496.2: Agricultural machinery management. St. Joseph: ASAE, 2001.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Conjunto de dados “Dólar comercial (venda e compra) – cotações diárias (USD)”. Portal Dados Abertos. Disponível em: <https://dadosabertos.bcb.gov.br/dataset/dolar-americano-usd-todos-os-boletins-diarios>. Acesso em: 18 nov. 2024.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Taxas de juros básicas – Histórico 2025. 2025. Disponível em: [<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 18 mai. 2025

BIAZUS, A.; HORA, A.B.; LEITE, B.G.P. **Panorama de mercado: celulose.** BNDES Setorial, n. 32, set. 2010, p. 311-370, 2010.

BRASIL, Indústria de papel e celulose anuncia investimentos de R\$ 105 bilhões. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços**, Brasília, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/agosto/industria-de-papel-e-celulose-anuncia-investimentos-de-r-105-bilhoes>>. Acesso em: 7 set. 2024.

CAMARGO JÚNIOR, R.R.D. Análise de sistemas de colheita de povoamentos de eucalipto com baixa produtividade. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP

CORREIO, U.B.S.; CORREIO, R.D.; SANTOS, F.D.A.; SECURATO, J.R. The Content of Disciplines about Taxation in the Course of Accounting Science in Brazil: A Study on the Approach of Simples Nacional and Presumed Profit. **Revista Razão Contábil & Finanças**—São Paulo—SP, v. 12, n. 2, 2021.

DA HORA, A.B. Panoramas Setoriais 2030: Papel e Celulose. In Panoramas setoriais 2030: Desafios e Oportunidades para o Brasil; **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**: Rio de Janeiro, Brasil, 2017; pp. 79–91. ISBN 9788587545633

ELIASSON, L.; GRÖNLUND, Ö.; LUNDSTRÖM, H.; SONESSON, J. Harvester and forwarder productivity and net revenues in patch cutting. **International Journal of Forest Engineering**, v. 32, n. 1, p. 3-10, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa do Solo. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: **Embrapa**, 2006

GITMAN, L.J. Princípios de Administração Financeira 8^aed. São Paulo: Harbra, 2002

HEIMANN, J.P.; CUNHA, L.H.R.; HOEFLICH, V.A.; SILVA, J.C.L.S.; SANTOS, A.J. Analysis of seasonal and cyclical variation of the Brazilian cellulose price in the USA market for the period of 1997 to 2018. **Floresta**, v. 53, n. 2, 2023.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2025**. Brasil. Brasília, 2024. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf> Acesso em: 20 out. 2025.

LEITE, E.S. **Modelagem técnica e econômica de um sistema de colheita florestal mecanizada de toras curtas**. 2012. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

LEITE, E.D.S.; MINETTE, L.J.; FERNANDES, H.C.; SOUZA, A.P.D.; AMARAL, E.J.D.; LACERDA, E.D.G. Desempenho do harvester na colheita de eucalipto em diferentes espaçamentos e declividades. **Revista Árvore**, v. 38, 2014.

LINHARES, M.; SETTE JÚNIOR, C.R.; CAMPOS, F.; YAMAJI, F.M. Eficiência e desempenho operacional de máquinas harvester e forwarder na colheita florestal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, p. 212-219, 2012.

LOPES, S.E. **Análise técnica e econômica de um sistema de colheita florestal**. 2007. 124p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

LOUIS, L.T.; KIZHA, A.R.; DAIGNEAULT, A.; HAN, H.S.; WEISKITTEL, A. Factors affecting operational cost and productivity of ground-based timber harvesting machines: a meta-analysis. **Current Forestry Reports**, v. 8, n. 1, p. 38-54, 2022.

MACHADO, C.C.; SILVA, E.N.; PEREIRA, R.S.; CASTRO, G.P. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C. C (Editor.). **Colheita Florestal**. 3ed. Viçosa-MG: UFV, 2014. P. 15-45.

MUNIS, R.A.; ALMEIDA, R.O.; CAMARGO, D.A.; DA SILVA, R.B.G.; WOJCIECHOWSKI, J.; SIMÕES, D. Machine Learning Methods to Estimate Productivity of Harvesters: Mechanized Timber Harvesting in Brazil. **Forests** 2022, 13, 1068. <https://doi.org/10.3390/f13071068>

NASCIMENTO, A.C.; LEITE, Â.M.P.; SOARES, T.S.; FREITAS, L.C.D. Avaliação técnica e econômica da colheita florestal com feller-buncher. **Cerne**, v. 17, p. 9-15, 2011.

NUNES, I.B. **Modelagem e simulação da produtividade do forwarder em povoamentos de eucalipto**. 2020. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) –Universidade Estadual do Centro-Oeste. Iraty, 2020.

OBI, O.F.; VISSER, R. Influence of the operating environment on the technical efficiency of forest harvesting operations. **International Journal of Forest Engineering**, v. 28, n. 3, p. 140-147, 2017.

RODRIGUES, T.A.; SILVA, M.L.D.; FERNANDES, H.C.; LEITE, E.D.S.; SCHETTINI, B.L.S., SILVA, A.A.; MINETTE, L.J. The optimal replacement time for harvesters: An economic analysis. **Revista Árvore**, v. 48, p. e4812, 2024.

SANTOS, D.W.F.N.; VALENTE, D.S.M.; FERNANDES, H.C.; FORASTIERE, P.R.; SILVA, R.M.F. Análise Técnica e Econômica do Harvester Operando em dois Subsistemas de Colheita de Madeira. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 24, n. 6, p. 484-490, 2016.

SANTOS, D.W.F.N.; FERNANDES, H.C.; VALENTE, D.S.M.; LEITE, E.D.S. Análise técnica e econômica de dois subsistemas de colheita de madeira de toras curtas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, PE: UFRPE. 2018.

SANTOS, L.N.D.; FERNADES, H.C.; SILVA, M.L.D.; TEIXEIRA, M.M.; SOUZA, A.P.D. Avaliação de custos da operação de extração da madeira com forwarder. **Cerne**, v. 22, n. 1, p. 27-34, 2016.

SILVA, E.N.D.; MACHADO, C.C.; MINETTE, L.J.; SOUZA, A.P.D.; FERNANDES, H.C.; SILVA, M.L.D.; JACOVINE, L.A. Avaliação técnica e econômica do corte mecanizado de Pinus sp. com harvester. **Revista Árvore**, v. 34, p. 745-753, 2010.

SILVA, N. Medidas de núcleo de inflação para o Brasil baseadas no método wavelets. **Revista Brasileira de Economia**, v. 78, p. e042024, 2024.

SIMOES, D.; FENNER, P.T. Influência do relevo na produtividade e custos do harvester. **Scientia Forestalis**, p. 107-114, 2010.

SIMÕES, D.; FENNER, P.T.; ESPERANCINI, M.S.T. Produtividade e custos do feller-buncher e processador florestal em povoamento de eucalipto de primeiro corte. **Ciência florestal**, v. 24, p. 621-631, 2014.

STRANDGARD, M.; MITCHELL, R.; ACUNA, M. Time consumption and productivity of a forwarder operating on a slope in a cut-to-length harvest system in a *Pinus radiata* D. Don pine plantation. **Journal of Forest Science**, v. 63, n. 7, p. 324-330, 2017.

YIRIDOE, E.K.; KHAN, A.H.; ESAU, T.J.; KOTO, P.S.; ZAMAN, Q.U. Effect of Mechanical Harvesting Technology Type and Harvester Ownership and Services Acquisition Methods on Profitability of Wild Blueberry Production. **International Journal of Fruit Science**, v. 23, n. 1, p. 229-245, 2023.

YOSHIDA, M; KOHROKI, K. Forestry machine sharing system in self-employed forestry. **Journal of Forest Research**, v. 24, n. 2, p. 71-76, 2019.

ZHU, Y.; ZHAI, R.; YANG, Y.; REYES-BELMONTE, M. A. Techno-economic analysis of solar tower aided coal-fired power generation system. **Energies**, v. 10, n. 9, p. 1392, 2017.