

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Avaliação integrada da operação do forwarder: uma abordagem baseada na  
distância média de baldeio e na eficiência da gestão operacional**

Julia Hussar Duarte Resende  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**JULIA HUSSAR DUARTE RESENDE**

**Avaliação integrada da operação do forwarder: uma abordagem baseada na distância média de baldeio e na eficiência da gestão operacional**

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

Orientador: Bruno Leao Said Schettini

Coorientador: Arthur Araujo Silva

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

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

T

R433a  
2025  
Resende, Júlia Hussar Duarte, 1998-  
Avaliação integrada da operação do forwarder: uma  
abordagem baseada na distância média de baldeio e na eficiência  
da gestão operacional / Júlia Hussar Duarte Resende. – Viçosa,  
MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (75 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Bruno Leao Said Schettini.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.480>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Máquinas agrícolas. 2. Transportadores de carga.  
3. Eucalipto - Colheita - Modelos matemáticos. 4. Cultivos  
agrícolas - Rendimento. I. Schettini, Bruno Leao Said, 1990-.  
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal.  
III. Título.

GFDC adapt. CDD 634.9364

**JULIA HUSSAR DUARTE RESENDE**

**Avaliação integrada da operação do forwarder: uma abordagem baseada na distância média de baldeio e na eficiência da gestão operacional**

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

APROVADA: 2 de abril de 2025.

Assentimento:

---

Julia Hussar Duarte Resende  
Autora

---

Bruno Leao Said Schettini  
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 13/10/2025 às 19:44:41 e pelo orientador em 12/11/2025 às 14:35:48. 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 **17UV.ZE36.KOIE** e clique no botão 'Validar documento'.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me proporcionar capacidade para a realização de mais uma etapa em minha vida e por colocar pessoas tão especiais no caminho.

Agradeço a minha família, que sempre esteve do meu lado em todos os momentos. Agradeço aos meus pais, Daniel e Ana Cláudia, por me proporcionarem o melhor, por todo amor, carinho e confiança! Agradeço ao meu irmão, tias, tios, primas e primos. À minhas avós que sempre confiaram e rezaram por mim, e meus avôs que agora, mesmo de longe, sei que estão felizes!

Ao Nicolas, que esteve ao meu lado no dia a dia, por ser meu apoio e suporte em tantos momentos, obrigada pelo amor, carinho e companheirismo.

Agradeço aos meus amigos da UFV, que tornaram esse caminho muito mais leve e divertido, estando sempre juntos nos momentos de festejar e de estudar.

Agradeço aos meus professores, e em especial meu orientador, Bruno, por toda calma, auxílio, paciência, atenção.

Sem vocês isso não seria possível! Essa conquista é nossa!!

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

RESENDE, Julia Hussar Duarte, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2025. **Avaliação integrada da operação do forwarder: uma abordagem baseada na distância média de baldeio e na eficiência da gestão operacional.** Orientador: Bruno Leao Said Schettini. Coorientador: Arthur Araujo Silva.

A colheita florestal representa um dos principais custos na produção madeireira, sendo extração florestal uma etapa determinante no desempenho e rentabilidade da operação. No sistema de colheita CTL (Cut-to-Length), o Forwarder é responsável pela extração da madeira, tornando-se um elemento fundamental na gestão operacional. A produtividade dessa máquina é diretamente influenciada pela distância de baldeio, já que, maiores distâncias aumentam o tempo de deslocamento, e conseqüentemente diminuem a produtividade. Além disso, as paradas operacionais e mecânicas afetam significativamente o desempenho da operação do Forwarder, reduzindo seu tempo em operação propriamente dita e impactando o custo total da extração. Dessa forma, uma gestão integrada e eficiente da operação é essencial para aumentar a produtividade e reduzir custos. Neste estudo, analisou-se a operação do Forwarder em plantações de eucalipto localizadas no sul da Bahia. Foram considerados os dados operacionais de três máquinas, coletados ao longo de três turnos de trabalho, no período de outubro de 2023 a março de 2024, totalizando 7.064 horas de operação. Os dados foram categorizados em classes de Volume Médio Individual (VMI) com o objetivo de avaliar a influência da distância de baldeio na produtividade da operação por meio de equações matemáticas. Para modelar a produtividade do Forwarder testaram-se seis modelos matemáticos: Exponential Decline, Harmonic Decline, Exponential, Reciprocol, Reciprocol Quadratic e Natural Logarithm. A avaliação dos modelos baseou-se na diferença entre as médias observadas e previstas, bem como no coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O modelo Reciprocol Quadratic apresentou o melhor desempenho com base na diferença entre as médias. Já considerando o coeficiente de determinação, o modelo Exponential obteve melhor desempenho. A operação analisada obteve bons índices de disponibilidade mecânica e eficiência operacional, correspondendo a 97% e 75%, respectivamente. As paradas operacionais foram classificadas em dez categorias, sendo “necessidades pessoais” a mais representativa em termos de tempo consumido, seguida pelas classes de “pausas” da operação e “deslocamento” da máquina. As interrupções para manutenção foram classificadas em seis categorias, destacando-se a manutenção preventiva como a mais relevante, seguida pelos reparos. Não houve diferença

relevante entre as paradas quando analisadas por turno e dia da semana. Os resultados obtidos reforçam a importância de um gerenciamento eficiente da operação do Forwarder, permitindo ajustes estratégicos e aplicações diárias para otimizar a produtividade e minimizar impactos operacionais e econômicos na colheita florestal.

Palavras-chave: disponibilidade mecânica; modelagem matemática; produtividade.

## ABSTRACT

RESENDE, Julia Hussar Duarte, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2025. **Forwarder operation integrated assessment: an approach based on average transshipment distance and operational management efficiency.** Adviser: Bruno Leao Said Schettini. Co-adviser: Arthur Araujo Silva.

Forest harvesting represents one of the main costs in timber production, with the extraction stage being a determining factor for both productivity and the profitability of the operation. In the CTL (Cut-to-Length) harvesting system, the Forwarder is responsible for wood loading, making it a key element in operational management. The productivity of this machine is directly influenced by extraction distance, as greater distances increase travel time and consequently reduce productivity. Additionally, operational and mechanical downtimes significantly affect the performance of the Forwarder, decreasing its operating time and impacting the total cost of extraction. Therefore, an integrated and efficient management approach is essential to optimize productivity, reduce costs, and improve machine performance. In this study, the operation of Forwarders in eucalyptus plantations located in southern Bahia, Brazil, was analyzed. Operational data from three machines were collected over three work shifts between October 2023 and March 2024, totaling 7,064 hours of operation. The data were categorized into Individual Mean Volume (IMV) classes to evaluate the influence of extraction distance on productivity through mathematical modeling. Six mathematical models were tested to predict Forwarder productivity: Exponential Decline, Harmonic Decline, Exponential, Reciprocal, Reciprocal Quadratic, and Natural Logarithm. The models were evaluated based on the difference between observed and predicted means, as well as the coefficient of determination ( $R^2$ ). The Reciprocal Quadratic model showed the best performance based on the mean difference for both IMV classes. When considering the coefficient of determination, the Exponential model was the most suitable for IMV Class 1, while the Reciprocal model performed better for Class 2. The analyzed operation showed good levels of mechanical availability (97%) and operational efficiency (75%). Operational downtimes were classified into ten categories, with personal needs being the most significant, followed by intervals and travel time. Maintenance interruptions were grouped into six classes, with preventive maintenance being the most relevant, followed by repairs. There were no significant differences in downtime when analyzed by shift, machine, or day of the week. The results reinforce the importance of effective management of Forwarder operations, enabling strategic adjustments and daily applications to optimize productivity and minimize

operational and economic impacts in forest harvesting.

Keywords: mechanical availability; mathematical modeling; productivity

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>10</b>
<b>2. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>15</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
2.1. Objetivo Geral .....	17
2.2. Objetivos específicos .....	17
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>18</b>
3.1. Caracterização da área .....	18
3.2. Caracterização da operação florestal.....	18
3.3. Coleta de dados .....	19
3.4. Organização dos dados para obtenção da curva de produtividade .....	19
3.5. Análise dos dados .....	20
3.6. Seleção e análise dos modelos analisados .....	21
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>23</b>
4.1. Coeficientes .....	23
4.2. Parâmetros.....	24
<b>4.2.1. Diferença entre as médias</b> .....	<b>24</b>
<b>4.2.2. Coeficiente de Determinação</b> .....	<b>26</b>
<b>5. DISCUSSÃO</b> .....	<b>30</b>
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>34</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>35</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>39</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>39</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>41</b>
2.1. Objetivo geral .....	41
2.2. Objetivos específicos .....	41
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>42</b>
3.1. Caracterização da área .....	42
3.2. Caracterização da operação florestal.....	43
3.3. Coleta de dados .....	43
3.3.1. Organização dos dados .....	44
<b>3.3.2. Indicadores avaliados</b> .....	<b>46</b>
<b>3.3.2.1. Disponibilidade mecânica</b> .....	<b>46</b>

3.3.2.2. Eficiência operacional .....	46
3.3.2.3. Taxa de utilização .....	47
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
4.1. Indicadores da operação de operação.....	47
4.3. Paradas operacionais .....	48
4.3.1. Pausas .....	49
4.3.2. Deslocamento .....	50
4.3.3. Limpeza .....	51
4.3.4. Atrasos.....	52
4.4.6. Abastecimento .....	53
4.4.7. Troca de turno.....	54
4.4.8. Acidentes.....	55
4.4.9. Treinamento .....	56
4.4.10. Paradas Climáticas .....	57
4.5. Paradas mecânicas.....	58
4.5.1. Manutenção preventiva .....	59
4.5.2. Reparos .....	60
4.5.3. Falta de peça .....	61
4.5.4. Manutenção periférica.....	62
4.5.5. Troca de pneu.....	63
4.5.6. Aquecimento da máquina .....	64
<b>5. DISCUSSÕES .....</b>	<b>66</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>70</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>75</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O setor florestal brasileiro atende a uma crescente demanda das fábricas por produtos de origem florestal (IBÁ, 2023). A alta demanda também está associada a necessidade de redução de custos, aumento da produtividade e práticas mais sustentáveis (MORLEY et.al., 2024). Assim, para atender as exigências, as atividades florestais precisam de uma gestão cada vez mais eficiente. Dentre as várias operações do manejo, a colheita florestal se destaca com uma alta complexidade, sendo um ponto de grande atenção entre os gestores do setor (SANTOS et al. 2017).

A colheita florestal se define como o conjunto de operações que visam cortar e extrair a madeira até o local de transporte (TITUS et al., 2021). No Brasil, o sistema de colheita de toras curtas (Cut-to-Length) é o mais utilizado pelas empresas de celulose e papel (HAKAMADA et al., 2022). Este sistema é composto por duas máquinas principais, o *Harvester*, que realiza o corte e processamento da madeira, e o *Forwarder*, responsável pela extração por meio do baldeio (MAGAGNOTTI et al., 2020).

Devido a utilização de diversos maquinários, quando não gerida de forma adequada, a colheita florestal, além de não atender as demandas fabris, gera impactos ambientais consideráveis (DE FREITAS et al., 2007; ARAÚJO, 2023). Com todos esses fatores, a colheita se enquadra em uma das operações mais onerosas do manejo florestal, e está em constante busca pela otimização dos seus recursos (SHADBAHR et al., 2021). Como aliada da otimização, a gestão das paradas das máquinas é essencial para o aumento da produtividade e redução de custos (DA SILVA et al., 2024).

As paradas das máquinas podem ser classificadas em paradas operacionais e mecânicas. As paradas mecânicas influenciam diretamente na disponibilidade mecânica da máquina, isto é, do tempo total, quanto tempo a máquina ficou apta a trabalhar. Já a eficiência operacional é a relação do tempo efetivo em que uma máquina está operando em relação ao tempo em que ela esteve disponível mecanicamente (DE OLIVEIRA et al., 2009). A análise dos dados das paradas operacionais e mecânicas tornam-se uma estratégia para a melhoria da gestão operacional, já que permite identificar de pontos de ineficiência da operação e desenvolvimento de estratégias para otimizar o uso dos maquinários (MOLOGNI et al., 2024).

Além dos fatores operacionais, a produtividade das máquinas é influenciada por diversos outros fatores, tais como condições climáticas, aspectos humanos, ergonômicos e características da floresta (SCHETTINO et al., 2022). Entre as inúmeras variáveis ocorrentes, compreender e planejar aquelas que são passíveis de controle é fundamental para o aumento da produtividade e alocação dos recursos (BARROS et al., 2021).

A operação de extração, realizada pelo *Forwarder*, é altamente influenciada pela distância de baldeio (DOS SANTOS et al., 2017; LEITE et al., 2014), ou seja, distância da coleta da madeira no interior do talhão até as margens das estradas, onde as pilhas serão formadas. Essa distância influencia no tempo de deslocamento da máquina, assim, um deslocamento mais longo significa menor tempo efetivo de operação (HARTSCH et al., 2022).

A modelagem preditiva é uma ferramenta aliada ao planejamento, já que é possível simular e analisar diversos cenários operacionais prevendo o desempenho do *Forwarder* em diferentes distâncias (SANTOS, 2019). A criação dos modelos ajuda a maximizar a eficiência do baldeio, melhorando a utilização dos recursos disponíveis e otimizando a colheita florestal (ARAÚJO, 2019).

Com base nesse cenário, a combinação entre estratégias para melhorar a gestão operacional, com base na análise das paradas das máquinas e a aplicação da modelagem preditiva para entender e otimizar a produtividade do baldeio representam uma abordagem integrada para a gestão sustentável e eficiente da extração florestal, reduzindo custos e aumentando a competitividade do setor.

## 2. REFERÊNCIAS

ARAUJO, L. C. **Modelagem da produtividade e da velocidade do forwarder em áreas inclinadas**. 2019. 87 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, 2019.

ARAÚJO, T. G. **Impactos da colheita mecanizada de eucalipto em propriedades físicas e perdas de solo**. 2023. 48 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2023.

BARROS, A. P. S.; FREITAS, L. C.; LEITE, E. S.; LUZ, D. S.; SILVA, L. F.; SENA, B. S. Influência do volume por árvore e da distância de extração no desempenho do skidder em povoamentos de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 131, p. 1-12, 2021.

FREITAS, L. C.; MACHADO, C. C.; SILVA, E.; JACOVINE, L. A. G. Avaliação quantitativa de impactos ambientais da colheita florestal em dois módulos. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 54, n. 313, p. 292-303, maio/jun. 2007.

HAKAMADA, R. E.; MOREIRA, G. G.; FERNANDES, P. G.; MARTINS, S. D. S. Legacy of harvesting methods on coppice-rotation Eucalyptus at experimental and operational scales. **Trees, Forests and People**, v.9, n. 100293, p. 1-9, 2022.

HARTSCH, F.; SCHÖNAUER, M.; BREINIG, L.; JAEGER, D. Influence of Loading Distance, Loading Angle and Log Orientation on Time Consumption of *Forwarder* Loading Cycles: A Pilot Case Study. **Forests**, v. 13, n. 3, art. 384, 2022.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual IBÁ 2023**. São Paulo: IBÁ, 2023. Disponível em: <  
<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf> >.  
Acesso em: 29 jun. 2024.

LEITE, E. S.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P.; LEITE, H. G.; GUEDES, I. L. Modelagem do desempenho da extração de madeira pelo "forwarder". **Revista Árvore**, v. 38, n. 5, p. 879-887, 2014.

MAGAGNOTTI, N.; SPINELLI, R.; KÄRHÄ, K.; MEDERSKI, P. S. Multi-tree cut-to-length harvesting of short-rotation poplar plantations. **European Journal of Forest Research**, v. 140, p. 345-354, 2021.

MOLOGNI, O.; LAHRSEN, S.; ROESER, D. Automated production time analysis using FPDat II onboard computers: A validation study based on whole-tree ground-based harvesting operations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 222, n. 109047, 2024.

MORLEY, I. D.; COOPS, N. C.; ROUSSEL, J. R.; ACHIM, A.; DECH, J.; MEECHAM, D.; MCCARTNEY, G.; REID, D. E. B.; MCPHERSON, S.; QUIST, L.; MCDONELL, C. Updating forest road networks using single photon LiDAR in northern Forest environments. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v. 97, p. 38-47, 2024.

OLIVEIRA, D.; LOPES, E. S.; FIEDLER, N. C. Avaliação técnica e econômica do *Forwarder* na extração de toras de pinus. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 84, p. 525-533, 2009.

SANTOS, A. C. A. **Modelagem matemática para planejamento operacional integrado das atividades de colheita, baldeio e transporte florestal**. 2019. 76 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2019.

SANTOS, D. W. F. N.; VALENTE, D. S. M., FERNANDES, H. C., SOUZA, A. P., CECON, P. R. Modeling technical, economic and environmental parameters of a forwarder in a Eucalyptus forest. **International Journal of Forest Engineering**, v. 31, n. 3, p. 197-204, 2020.

SANTOS, L. N.; FERNANDES, H. C.; SILVA, R. M. F.; SILVA, M. L. D.; SOUZA, A. P. Evaluation of costs of harvester in cut and processing of Eucalyptus wood. **Revista Árvore**, v. 41, n. 5, 2017.

SCHETTINO, S.; MINETTE, L. J.; SORANSO, D. R.; LIMA, R. C. A. Influência de fatores ergonômicos na produtividade do sistema homem-máquina na colheita florestal mecanizada. **Scientia Forestalis**, v. 50, p. e3779, 2022.

SHADBAHR, J.; BENSEBAA, F.; EBADIAN, M. Impact of forest harvest intensity and transportation distance on biomass delivered costs within sustainable forest management: A case study in southeastern Canada. **Journal of Environmental Management**, v. 284, n. 112073, p. 1-16, 2021.

SILVA, A. J. F.; SCHETTINO, S.; CABACINHA, C. D.; MINETTE, L. J.; SORANSO, D. R. Determinação da eficiência energética em máquinas de colheita florestal em sistema Full-tree. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, v. 17, n. 54, p. e1390-e1390, 2024.

TITUS, B. D.; BROWN, K.; HELMISAARI, H.-S.; VANGUELOVA, E.; STUPAK, I.; EVANS, A.; CLARKE, N.; GUIDI, C.; BRUCKMAN, V. J.; VARNAGIRYTĖ-KABASINSKIENĖ, I.; ARMOLAITIS, K.; DE VRIES, W.; HIRAI, K.; KAARAKKA, L.; HOGG, K.; REECE, P. Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. **Energy, Sustainability and Society**, v. 11, n. 10, 2021.

## CAPÍTULO 1

### Modelagem da produtividade do *Forwarder* baseada na distância média de baldeio

#### 1. INTRODUÇÃO

A colheita florestal representa uma das etapas de maior custo da cadeia produtiva da madeira, o que impacta diretamente a rentabilidade e a sustentabilidade do setor florestal (AKHTARI et al., 2019; SHADBAHR et al., 2021). Dentre suas etapas, destaca-se o baldeio, realizado pelo *Forwarder*, uma máquina autocarregável responsável por movimentar a madeira do talhão até o local de carregamento. (NOORDERMEER et al., 2020).

O planejamento eficiente da operação do *Forwarder* é fundamental para a tomada de decisões estratégicas e assertivas na operação. A estimativa de sua produtividade deve considerar diversos fatores, tais como a topografia e disposição do terreno, as condições climáticas, as vias de acesso, as características da floresta, a experiência do operador, a distância média do baldeio e a capacidade de carga da máquina (SANTOS et al., 2020).

A gestão inadequada pode elevar custos com combustível, manutenção de máquinas e infraestrutura, além de gerar impactos econômicos e ambientais significativos (FERRAZ et al., 2024). Dessa forma, compreender os fatores que influenciam o desempenho do *Forwarder*, sobretudo aqueles passíveis de controle humano, como a distância de baldeio, se torna essencial para tornar o setor mais competitivo e sustentável.

A distância de baldeio afeta diretamente a produtividade do *Forwarder*, pois, à medida que aumenta, há uma tendência de queda na produtividade das operações (GAGLIARDI et al., 2020). Isso ocorre devido ao maior tempo de deslocamento da máquina, que, além de reduzir a eficiência da operação, acelera o desgaste das máquinas (SANTOS et al., 2020). Por outro lado, a redução dessa distância exige maior investimento na construção e manutenção de estradas, o que pode diminuir a área efetiva de plantio e aumentar os custos com infraestrutura (TSIOTAS et al., 2023).

O setor florestal tem empregado cada vez mais modelos matemáticos para estimar a produtividades de máquinas florestais. Os modelos permitem observar padrões de comportamento da produtividade em função de diversas variáveis.

Revisões recentes indicam que diversos modelos, incluindo a utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), são fundamentais para estimar e prever a distância de extração das máquinas, sendo o modelo exponenciais muito utilizado para descrever a influência da distância de baldeio sobre a produtividade do *Forwarder*, devido à sua capacidade de capturar a tendência de queda acentuada da produtividade com o aumento da distância (ARAUJO, 2019; HILDT et al., 2020; LUNDBÄCK et al., 2022).

Diante da complexidade dos fatores que influenciam a produtividade do *Forwarder*, a modelagem matemática torna-se uma ferramenta essencial para simular cenários, identificar padrões e otimizar processos. Modelos preditivos permitem a análise de variáveis interdependentes, como a relação entre a produtividade e a distância de baldeio, facilitando a tomada de decisões baseada em evidências, aprimorando o planejamento operacional, minimizando custos e aumentando a eficiência da colheita florestal (NETO et al., 2021).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Verificar a influência da distância média de baldeio na produtividade do *Forwarder* por meio de equações matemáticas em plantios no sul da Bahia.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Analisar modelos matemáticos que mais se adequem aos dados de treinamento e teste;
- Testar os melhores modelos matemáticos em diferentes classes de VMI para minimizar o impacto do volume da madeira na produtividade;
- Avaliar diferentes parâmetros para escolher os melhores modelos matemático para a relação produtividade e distância de baldeio estudada.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Caracterização da área

O estudo foi realizado em plantios florestais de eucalipto pertencentes a uma empresa de celulose e papel localizados no município de Eunápolis, estado da Bahia (Figura 1). A empresa utiliza como matéria prima para seu processo industrial a fibra de eucalipto, e realiza todo o ciclo produtivo da espécie, desde o viveiro até a colheita. Seus plantios são realizados em espaçamento 3x3 metros e todo o manejo é realizado para garantir maior produtividade das florestas.

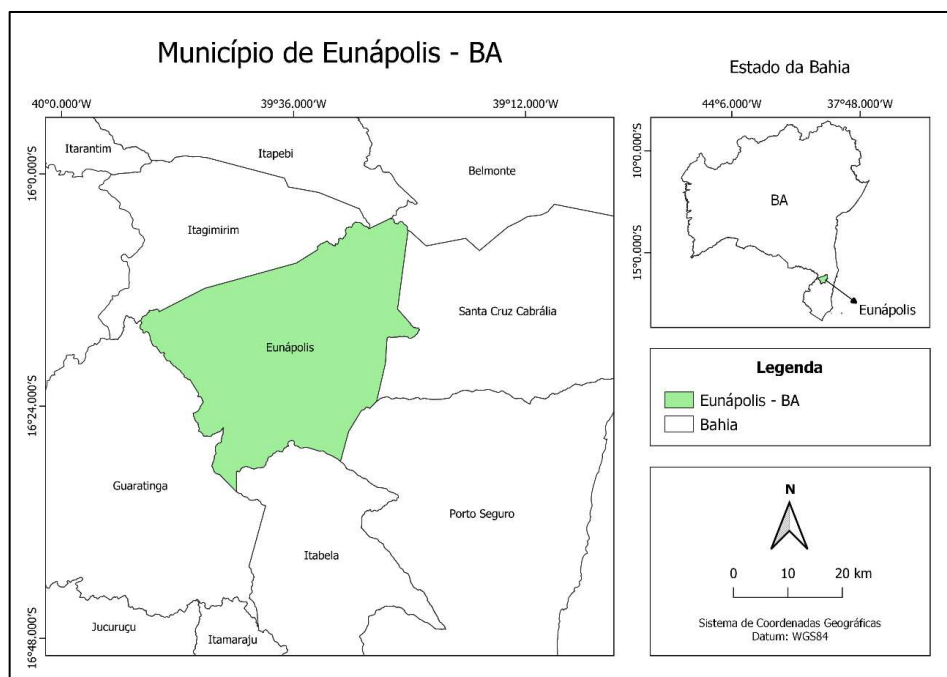


Figura 1: Localização do município onde foi realizado a coleta de dados para o estudo.

O clima é considerado subúmido, com vegetação característica da Mata Atlântica, temperatura média anual de 23,2 °C e precipitação média anual variando entre 1000 e 1200 mm (TAGLIAFERRE et al., 2010).

#### 3.2. Caracterização da operação florestal

O sistema de colheita florestal utilizado na empresa é o de toras curtas (*cut-to-length*). Nesse sistema, a empresa utiliza o comprimento padrão de 6,2 metros, em que as toras são cortadas com o uso de *Harvester* e extraídas do interior do talhão utilizando-se *Forwarder*.

A operação de colheita florestal é composta por três turnos diários de 8 horas cada., sendo:

- Turno 1: início às 07 horas e término às 15 horas;
- Turno 2: início às 15 horas término às 23 horas;
- Turno 3: início às 23 horas término às 07 horas.

Os dados analisados são provenientes de três *Forwarders* da marca Komatsu, modelo 895, 6x6, de pneus, com motor de potência 214 kW (Figura 2).



Figura 2: *Forwarder* Komatsu modelo 895 utilizado como fonte de dados para operação de baldeio utilizada nessa pesquisa. Fonte: Divulgação Komatsu.

### 3.3. Coleta de dados

Os dados foram coletados em um período de seis meses, entre outubro de 2023 e março 2024, totalizando 7064 horas da operação.

Para o cálculo dos indicadores do baldeio foram coletados os dados de volume médio individual das árvores (VMI), provenientes do inventário florestal, e os demais dados obtidos do apontamento digital da operação, sendo: data, quantidade total de horas de operação, horas produtivas, produtividade esperada da operação ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) e distância média do baldeio.

### 3.4. Organização dos dados para obtenção da curva de produtividade

A produtividade por hora efetiva ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) foi obtida através da relação entre o volume extraído de madeira pela operação de baldeio sobre o tempo efetivo de trabalho, e pode ser expressa da seguinte maneira (Eq 1):

$$PE = P / He$$

Em que: PE é a produtividade efetiva da operação (em  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ); P é a produção (em  $\text{m}^3$ ); He é a quantidade de horas efetivas de trabalho (em horas).

Para a construção da curva de produtividade do *Forwarder* em função da distância média de baldeio, os dados foram organizados em classes de Volume Médio Individual (VMI), com o intuito de minimizar a influência do VMI transportado nos modelos estudados, os dados foram agrupados em intervalos de volume de  $0,1\text{m}^3$ :

Classificação de VMI:

- Classe 1: de  $0,07$  a  $0,19 \text{m}^3$ ;
- Classe 2: de  $0,20$  a  $0,29 \text{m}^3$ ;
- Classe 3: de  $0,30$  a  $0,39 \text{m}^3$ ;
- Classe 4: acima de  $0,40 \text{m}^3$ .

Na Classe 4 de VMI, não foram observados dados de todas as máquinas.

### 3.5. Análise dos dados

A produtividade analisada é resultante dos apontamentos de três máquinas *Forwarder*, cada uma com no mínimo 1.400 horas de operação acumulada. O *Forwarder 1* alcançou o maior número de horas operadas, totalizando 4.264 horas, enquanto os *Forwarders 2* e *3* registraram 1.400 horas de operação cada.

Os dados foram divididos em conjuntos de treinamento e teste. Para o treinamento dos modelos, foram utilizados os dados da máquina 1, que possuía o maior tempo de operação, enquanto os resultados desse treinamento foram testados com os dados das duas demais máquinas, tanto individualmente quanto de forma combinada (Tabela 1).

Tabela 1: Dados de teste

<b>Grupo de teste</b>	<b>Máquinas</b>
1	<i>Forwarder 2</i>
2	<i>Forwarder 3</i>
3	<i>Forwarder 2 + Forwarder 3</i>

Todos os dados foram analisados dentro das suas respectivas classes de VMI.

### 3.6. Seleção e análise dos modelos analisados

Os modelos foram construídos utilizando o software CurveExpert, com a distância de baldeio como variável preditora e a produtividade como variável de resposta, nas diferentes classes de VMI.

Os seis modelos que apresentavam o melhor ajuste, com menor erro padrão e maior coeficiente de determinação para a maior quantidade de classes foram selecionados (Tabela 2).

Tabela 2: Modelos analisados

Modelos	Equação
Exponential Decline	$y = q_0 e^{-x/a}$
Harmonic Decline	$y = \frac{q_0}{(1 + \frac{x}{a})}$
Exponential	$y = q_0 e^{ax}$
Reciprocol	$y = \frac{1}{(a + bx)}$
Reciprocol Quadratic	$y = \frac{1}{(a + bx + cx^2)}$
Natural Logarithm	$y = a + b \ln(x)$

Para análise final, os modelos gerados foram analisados no Software R, (SOFTWARE R, 2024) utilizando os coeficientes obtidos no treinamento para validar o desempenho das curvas em todas as classes de VMI das demais máquinas. Assim, cada modelo, em sua respectiva classe de VMI, foi testado três vezes, considerando os grupos de teste: máquina 2, máquina 3 e máquina 1 + máquina 2. Totalizando 72 análises.

### 3.7. Validação dos modelos

Com todas as previsões analisadas para os dados de treinamento e teste, os modelos gerados foram avaliados, a fim de identificar o que mais se aplica à situação estudada.

A qualidade dos modelos foi medida de duas formas, pela diferença entre as médias preditas e observadas e pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), (Eq 2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Em que:  $R^2$  é o coeficiente de determinação;  $y_i$  é o valor observado;  $\hat{y}_i$  o valor predito,  $\bar{y}$  é a média dos valores observados.

Esses dois parâmetros foram escolhidos para contemplar uma análise utilizando a média, valor utilizado para o planejamento da operação e para analisar o ajuste ponto a ponto de cada modelo.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Coeficientes

Os valores obtidos, utilizando os dados de treinamento (Forwader 1), dos coeficientes de ajuste, de todos os seis modelos, Exponential Decline, Harmonic Decline, Exponential, Reciprocol Quadratic, Reciprocol e Natural Logarithm, na de VMI estão representados de acordo com a sua classe (Tabela 2).

Tabela 3: Coeficientes obtidos para todos os modelos.

<b>Modelos</b>	<b>Coeficientes</b>	<b>VMI 1</b>	<b>VMI 2</b>	<b>VMI 3</b>	<b>VMI 4</b>
<b>Exponential Decline</b>	<b>q<sub>0</sub></b>	61,0534	55,3631	78,7809	114,7106
	<b>A</b>	1,7277	-9,4840	0,9308	0,3757
<b>Harmonic Decline</b>	<b>q<sub>0</sub></b>	62,0534	55,4505	62,5019	205,407
	<b>A</b>	1,3759	-10,1028	0,6089	-0,1007
<b>Exponential</b>	<b>q<sub>0</sub></b>	61,0534	55,3630	78,7818	114,7106
	<b>A</b>	-0,5689	0,1054	-1,0743	-2,6610
<b>Reciprocol Quadratic</b>	<b>A</b>	0,0157	0,0209	0,0241	-0,0257
	<b>B</b>	0,0136	-0,0193	-0,0434	0,0275
	<b>C</b>	-0,0026	0,0235	0,0726	-0,4151
<b>Reciprocol</b>	<b>A</b>	0,0159	0,0180	0,0118	0,0049
	<b>B</b>	0,0116	-0,0018	0,0194	0,0484
<b>Natural Logarithm</b>	<b>A</b>	39,0639	60,1483	28,5671	3,3282
	<b>B</b>	-9,7090	2,4065	-23,5367	-40,1349

## 4.2. Parâmetros

### 4.2.1. Diferença entre as médias

As médias das produtividades geradas pelos dados de teste utilizando como base a distância média de baldeio, nos seis modelos e a média observada pelo *Forwarder 2*, assim como sua respectiva porcentagem em relação ao valor real, então representados de acordo com a sua classe de VMI (Tabela 4).

Tabela 4: Médias preditas e observadas

<b>Médias de produtividade FW 2</b>	<b>Prod. Classe VMI1 (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Prod. Classe VMI2 (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Prod. Classe VMI3 (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Prod. Classe VMI4 (m<sup>3</sup>/h)</b>
<b>Observada</b>	51,65	52,69	54,88	38,26
<b>Exponential Decline</b>	54,03 (+4,6%)	56,64 (+7,5%)	66,54 (+21,2%)	61,67 (+61,2%)
<b>Harmonic Decline</b>	54,25 (+5,0%)	56,66 (+7,5%)	67,14 (+22,3%)	61,82 (+61,6%)
<b>Exponential</b>	54,14 (+4,8%)	56,64 (+7,5%)	66,54 (+21,2%)	61,67 (+61,2%)
<b>Reciprocol Quadratic</b>	54,32 (+5,2%)	55,94 (+6,2%)	52,54 (-4,3%)	63,56 (+66,1%)
<b>Reciprocol</b>	54,25 (+5,0%)	48,70 (-7,6%)	67,14 (+22,3%)	61,95 (+61,9%)
<b>Natural Logarithm</b>	55,11 (+6,7%)	56,42 (+7,1%)	72,30 (+31,7%)	61,76 (+61,4%)

As médias das produtividades geradas pelos dados de teste utilizando como base a distância média de baldeio, nos seis modelos e a média observada pelo *Forwarder 3*, assim como sua respectiva porcentagem em relação ao valor real, então representados de acordo com a sua classe de VMI (Tabela 5).

Tabela 5: Médias previstas e observadas.

<b>Médias de produtividade FW3</b>	<b>Prod. Classe VMI1 (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Prod. Classe VMI2 (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Prod. Classe VMI3 (m<sup>3</sup>/h)</b>
<b>Observada</b>	52,42	51,89	51,28
<b>Exponential Decline</b>	55,51 (+5,9%)	56,23 (+8,4%)	67,02 (+30,7%)
<b>Harmonic Decline</b>	55,84 (+6,5%)	56,27 (+8,4%)	67,74 (+32,1%)
<b>Exponential</b>	55,6 (+6,1%)	56,23 (+8,4%)	67,02 (+30,7%)
<b>Reciprocol Quadratic</b>	56,02 (+6,9%)	53,70 (+3,5%)	52,14 (+1,7%)
<b>Reciprocol</b>	55,84 (+6,5%)	50,68 (-2,3%)	67,74 (+32,1%)
<b>Natural Logarithm</b>	56,76 (+8,3%)	55,43 (+6,8%)	73,41 (+43,2%)

As médias das produtividades geradas pelos dados de teste utilizando como base a distância média de baldeio, nos seis modelos e a média observada pelo *Forwarder 2 + Forwarder 3*, assim como sua respectiva porcentagem em relação ao valor real, então representados de acordo com a sua classe de VMI (Tabela 6).

Tabela 6: Médias previstas e observadas.

<b>Médias de produtividade FW2 + FW3</b>	<b>Prod. Classe VMI1 (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Prod. Classe VMI2 (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Prod. Classe VMI3 (m<sup>3</sup>/h)</b>
<b>Observada</b>	52,05	52,28	53,08
<b>Exponential Decline</b>	54,82 (+5,3%)	56,43 (+7,9%)	66,78 (+25,8%)
<b>Harmonic Decline</b>	55,09 (+5,8%)	56,46 (+8,0%)	67,44 (+27,1%)
<b>Exponential</b>	54,92 (+5,5%)	56,43 (+7,9%)	66,78 (+25,8%)
<b>Reciprocol Quadratic</b>	55,22 (+6,1%)	54,80 (+4,8%)	52,34 (98,6%)
<b>Reciprocol</b>	55,09 (+5,8%)	49,71 (-4,9%)	67,44 (+27,1%)
<b>Natural Logarithm</b>	55,99 (+7,6%)	55,91 (+6,9%)	72,86 (+37,3%)

O Modelo que conseguiu prever o valor mais próximo da média observada, com base na distância média de baldeio, de forma geral, para todas as classes foi o Reciprocol Quadratic (Figura 3).

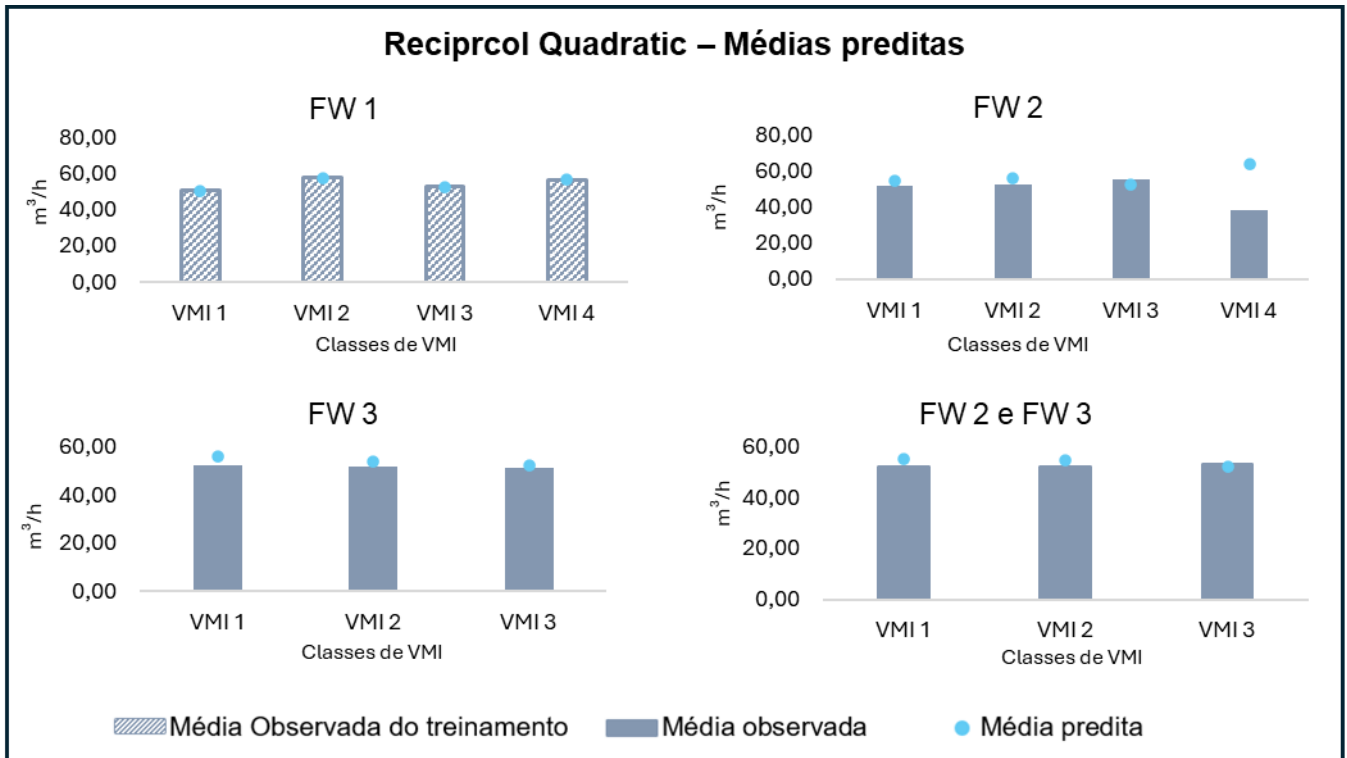


Figura 3: Médias previstas para o modelo Reciprocol Quadratic

#### 4.2.2. Coeficiente de Determinação

Os valores obtidos pelos dados de treinamento do  $R^2$  do *Forwarder 2*, relativos à predição da produtividade baseada na distância de baldeio, em relação aos valores observados, está representado de acordo com a sua classe de VMI (Tabela 7).

Tabela 7: Coeficiente de determinação dos modelos.

	FW 2	VMI 1	VMI 2	VMI 3
<b>Exponential Decline</b>		27,17%	34,66%	19,50%
<b>Harmonic Decline</b>		25,53%	34,65%	18,60%
<b>Exponential</b>		27,19%	34,66%	19,50%
<b>Reciprocol Quadratic</b>		24,27%	34,74%	17,34%
<b>Reciprocol</b>		25,53%	34,79%	18,60%
<b>Natural Logarithm</b>		10,11%	34,89%	16,45%

Os valores obtidos pelos dados de treinamento do *Forwarder 3*, relativos à predição da produtividade baseada na distância de baldeio, em relação aos valores observados, está representado de acordo com a sua classe de VMI (Tabela 8).

Tabela 8: Coeficiente de determinação dos modelos.

<b>FW 3</b>	<b>VMI 1</b>	<b>VMI 2</b>	<b>VMI 3</b>
<b>Exponential Decline</b>	27,29%	2,09%	59,90%
<b>Harmonic Decline</b>	26,87%	2,11%	59,14%
<b>Exponential</b>	27,30%	2,09%	59,90%
<b>Reciprocol Quadratic</b>	26,55%	1,42%	57,71%
<b>Reciprocol</b>	26,87%	1,78%	59,14%
<b>Natural Logarithm</b>	23,79%	0,66%	57,34%

Os valores obtidos pelos dados de treinamento do *Forwarder 2 + Forwarder 3*, relativos à predição da produtividade baseada na distância de baldeio, em relação aos valores observados, está representado de acordo com a sua classe de VMI (Tabela 9).

Tabela 9: Coeficiente de determinação dos modelos.

<b>FW 2 + FW 3</b>	<b>VMI 1</b>	<b>VMI 2</b>	<b>VMI 3</b>
<b>Exponential Decline</b>	24,47%	5,74%	24,51%
<b>Harmonic Decline</b>	23,60%	5,79%	23,72%
<b>Exponential</b>	24,48%	5,74%	24,51%
<b>Reciprocol Quadratic</b>	22,90%	4,13%	22,49%
<b>Reciprocol</b>	23,60%	5,12%	23,72%
<b>Natural Logarithm</b>	11,85%	2,95%	21,83%

O Modelo que apresentou os melhores valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), na classificação 2 foi o Exponential. As curvas obtidas pelo modelo Exponential foram plotadas para demonstrar a relação dos valores preditos de produtividade ( $m^3$ ) pela distância média de baldeio (Km), em todas as classes de VMI (Figura 4 a 7).

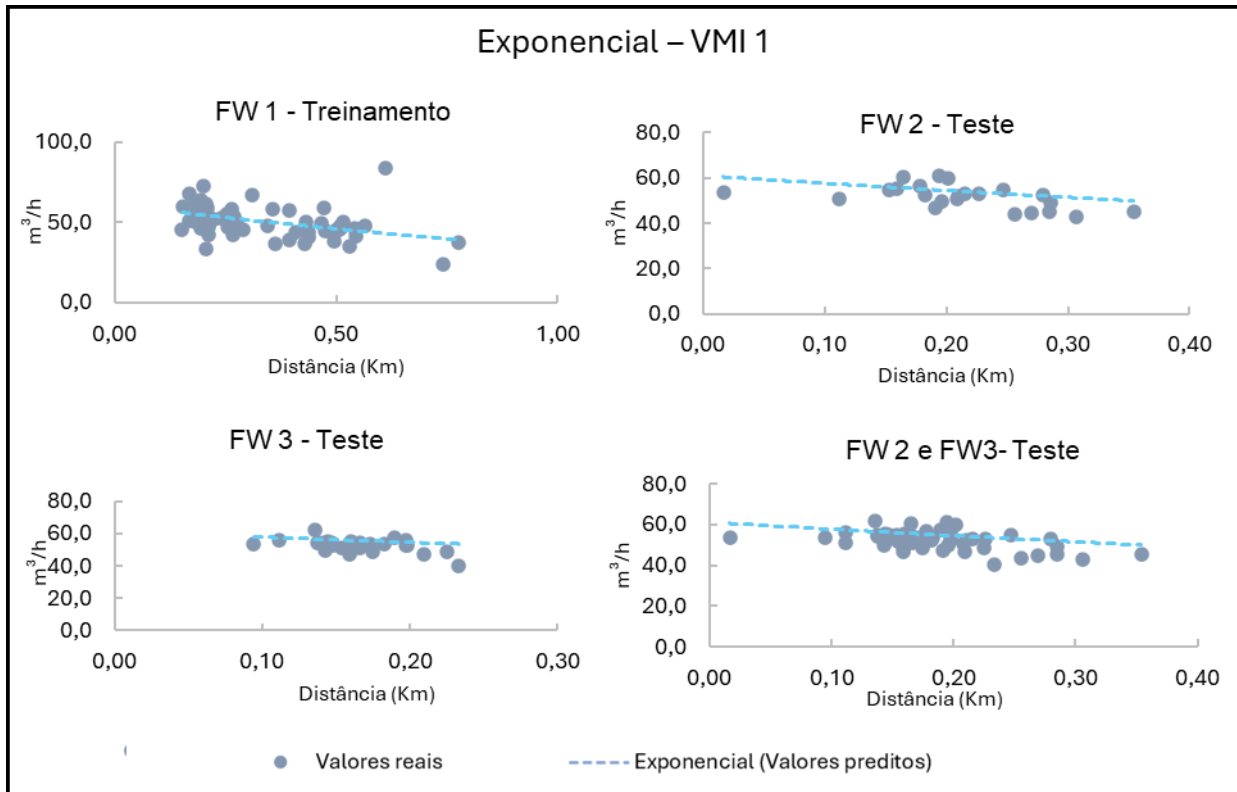


Figura 4: Valores preditos para o modelo Exponencial na classe de VMI 1.

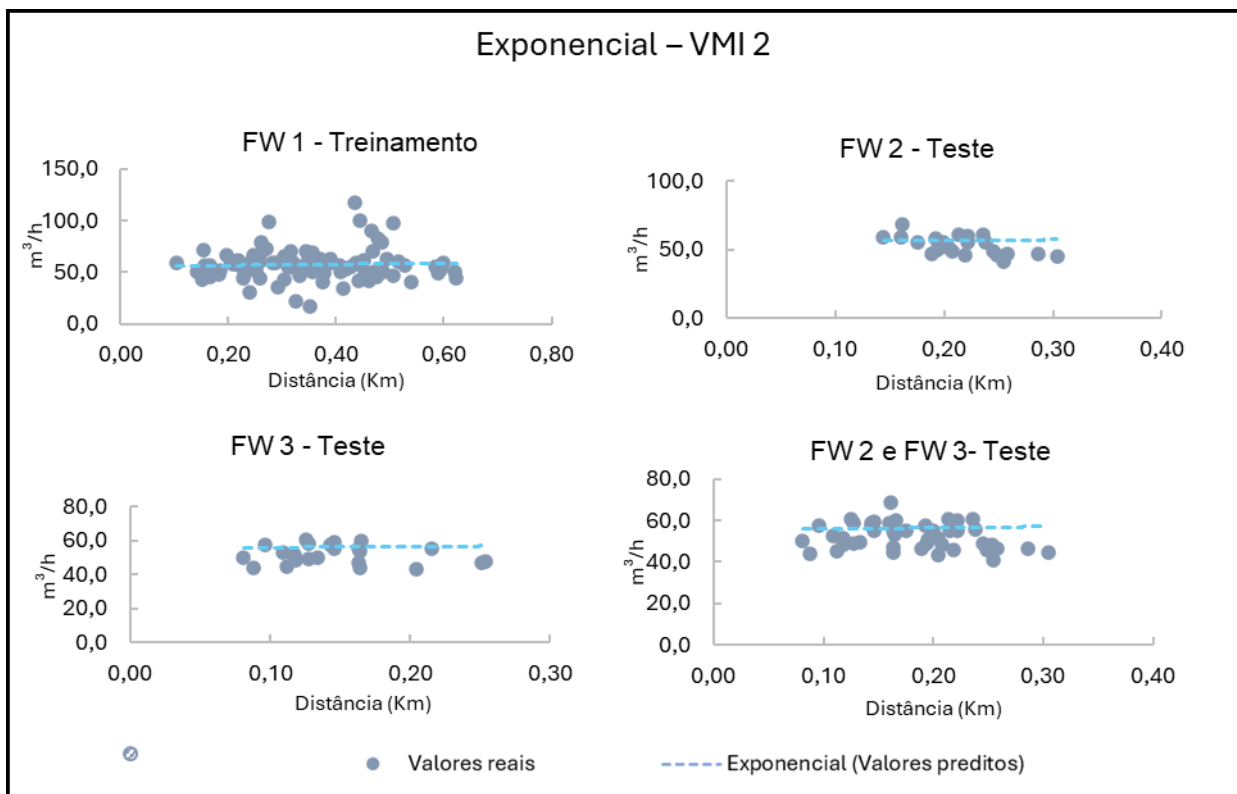


Figura 5: Valores preditos para o modelo Exponencial na classe de VMI 2.

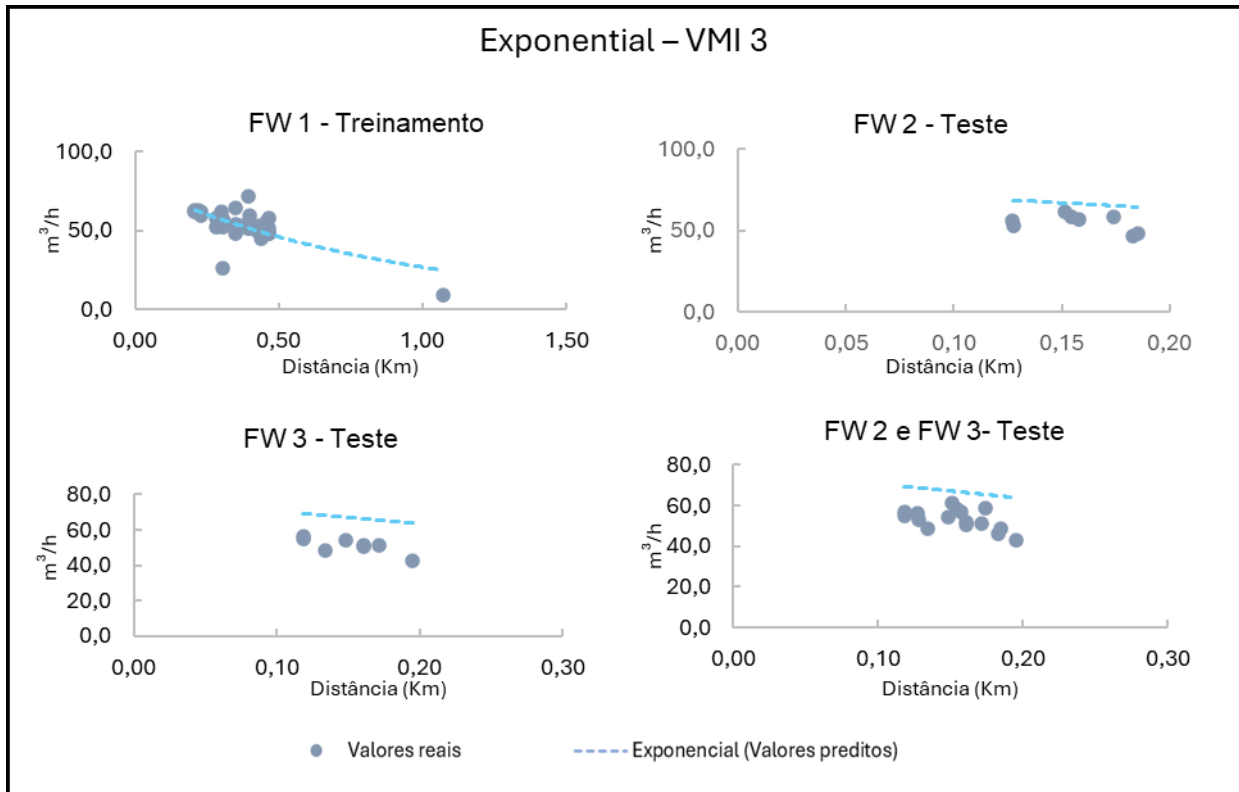


Figura 6: Valores preditos para o modelo Exponential na classe de VMI 3.

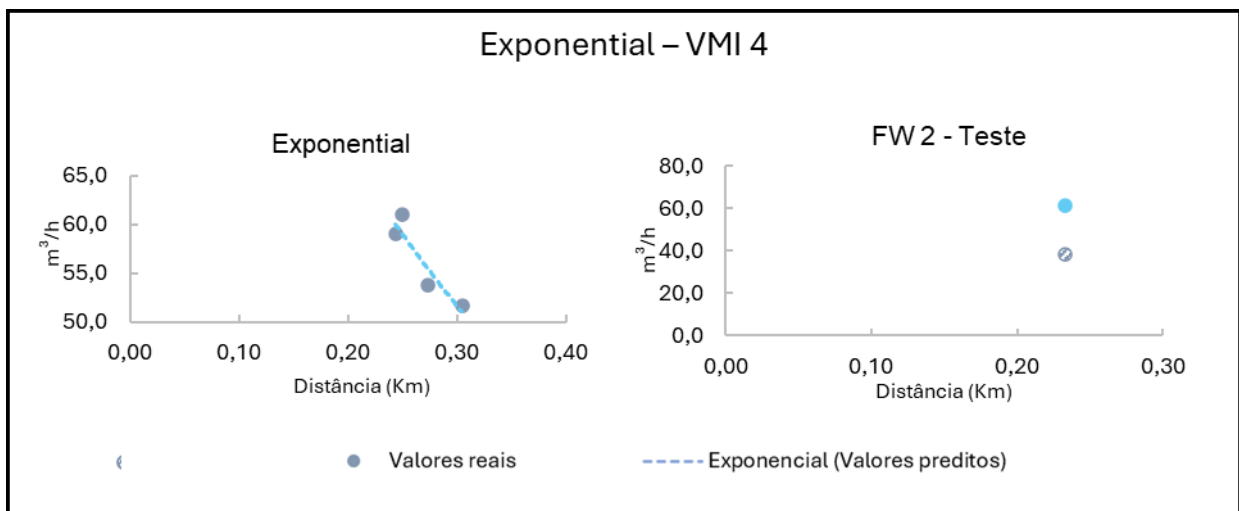


Figura 7: Valores preditos para o modelo Exponential na classe de VMI 4.

## 5. DISCUSSÃO

O estudo realizado demonstrou que existe uma interação entre a produtividade do *Forwarder* e a distância média de baldeio, relação também evidenciada em estudos realizados em florestas de Eucaliptos e Pinus do estado do Paraná (CABRAL et al., 2020; MASIOLI et al., 2023). Os modelos observados mostram que com o aumento da distância de baldeio há uma tendência de redução na produtividade, mas essa relação se estabiliza nas maiores distâncias.

Entre os parâmetros analisados para qualificar os modelos, a diferença entre as médias apresenta resultados mais aplicáveis para a realidade operacional, já que o planejamento da operação se baseia na média da operação. A diferença entre as médias tem como característica ser um parâmetro menos sensível às dispersões aleatórias dos dados, evidenciando melhores resultados. Devido a essa característica, os modelos apresentaram resultados semelhantes entre si, já que se baseiam principalmente na média dos dados testados.

Já os resultados dos modelos baseados no coeficiente de determinação ( $R^2$ ) apresentaram um desempenho insatisfatório. Esses resultados pouco significativos são decorrentes da alta dispersão dos dados e da baixa capacidade dos modelos de explicarem a variabilidade ponto a ponto da produtividade baseando-se apenas na distância média do baldeio. Como a relação matemática entre os modelos são semelhantes, os valores obtidos pelo coeficiente de determinação não variam muito entre os modelos.

Embora exista uma relação entre a produtividade do *Forwarder* e a distância média de baldeio, como observado na Itália e na Nova Zelândia em plantios de pinheiros (PROTO et al., 2018), existem outros inúmeros fatores que também influenciam na produtividade da máquina, como a declividade, o clima, a experiência do operador, manutenção da máquina, tamanho dos feixes, o tamanho caixa de carga e volume médio individual das árvores (VMI) (LOPES et al., 2010; SIMÕES & FENNER, 2010; SPINELLI et al., 2021; MARČETA et al., 2024).

As condições do terreno, como a declividade e a presença de obstáculos afetam a estabilidade e a rota da máquina (LOPES et al., 2016). Terrenos mais íngremes, visando garantir maior segurança devido ao risco de tombamento em

maiores inclinações laterais, não permitem o deslocamento horizontal das máquinas, influenciando no tempo de manobra e na distância percorrida pela máquina (MALINOVSKI et al., 2006). Em situações ainda mais severas, em inclinações maiores que 28°, o *Forwarder* pode operar apenas de maneira guinchada, o que demanda da operação um tempo maior para acoplar e desacoplar a máquina, reduzindo a sua produtividade, como demonstrado em estudos realizados em plantios de eucaliptos no estado de São Paulo (ROBERT et al., 2017).

A produtividade da operação também é influenciada pela experiência e habilidade do operador (WENHOLD et al., 2019). Operadores mais experientes possuem maior facilidade para realizar o carregamento e descarregamento das máquinas, além da capacidade de identificar as melhores rotas. Para que os operadores se tornem cada vez mais experientes, é fundamental que exista treinamentos regulares a fim de qualificar e reter a mão de obra, um dos grandes desafios atuais do setor florestal (VENÂNCIO et al., 2024).

Outros estudos que tentam prever e descrever a operação do *Forwarder*, notam que as características da madeira são fatores relevantes na determinação da produtividade. Em plantios localizados na Bulgária e na Itália, a forma em que a madeira foi espalhada e empilhada dentro do talhão afetaram significativamente a operação do *Forwarder* (PAPANDREA et al., 2025).

O mercado atual tem aprimorado as características do *Forwarder*, com destaque para a introdução de caixas de carga cada vez maiores. Esta mudança visa aumentar a capacidade de transporte e reduzir o número de ciclos necessários para completar uma operação, contribuindo para a eficiência da máquina (CARMO et al., 2015). No entanto, a adaptação a máquina cada vez maiores pode gerar desafios, especialmente em terrenos que não são planos, já que a estabilidade do *Forwarder* pode ser comprometida, além de gerar maiores impactos ambientais, como a compactação do solo, e exigir um maior planejamento e atenção com a segurança e qualidade do trabalho.

A variação da produtividade ( $R^2$ ) do *Forwarder* foi explicada em 43% nos estudos realizados em plantios de Pinus, sendo as variáveis de entrada o VMI e a distância de baldeio. A produtividade obteve relação positiva com o aumento do VMI e negativa com o aumento da distância de baldeio (GAGLIARDI et al., 2020).

Ressaltando que a combinação dos fatores obteve melhores resultados do que a metodologia adotada no estudo, em que os dados foram divididos e organizados em classes de VMI, para minimizar o impacto dessa variável nos resultados da produtividade.

O VMI é um fator que influencia no rendimento da operação, já que define a quantidade de biomassa disponível por árvore, e conseqüentemente, o número de árvores que o *Forwarder* precisa para atingir sua carga (MASIOLI et al., 2024). Quando o VMI é elevado, o número de ciclos pode ser reduzido, aumentando a eficiência da operação, por outro lado, quando o VMI é baixo pode exigir maior quantidade de viagens ou maior tempo no carregamento para atingir o mesmo volume total, diminuindo a produtividade.

Os modelos estudados demonstram uma tendência inversa entre a distância de baldeio e a produtividade do *Forwarder*, ou seja, em área com produtividades similares, quanto maior a distância menor a produtividade da máquina, no entanto fatores externos podem modificar esse comportamento. Esses fatores externos a operação são um dos grandes desafios da modelagem preditiva aplicadas ao setor florestal (PEZZIN, 2024). Devido à grande extensão e a complexidade das operações, a variação das condições do terreno, solo, floresta, operadores e dificulta a obtenção de modelos com alto poder explicativo. Além disso, a coleta de dados em campo frequentemente apresenta limitações práticas, com o avanço da telemetria há um aumento da rapidez e do controle dos dados, mas para muitas empresas, ainda é difícil ter precisão nos dados obtidos (SPINELLI et al., 2021; MAZETTO, 2024).

No presente estudo, a abordagem adotada para segmentar os dados por classes de VMI foi útil para reduzir parte dessa variabilidade, mas ainda assim não foi suficiente para capturar todas as interações entre as variáveis envolvidas. Modelos mais avançados, como técnicas de aprendizado de máquina e redes, poderiam ser explorados em estudos futuros para superar essas limitações.

Apesar das limitações mencionadas, o presente estudo representa uma contribuição importante para a compreensão das dinâmicas que regem a produtividade em operações de extração florestal. A análise da relação entre distância de baldeio e produtividade fornece informações importantes para o planejamento operacional, permitindo que gestores identifiquem estratégias para otimizar as rotas

de extração e reduzir os custos associados ao baldeio. Além disso, a abordagem utilizada, que incluiu a segmentação dos dados em classes de VMI, oferece um método replicável para outros estudos que busquem explorar interações entre variáveis em contextos mais complexos. Os resultados obtidos podem servir de base para o desenvolvimento de práticas mais eficientes e mais complexas, contribuindo para a sustentabilidade e competitividade do setor florestal.

## 6. CONCLUSÕES

- Apesar da influência constatada da distância média de baldeio na produtividade, esse não é o único fator que afeta na operação.
- Os seis modelos testados apresentaram resultados e estimativas similares, sendo o Reciproal Quadratic o mais aplicável para o planejamento da operação.
- A separação dos dados por classe de VMI foi uma boa estratégia para minimizar o efeito dessa característica nos resultados.
- Os melhores resultados foram obtidos pela diferença entre as médias. Sendo esse valor replicável no planejamento da operação.
- Melhores resultados podem ser encontrados considerando mais variáveis de entrada no modelo, não apenas a distância média de baldeio.

## 7. REFERÊNCIAS

AKHTARI, S.; SOWLATI, T.; SILLER-BENITEZ, D. G.; ROESER, D. Impact of inventory management on demand fulfilment, cost and emission of forest-based biomass supply chains using simulation modelling. **Biosystems Engineering**, v. 178, p. 184-199, 2019.

CABRAL, O. M. J. V.; LOPES, E. S.; RODRIGUES, C. K. Impact of distance between strip roads on productivity and costs of a forwarder in commercial thinning of Pinus Taeda Stands. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 41, n. 2, p. 1-7, 2020.

CARMO, F. C. A.; FIEDLER, N. C.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P. Otimização do uso do trator florestal forwarder em função da produtividade, custos e capacidade de carga<sup>1</sup>. **Revista Árvore**, v. 39, n. 3, p. 561-566, 2015.

FERRAZ, C. P. A.; MANOEL, M. P. S.; CHAVES, J. V. B.; AIELLO, L. H. F.; SILVA, G. S.; MEDEIROS, G. A.; RIBEIRO, A. I. Environmental Impacts of Mechanized Timber Harvesting in Eucalyptus Plantations in Brazil. **Forests**, v. 15, n. 8, p. 1291, 2024.

GAGLIARDI, K.; ACKERMAN, S.; ACKERMAN, P. Multi-product forwarder-based timber extraction: Time consumption and productivity analysis of two forwarder models over multiple products and extraction distances. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 41, n. 2, p. 1-12, 2020.

LOPES, E. S.; OLIVEIRA, D.; SILVA, P. C.; CHIQUETTO, A. L. Avaliação do desempenho de operadores no treinamento com simulador de realidade virtual forwarder. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 177-186, 2010.

LOPES, E. S.; TONHATO, L.; RODRIGUES, C. K.; SERPE, E. L. Declividade do terreno e distância de extração na produtividade do forwarder com guincho de tração auxiliar. **Nativa**, v. 4, n. 6, p. 347-352, 2016.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R.; YAMAJI, F. M. Análise das variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. **Floresta**, v. 36, n. 2, p. 169-182, 2006.

MARČETA, D.; BILAKOVIĆ, Z.; PETKOVIĆ, V.; KNEŽEVIĆ, J. Productivity of HSM 208F forwarder in selective cutting and mountainous area. **Radovi Šumarskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu**, v. 54, n. 1, 2024.

MASIOLI, W.; FIEDLER, N. C.; BRISSON, E. V.; ALMEIDA, A. T. S., LACERDA, L. C. Variáveis de influência da produtividade na extração de madeira em um sistema de toras curtas. **Contribuciones A Las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 2, p. e4781-e4781, 2024.

MASIOLI, W.; LOPES, E. S.; BURGER PAGNUSSAT, M.; CARLOS GARSZTKA, L. Effect Of Wood Stacking On Productivity And Cost Of Forest Extraction And Loading. **Floresta**, v. 53, n. 3, 2023.

MAZETTO, M. O. **Implementação de ferramentas 4.0 na gestão de manutenção em uma operação florestal**. 2024. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado e Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2024.

NOORDERMEER, L.; SØRNGÅRD, E.; ASTRUP, R.; NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T. Coupling a differential global navigation satellite system to a cut-to-length harvester operating system enables precise positioning of harvested trees. **International Journal of Forest Engineering**, v. 32, n. 2, p. 119-127, 2021.

OLIVEIRA NETO, R. R.; LEITE, H. G.; GLERIANI, J. M. et al. Estimation of Eucalyptus productivity using efficient artificial neural network. **European Journal of Forest Research**, 141, n. 1, p. 129–151, 2022.

PAPANDREA, S. F.; STOILOV, S.; CATALDO, M. F.; NICHEV, P.; ANGELOV, G.; PROTO, A. R. How Different Distribution of Assortments on Worksites Influences *Forwarder* Performance in Coniferous Plantations. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 46, n. 1, p. 33-45, 2025.

PEZZIN, Bruno Garuzzi. **Aplicação de redes neurais para a predição do volume de madeira extraído por hora de uma empresa produtora de celulose**. 2024. 32 f. Monografia (Especialização em Ciência de Dados), Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, MG, 2024.

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.

ROBERT, R. C. G.; TESSARO, F.; PEREIRA, R. S.; SAMPIETRO, J. A.; MALINOVSKI, R. A. Technical analysis of extraction operation performed by a forwarder with traction aid winch in an *Eucalyptus* spp. plantation. **Nativa**, v. 5, n. 4, p. 290-297, 2017.

SANTOS, D. W. F. N.; VALENTE, D. S. M.; FERNANDES, H. C.; SOUZA, A. P.; CECON, P. R. Modeling technical, economic and environmental parameters of a forwarder in a *Eucalyptus* forest. **Internertional Journal of Forest Engineering**, v. 31, n. 3, p. 197-204, 2020.

SHADBAHR, J.; BENSEBAA, F.; EBADIAN, M. Impact of forest harvest intensity and transportation distance on biomass delivered costs within sustainable forest management - A case study in southeastern Canada. **Journal of Environmental Management**, v. 284, n. 112073, p. 1-16, 2021.

SIMÕES, D.; FENNER, P. T. Avaliação técnica e econômica do forwarder na extração de madeira em povoamento de eucalipto de primeiro corte. **Floresta**, p. 711-720, 2010.

SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N.; ASSIRELLI, A.; MARTINS, J. P.; MIHELIČ, M. A long-term follow-up study of slash bundling in fast-growing eucalypt plantations. **Forests**, v. 12, n. 11, p. 1548, 2021.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R. A. J; ROCHA, F. A.; SANTOS, L. C; SILVA, C. S. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis-BA. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

TSIOTAS, D.; KANTARTZIS, A.; KOLKOS, G.; LEMONAKIS, P.; ARABATZIS, G. A modularity total environment network model for sustainable forest transportation. **Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration**, v. 8, n. 4, p. 1057-1073, 2023.

VENÂNCIO, O. G.; BRITO, S. C. M.; CORVELONI, E. P. M.; SAES, E. V.; LAGOIN, T. G. Identificação de gargalos na função de técnico de treinamento de operadores de máquinas florestais: estudo de caso em uma empresa de celulose. **Revista delos**, v. 17, n. 61, p. e2836-e2836, 2024.

VERACEL. **Relatório de Sustentabilidade 2023**. Disponível em: <<https://www.veracel.com.br/wp-content/uploads/2024/05/Relatorio-Sustentabilidade-2023-Veracel-Celulose-15-05-24.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2024.

WENHOLD, R.; ACKERMAN, P.; ACKERMAN, S.; GAGLIARDI, K. Skills development of mechanized softwood sawtimber cut-to-length harvester operators on the Highveld of South Africa. **International Journal of Forest Engineering**, v. 31, n. 1, p. 9-18, 2020.

## CAPÍTULO 2

### **Gestão eficiente da operação de extração da florestal: Quais melhorias podemos encontrar com a digitalização dos apontamentos?**

#### **1. INTRODUÇÃO**

A mecanização da colheita florestal desempenha um papel crucial na garantia do fornecimento de madeira para as indústrias de base florestal. Além do aumento da produtividade, ao permitir maior volume de madeira processada por unidade de tempo, as máquinas têm proporcionado melhorias significativas no ambiente de trabalho dos operadores florestais (LA HERA et al., 2024). Quando combinada com a implementação de sistemas de telemetria, que possibilitam o monitoramento em tempo real da operação, a mecanização torna-se ainda mais eficiente (CASTILLO-RUIZ et al., 2015).

Anteriormente, o registro manual das paradas das máquinas exigia a digitalização dos dados para posterior análise. Com a digitalização do apontamento, os operadores conseguem registrar os dados em tempo real, o que possibilita um acompanhamento constante por parte do gestor da operação e uma resposta mais rápida a eventuais falhas (MUNIS et al., 2022).

Apesar dos vários benefícios, a utilização das máquinas exige além dos apontamentos corretos, uma gestão eficiente para garantir a rentabilidade e a produção esperada, principalmente devido aos altos custos de aquisição e manutenção (MARQUES et al., 2022). A eficiência da operação depende, em grande parte, da gestão das paradas, que podem ser classificadas em operacionais e mecânicas.

As paradas operacionais estão relacionadas a fatores como trocas de turno, pausas pessoais e regulamentares, reabastecimento e ajustes das máquinas, enquanto as mecânicas são decorrentes de falhas, manutenção preventiva ou corretiva, e desgaste das máquinas e equipamentos (COSTA et al., 2017). A capacidade de monitorar e compreender as causas e a frequência dessas interrupções é essencial para melhorar a disponibilidade e o desempenho das máquinas, minimizando impactos na produção (SILVA et al., 2022).

A taxa de utilização das máquinas leva em consideração a disponibilidade mecânica e a eficiência operacional, indicando o percentual de tempo em que a

máquina foi efetivamente utilizada em comparação com o tempo disponível para a operação. Quando esses fatores são superestimados, durante o planejamento, pode haver um aumento dos custos reais e o comprometimento do abastecimento fabril, afetando a rentabilidade do setor (ROBERT et al., 2017).

Embora algumas paradas sejam essenciais para o bem-estar e a segurança dos operadores e das máquinas, a compreensão e a gestão das interrupções são fundamentais para a redução do tempo ocioso e da melhor taxa de utilização das máquinas (LINHARES et al., 2012; SILVA et al., 2022). Uma gestão operacional adequada permite identificar padrões e causas recorrentes, permitindo a implementação de estratégias para reduzir o tempo de inatividade das máquinas (SILVA, et al., 2022).

A análise aprofundada desses fatores, permite uma aplicação prática no dia a dia da operação, tornando a alocação dos recursos e da mão de obra disponível mais assertiva, aumentando o bem-estar da operação e contribuindo para a maior competitividade e evolução do setor florestal.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Analisar a operação de baldeio da colheita florestal com foco na gestão das paradas das máquinas.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Analisar as paradas operacionais: identificar e categorizar as principais causas das paradas operacionais, diferenciando entre paradas planejadas e não planejadas, e avaliando o seu impacto no desempenho da operação.
- Avaliar as paradas de manutenção: identificar e categorizar as principais causas das paradas mecânicas, diferenciando entre paradas planejadas e não planejadas, avaliando o seu impacto no desempenho da operação.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Caracterização da área

O estudo foi realizado em plantios florestais de eucalipto pertencentes a uma empresa de celulose e papel localizados no município de Eunápolis, estado da Bahia (Figura 8). A empresa utiliza como matéria prima para seu processo industrial a fibra de eucalipto, e realiza todo o ciclo produtivo da espécie, desde o viveiro até a colheita. Seus plantios são realizados em espaçamento 3x3 metros e todo o manejo é realizado para garantir maior produtividade das florestas.

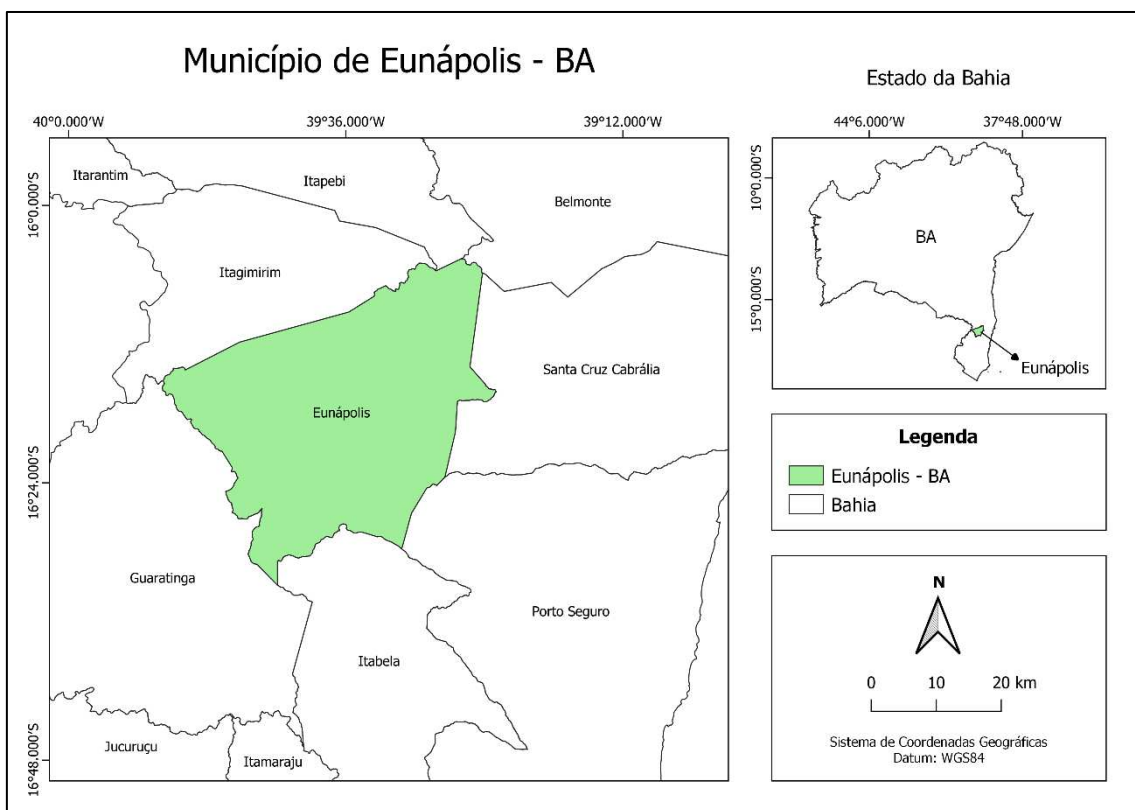


Figura 8: Localização do município onde foi realizado a coleta de dados para o estudo.

O clima é considerado subúmido, com vegetação característica da Mata Atlântica, temperatura média anual de 23,2 °C e precipitação média anual variando entre 1000 e 1200 mm (TAGLIAFERRE et al., 2010).

### 3.2. Caracterização da operação florestal

O sistema de colheita florestal utilizado na empresa é o de toras curtas (*cut-to-length*). Nesse sistema, a empresa utiliza o comprimento padrão de 6,2 metros, em que as toras são cortadas com o uso de *Harvester* e extraídas do interior do talhão utilizando-se *Forwarder*.

A operação de colheita florestal é composta por três turnos diários de 8 horas cada., sendo:

- Turno 1: início às 07 horas e término às 15 horas;
- Turno 2: início às 15 horas término às 23 horas;
- Turno 3: início às 23 horas término às 07 horas.

Os dados analisados são provenientes de três *Forwarders* da marca Komatsu, modelo 895, 6x6, de pneus, com motor de potência 214 kW (Figura 9).



Figura 9: *Forwarder* Komatsu modelo 895 utilizado como fonte de dados para operação de baldeio utilizada nessa pesquisa. Fonte: Divulgação Komatsu.

### 3.3. Coleta de dados

Os dados foram coletados em um período de seis meses entre outubro de 2023 e março 2024, totalizando 7020 horas da operação ao longo dos três turnos de operação.

As informações foram obtidas do apontamento digital da operação pelos operadores, sendo: data, horas totais de operação, horas produtivas, horas em manutenção e horas em paradas operacionais.

### 3.3.1. Organização dos dados

Cada interrupção da operação pode ser classificada entre 45 motivos distintos. Os apontamentos originais foram reorganizados, no software Excel, em 10 classes de paradas operacionais e sete classes de paradas de manutenção (Tabela 10).

Tabela 10: Reclassificação das paradas operacionais.

<b>PARADAS OPERACIONAIS</b>				
<b>Número</b>	<b>Classe</b>	<b>Estado</b>	<b>Tempo (horas:minutos)</b>	<b>Tempo Total (horas:minutos)</b>
<b>1</b>	Paradas pessoais	Refeição	762:13	768:24
		Necessidades Fisiológica	6:11	
<b>2</b>	Pausas	Quebra de Rotina	191:47	329:17
		Instalação de Esteiras	6:20	
		Inspeção	52:47	
		Marcação Pilha	10:33	
		Parada Deliberada	11:50	
		Logout forçado	56:00	
<b>3</b>	Deslocamento	Deslocamento Máquina	54:23	167:53
		Aguardando Prancha	0:19	
		Transporte Prancha	56:00	
		Mudança Talhão	57:11	
<b>4</b>	Limpeza	Limpeza da Máquina	127:18	131:54
		Lavagem Semanal	4:19	
		Limpeza de Folhas	0:17	
<b>5</b>	Atrasos	Atraso Trabalhador Interno	7:03	88:02
		Atraso Transporte	23:22	
		Aguardando Mão de Obra	48:04	
		Falta Operador	0:40	
		Atraso Distância	0:49	
		Atraso Via Interditada	6:12	
		Retrabalho	1:52	
<b>6</b>	Abastecimento	Falta Combustível	1:43	68:27
		Aguardando Comboio	8:52	
		Abastecimento em Manutenção	57:52	
<b>7</b>	Troca de turno	Troca de Turno	48:23	48:23

8	Acidentes / Máquina Atolada	Máquina Atolada  Acidente	42:00  0:00	42:01
		DDS	0:10	
9	Treinamento e Reunião	Instrução / Treinamento	4:58	25:22
		Reunião VCC	3:03	
		Reunião Sindicato	17:11	
10	Parada climática	Parada Climática	17:55	17:55
<b>Total</b>			1687:50	1687:50

As paradas de manutenção foram reclassificadas em 6 classes (Tabela 11).

Tabela 11: Reclassificação das paradas de manutenção

<b>MANUTENÇÃO</b>				
<b>Número</b>	<b>Classe</b>	<b>Estado</b>	<b>Tempo (horas:minutos)</b>	<b>Tempo Total (horas:minutos)</b>
1	Revisão preventiva	Revisão Preventiva	94:53	94:53
2	Reparos	Reparo de Máquina	55:24	82:55
		Reparo da Grua	25:57	
		Reparo da Garra	1:34	
3	Falta de peça	Falta de Peça	24:31	24:31
4	Manutenção periférica	Manutenção Periférica	3:51	3:51
5	Troca de pneu	Troca pneu	3:37	3:37
6	Aquecimento da máquina	Aquecimento Máquina	0:27	0:27
<b>Total</b>			<b>210:17</b>	<b>210:17</b>

Para minimizar as interferências, todas as classes de paradas foram analisadas de forma geral e detalhada considerando as variáveis de turnos e dias da semana, gerando as análises descritivas da operação.

Por serem essenciais para a segurança, o bem-estar e os direitos dos operadores de máquinas, as paradas pessoais foram desconsideradas nas análises descritivas. As demais classes de paradas foram analisadas retirando as paradas pessoais do total, tendo em vista ao seu grande volume e a impossibilidade de se alterar o tempo gasto para as necessidades pessoais dos operadores das máquinas (Tabela 12).

Tabela 12: Horas e porcentagem das paradas operacionais sem paradas pessoais

<b>Classe</b>	<b>Horas</b>	<b>Porcentagem</b>
Pausas	329:19:00	35,82%
Deslocamento	167:54:00	18,26%
Limpeza	131:55:00	14,35%
Atrasos	88:03:00	9,58%
Abastecimento	68:27:00	7,45%
Troca de turno	48:23:00	5,26%
Acidentes / Máquina Atolada	42:01:00	4,57%
Treinamento e Reunião	25:24:00	2,76%
Parada climática	17:55	1,95%
<b>Total</b>	<b>919:21</b>	<b>100,00%</b>

### 3.3.2. Indicadores avaliados

Além das análises descritivas das paradas, o desempenho da operação foi calculado por meio de três indicadores, sendo:

#### 3.3.2.1. Disponibilidade mecânica

A disponibilidade mecânica (%) é o percentual do tempo em que uma máquina esteve apta a realizar sua atividade do total programado para a operação, e é calculado pela equação, a seguir (Eq 1):

$$DM = 1 - (Hm / HT)$$

Em que: DM é a disponibilidade mecânica (em %); Hm são as horas em paradas mecânicas das máquinas (em h); HT são as horas totais programadas para a operação (em h).

#### 3.3.2.2. Eficiência operacional

O cálculo da eficiência operacional (%) é o percentual do tempo em que a máquina realizou sua atividade, desconsiderando as paradas mecânicas, isto é, do tempo em que a máquina esteve apta a operar, quanto tempo ela estava de fato em operação, e é calculado através da seguinte equação (Eq 2):

$$EO = 1 - (Hpo / (He + Hpo))$$

Em que: EO é a eficiência operacional da operação (em %); Hpo é o tempo em horas de paradas operacionais (em h); He são as horas efetivas de trabalho (em h).

### 3.3.2.3. Taxa de utilização

A taxa de utilização (%) é dada pelo produto da eficiência operacional e da disponibilidade mecânica. E pode ser expressa pela seguinte equação (Eq 3):

$$TU = EO * DM$$

Em que: TU é a taxa de utilização (em %); EO é a eficiência operacional (em %); DM é a disponibilidade mecânica (em %).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Indicadores da operação de operação

Os dados analisados totalizam 7020 horas na operação, dessas, 5122 horas são de operação efetiva, 210 horas de paradas de manutenção e 1687 horas de paradas operacionais.

Dentre os três turnos analisados, todos apresentam quantidades semelhantes de operação, sendo o turno noturno (turno 3) com maior quantidade de horas (Tabela 13).

Tabela 13: Horas da operação por turno.

Turno	Paradas por Manutenção	Operação	Paradas Operacionais	Total
<b>Turno 1</b>	153:57	1618:42	554:06	2326:46
<b>Turno 2</b>	30:23	1737:12	569:42	2337:18
<b>Turno 3</b>	25:56	1766:33	564:01	2356:30
<b>Total</b>	<b>210:17</b>	<b>5122:28</b>	<b>1687:50</b>	<b>7020:36</b>

Os indicadores encontrados para a operação, no período avaliado, foram de 97,00% para a disponibilidade mecânica, 75,22% para eficiência operacional e 72,96% para taxa de utilização.

Os 3 turnos apresentam valores semelhantes para a eficiência operacional. Já para a disponibilidade mecânica, o turno 1 possui o menor valor. Consequentemente, a taxa de utilização do turno 1 é a menor entre os 3 turnos (Tabela 14).

Tabela 14: Indicadores da operação por turno.

Turno	DM (%)	EO (%)	TU (%)
<b>Turno 1</b>	93,38	74,50	72,86
<b>Turno 2</b>	98,70	75,30	74,98
<b>Turno 3</b>	98,90	75,80	75,52
<b>Geral</b>	<b>97,00</b>	<b>75,22</b>	<b>72,96</b>

### 4.3. Paradas operacionais

As paradas foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 10).

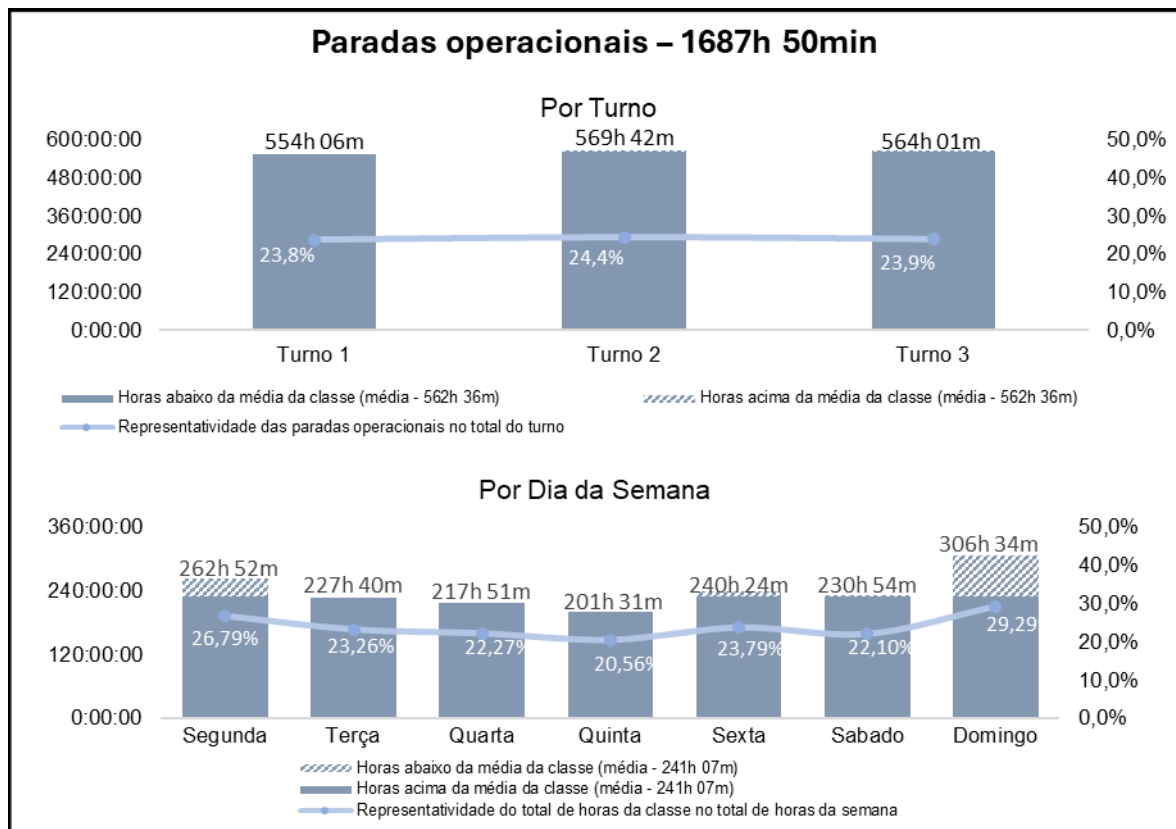


Figura 10: Análise gráfica das paradas operacionais.

As paradas operacionais representam 89% das paradas totais. A classe com maior influência na eficiência operacional, “Paradas pessoais” representa 46% das interrupções, sendo refeição o motivo de maior impacto na classe. Para as demais análises descritivas (análises gerais, por dia de semana e turno), as Paradas pessoais foram retiradas, sendo então a classe “Atrasos” com a maior representatividade, 36% (Figura 11).

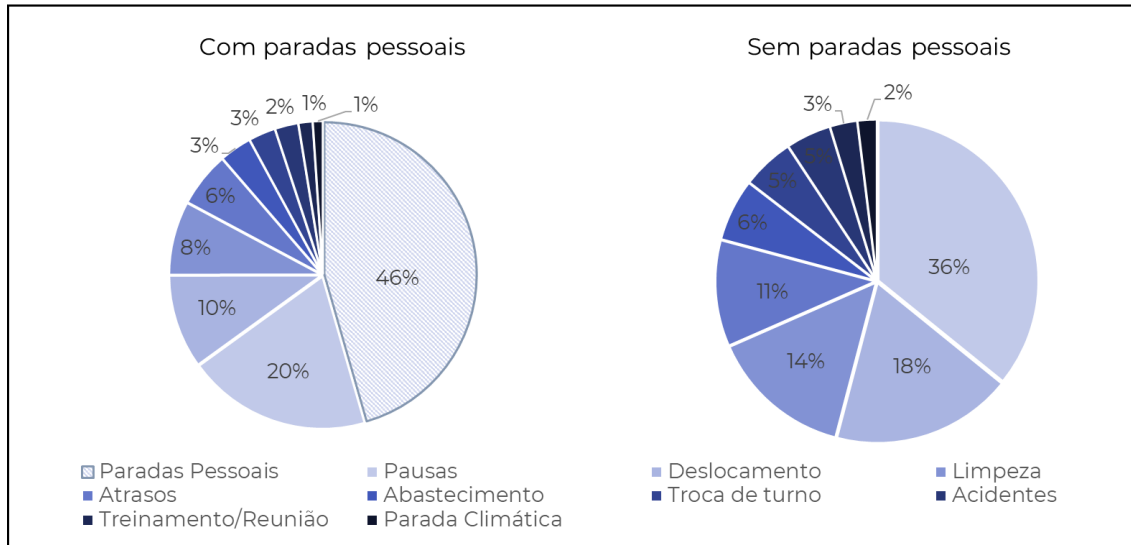


Figura 11: Porcentagem das paradas operacionais.

Desconsiderando as paradas pessoais, a eficiência operacional da operação aumenta, a disponibilidade mecânica diminui, e a taxa de utilização também aumenta (Tabela 15).

Tabela 15: Características da operação

Paradas operacionais	DM (%)	EO (%)	TU (%)
Com paradas pessoais	97,00	75,22	72,93
Sem paradas pessoais	96,64	84,78	81,93

#### 4.3.1. Pausas

As pausas representam 35,82% das paradas operacionais. Dentre os motivos presentes dentro da classe pausas, a quebra de rotina tem a maior porcentagem de contribuição, representando 58,2% (Tabela 16).

Tabela 16: Paradas por pausas

Pausas (35,82%)		
Componentes	Horas	%
Quebra de Rotina	191:47:24	58,2%
Instalação de Esteiras	6:20:24	1,9%
Inspeção	52:47:24	16,0%
Marcação Pilha	10:33:36	3,2%
Parada Deliberada	11:50:24	3,6%
Logout forçado	56:00:00	17,0%
<b>Total Geral</b>	<b>329:19:12</b>	<b>100%</b>

As paradas por pausas foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 12).

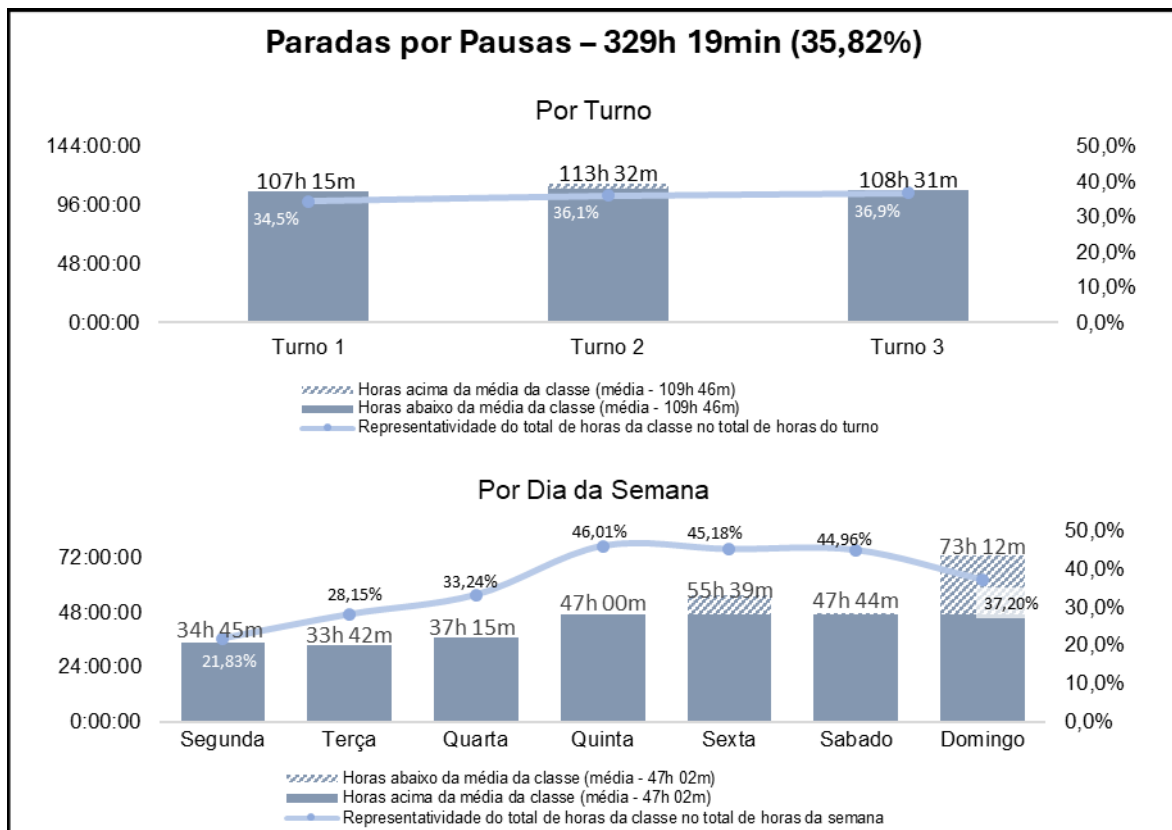


Figura 12: Análise gráfica das paradas por pausas.

#### 4.3.2. Deslocamento

O deslocamento representa 18,26% das paradas operacionais. Dentre os motivos presentes dentro da classe, a mudança de talhão tem a maior porcentagem de contribuição, representando 34,1% (Tabela 17).

Tabela 17: Paradas por deslocamento

<b>Deslocamento (18,26%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Deslocamento da Máquina	54:23:24	32,4%
Aguardando Prancha	0:19:48	0,2%
Transporte Prancha	56:00:00	33,4%
Mudança de Talhão	57:11:24	34,1%
<b>Total Geral</b>	<b>167:54:36</b>	<b>100,0%</b>

As paradas por deslocamento foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 13).

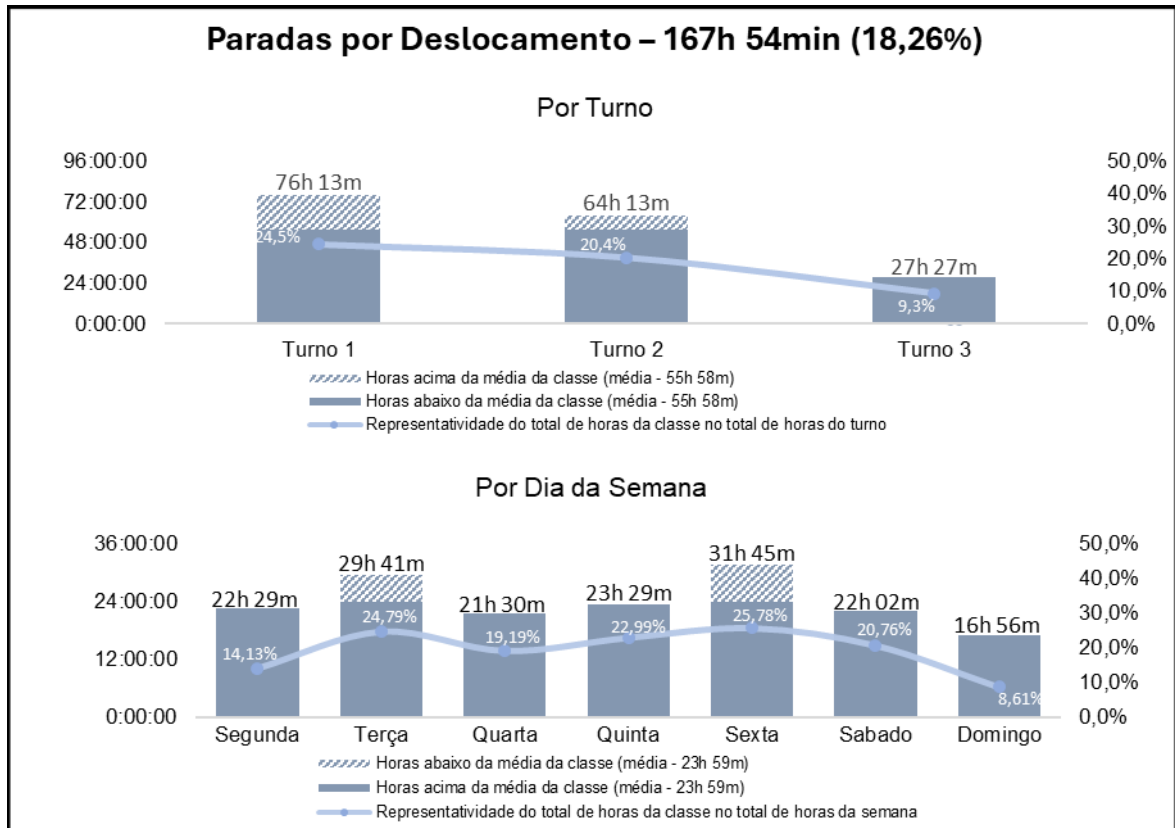


Figura 13: Análise gráfica das paradas por deslocamento.

### 4.3.3. Limpeza

A limpeza representa 14,35% das paradas operacionais. Dentre os motivos presentes dentro da classe, a limpeza da máquina tem a maior porcentagem de contribuição, representando 96,5% (Tabela 18).

Tabela 18: Paradas por manutenção limpeza

<b>Limpeza (14,35%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Limpeza da Máquina	127:18:36	96,5%
Lavagem Semanal	4:19:48	3,3%
Limpeza de Folhas	0:17:24	0,2%
<b>Total Geral</b>	<b>131:55:48</b>	<b>100,0%</b>

As paradas por limpeza foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 14).

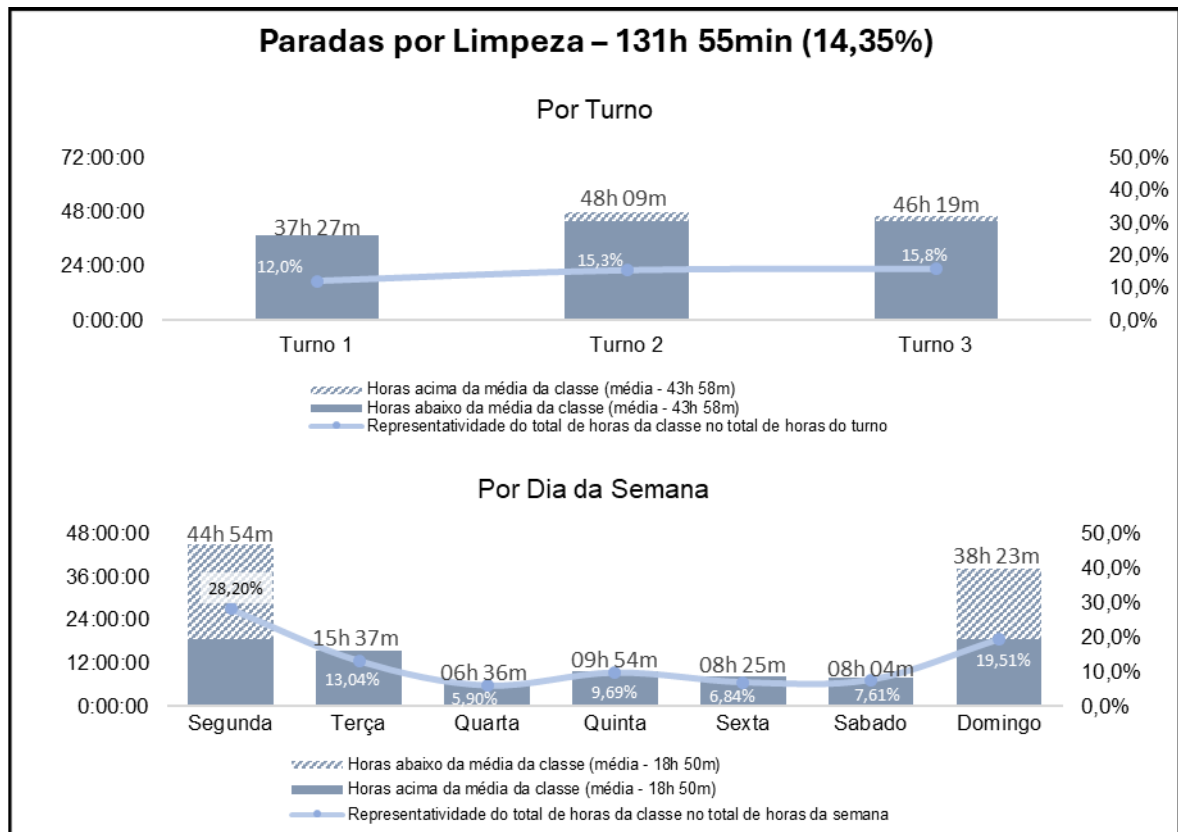


Figura 14: Análise gráfica das paradas por limpeza.

#### 4.3.4. Atrasos

Os atrasos representam 9,58% das paradas operacionais. Dentre os motivos presentes dentro da classe, aguardando mão de obra tem a maior porcentagem de contribuição, representando 54,6% (Tabela 19).

Tabela 19: Paradas por atrasos

<b>Atrasos (9,58%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Atraso trabalhador Interno	7:03:00	8,0%
Atraso Transporte	23:22:12	26,5%
Aguardando Mão de Obra	48:04:12	54,6%
Falta Operador	0:40:12	0,8%
Atraso Distância	0:49:48	0,9%
Atraso por via Interditada	6:12:00	7,0%
Retrabalho	1:52:12	2,1%
<b>Total Geral</b>	<b>88:03:36</b>	<b>100,0%</b>

As paradas por atrasos foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 15).

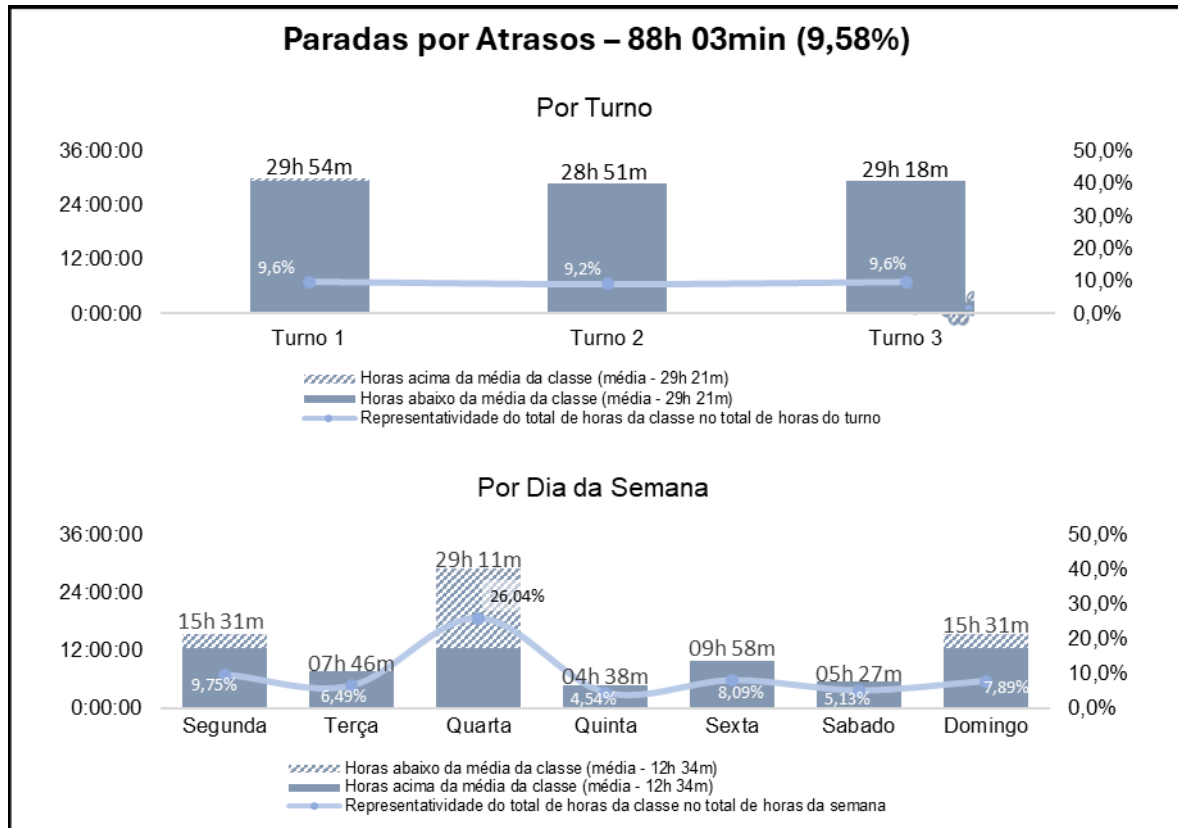


Figura 15: Análise gráfica das paradas por atrasos.

#### 4.4.6. Abastecimento

O abastecimento representa 7,45% das paradas operacionais. Dentre os motivos presentes dentro da classe, abastecimento em manutenção tem a maior porcentagem de contribuição, representando 84,5% (Tabela 20).

Tabela 20: Paradas por abastecimento

<b>Abastecimento (7,45%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Falta Combustível	1:43:12	2,5%
Aguardando Comboio	8:52:12	13,0%
Abastecimento em Manutenção	57:52:12	84,5%
<b>Total Geral</b>	<b>68:27:36</b>	<b>100,0%</b>

As paradas por abastecimento foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 16).

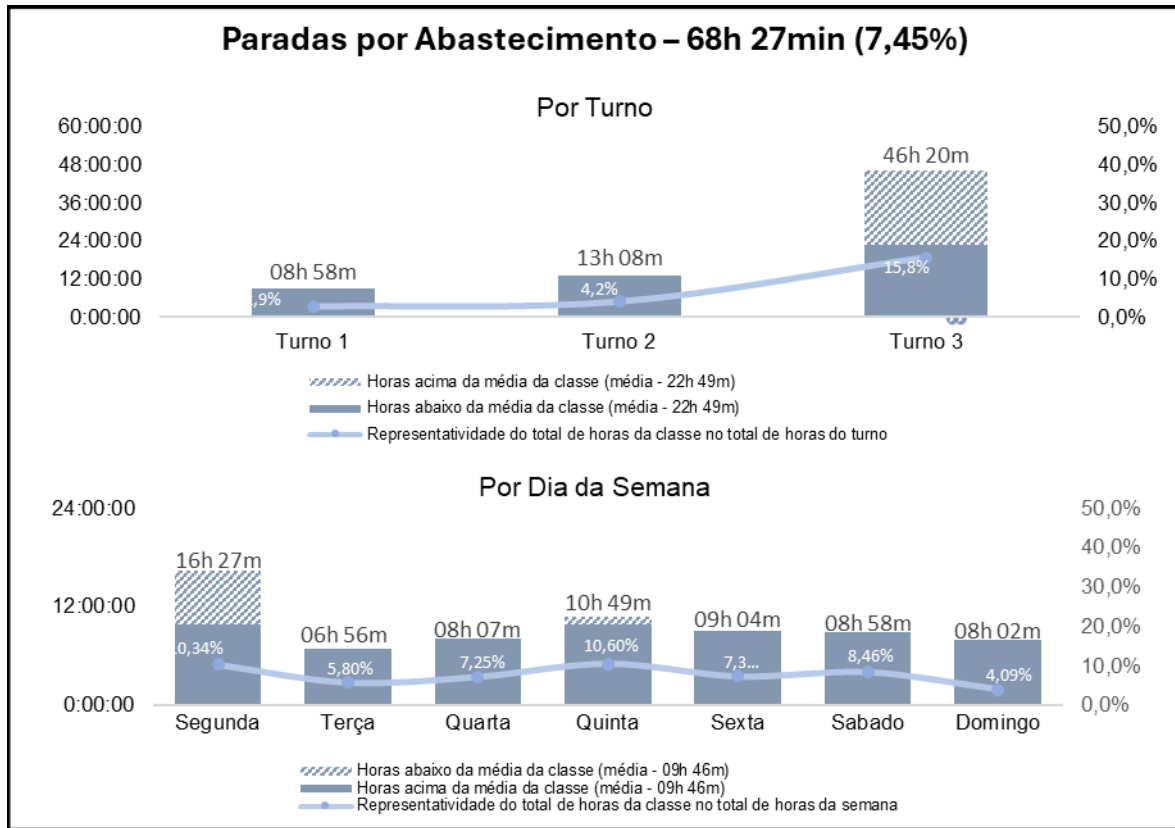


Figura 16: Análise gráfica das paradas por abastecimento.

#### 4.4.7. Troca de turno

A troca de turno representa 5,26% das paradas operacionais. (Tabela 21).

Tabela 21: Paradas por troca de turno

<b>Troca de turno (5,26%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Troca de Turno	48:23:24	100,0%
<b>Total Geral</b>	<b>48:23:24</b>	<b>100,0%</b>

As paradas devido a troca de turno foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 17).

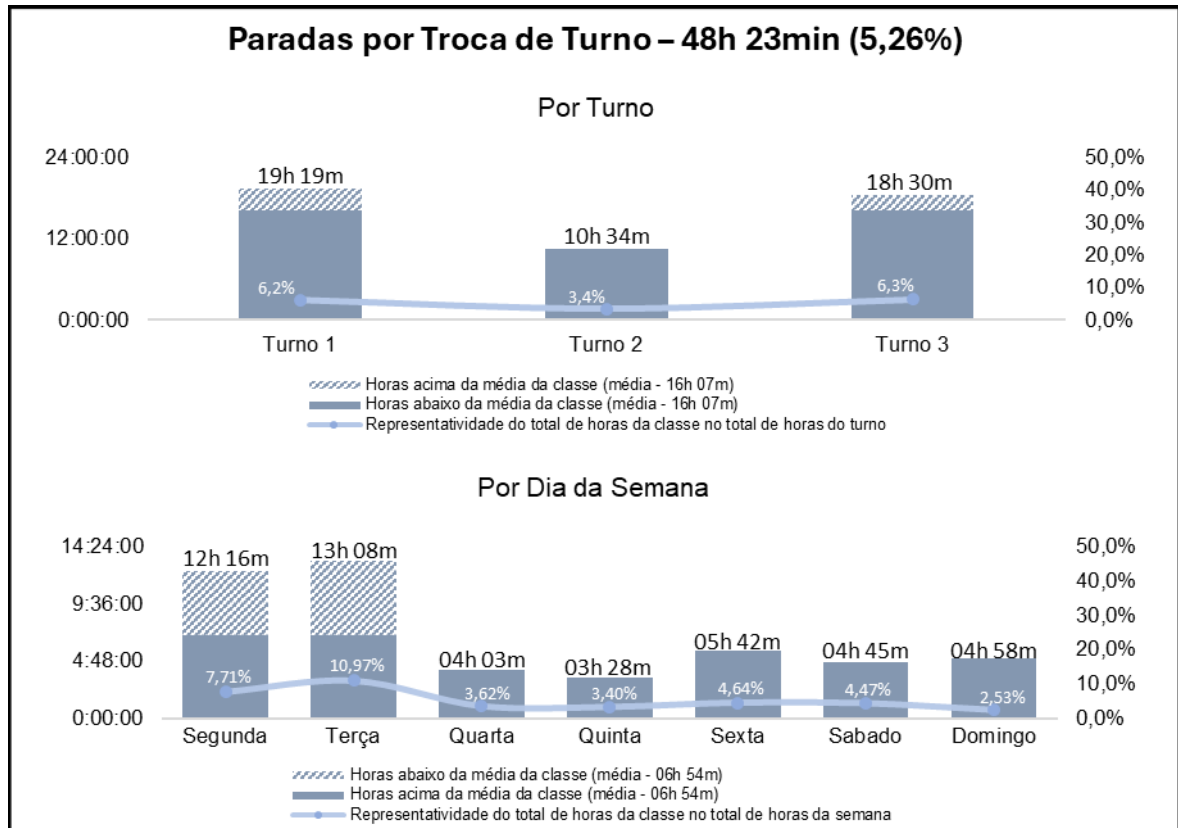


Figura 17: Análise gráfica das paradas por treinamento / reunião

#### 4.4.8. Acidentes

Os acidentes representam 4,57% das paradas operacionais. Dentre os motivos presentes dentro da classe, máquina atolada tem a maior porcentagem de contribuição, representando 99,9% (Tabela 22).

Tabela 22: Paradas por acidentes

<b>Acidentes (4,57%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Acidente	0:00:36	0,0%
Máquina Atolada	42:00:36	100,0%
<b>Total Geral</b>	<b>42:01:12</b>	<b>100,0%</b>

As paradas por acidentes foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 18).

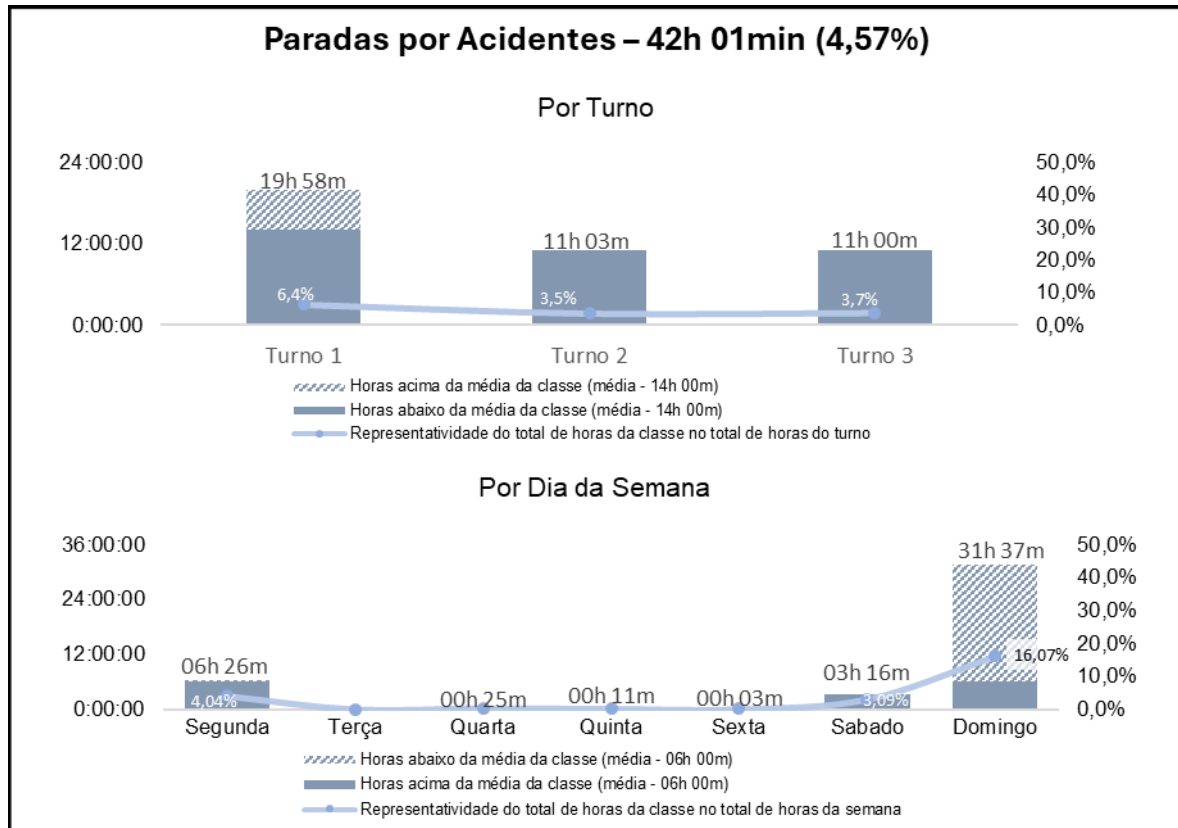


Figura 18: Análise gráfica das paradas por acidentes.

#### 4.4.9. Treinamento

Os treinamentos representam 2,76% das paradas operacionais. Dentre os motivos presentes dentro da classe, reunião de sindicato tem a maior porcentagem de contribuição, representando 67,7% (Tabela 23).

Tabela 23: Paradas por treinamento

<b>Treinamento (2,76%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
DDS	0:10:48	0,7%
Instrução e treinamento	4:58:48	19,6%
Reunião VCC	3:03:36	12,0%
Reunião Sindical	17:11:24	67,7%
<b>Total Geral</b>	<b>25:24:36</b>	<b>100,0%</b>

As paradas por treinamentos foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 19).

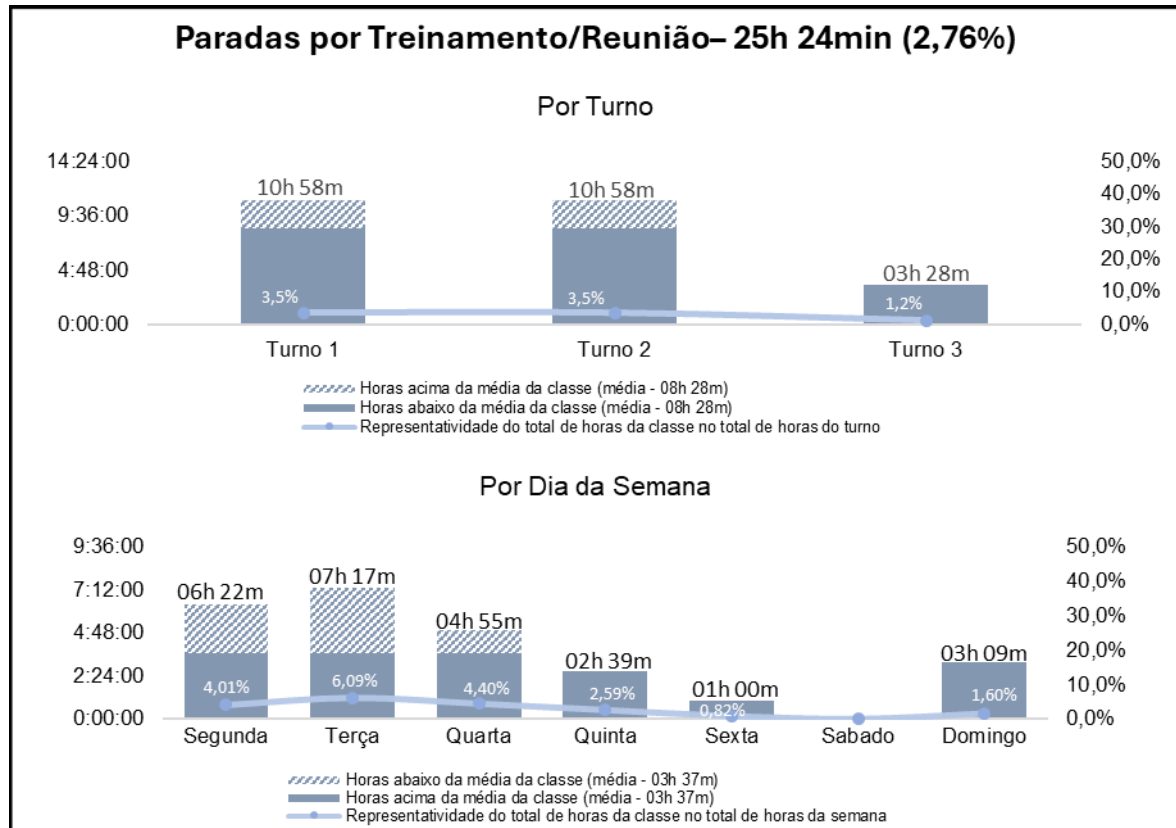


Figura 19: Análise gráfica das paradas por treinamento.

#### 4.4.10. Paradas Climáticas

As paradas climáticas representam 1,95% das paradas operacionais. (Tabela 24).

Tabela 24: Paradas por manutenção preventiva

<b>Paradas climáticas (1,95%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Parada Climática	17:55:48	100,0%
<b>Total Geral</b>	<b>17:55:48</b>	<b>100,0%</b>

As paradas devido a motivos climáticos foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 20).

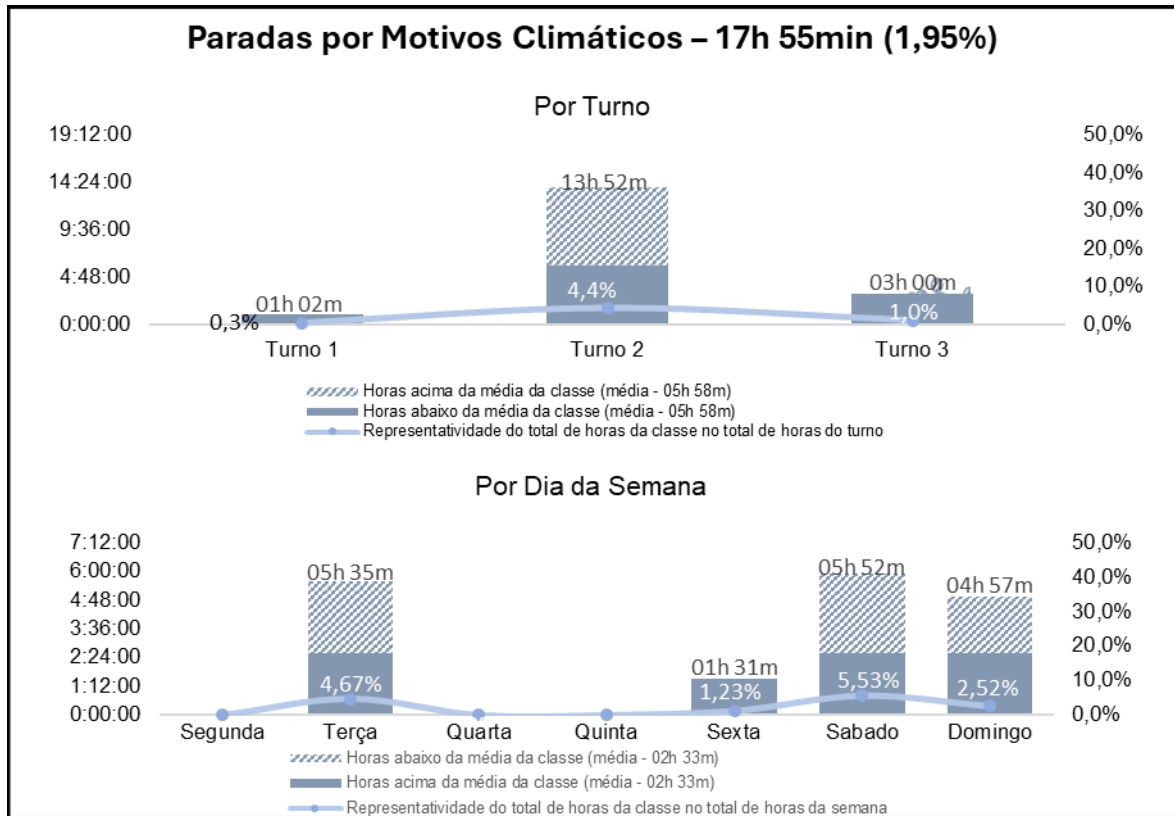


Figura 20: Análise gráfica das paradas por motivos climáticos.

#### 4.5. Paradas mecânicas

As paradas mecânicas representam 11% das paradas totais. A classe de maior influência na disponibilidade mecânica é a “Revisão Preventiva”, que representa 45% das paradas totais (Figura 21).

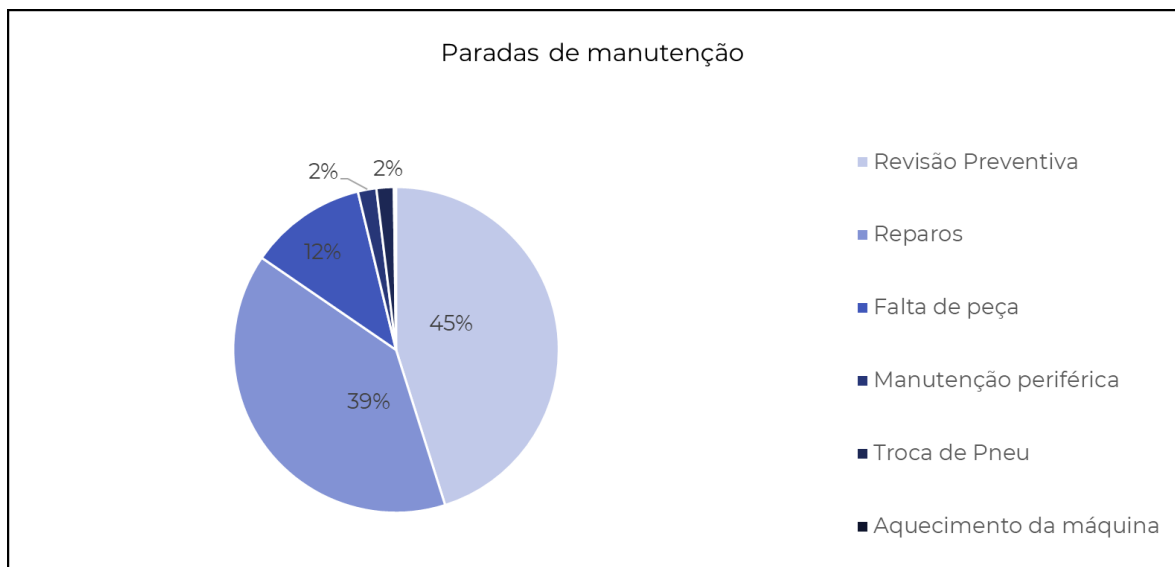


Figura 21: Porcentagem das paradas de manutenção.

As paradas foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 22).

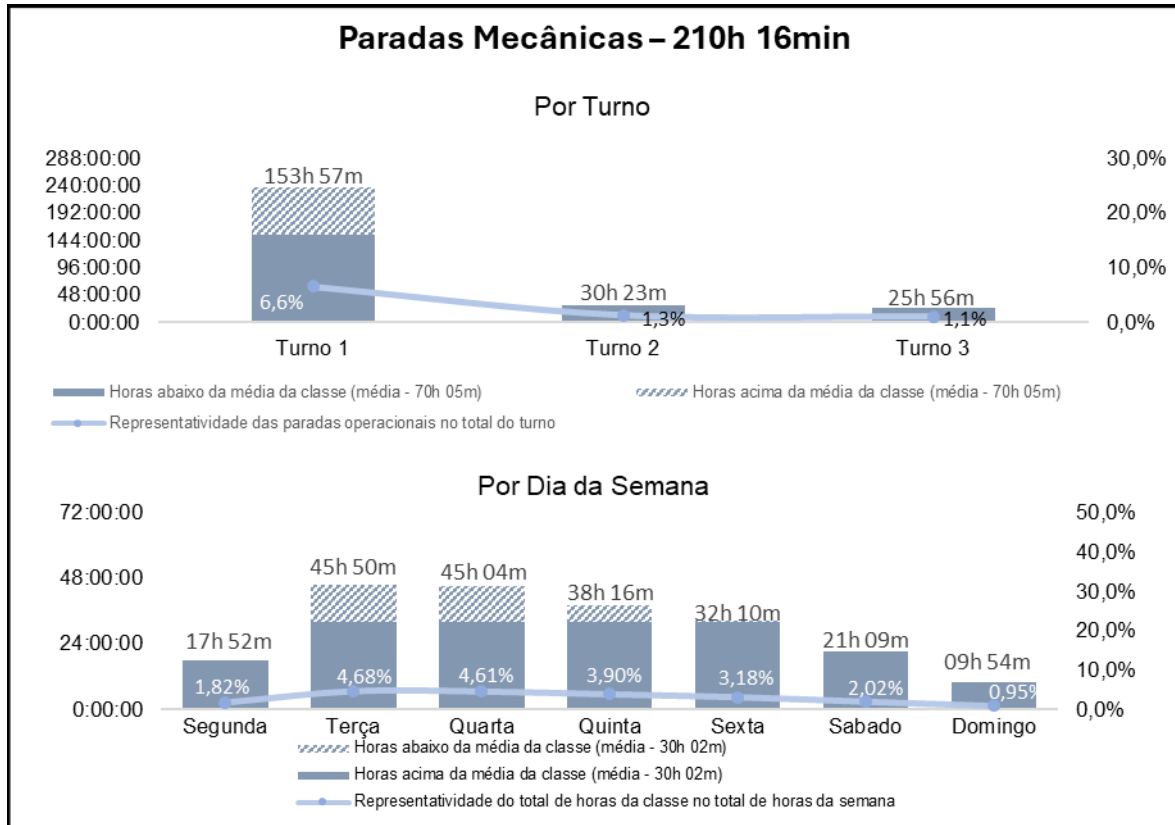


Figura 22: Análise gráfica das paradas de manutenção.

#### 4.5.1. Manutenção preventiva

As paradas devido a manutenção preventiva 45,12% das paradas mecânicas (Tabela 25).

Tabela 25: Paradas por manutenção preventiva

<b>Revisão preventiva (45,12%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Revisão preventiva	94:53:24	100%
<b>Total Geral</b>	<b>94:53:24</b>	<b>100%</b>

As paradas devido a reparos foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 23).

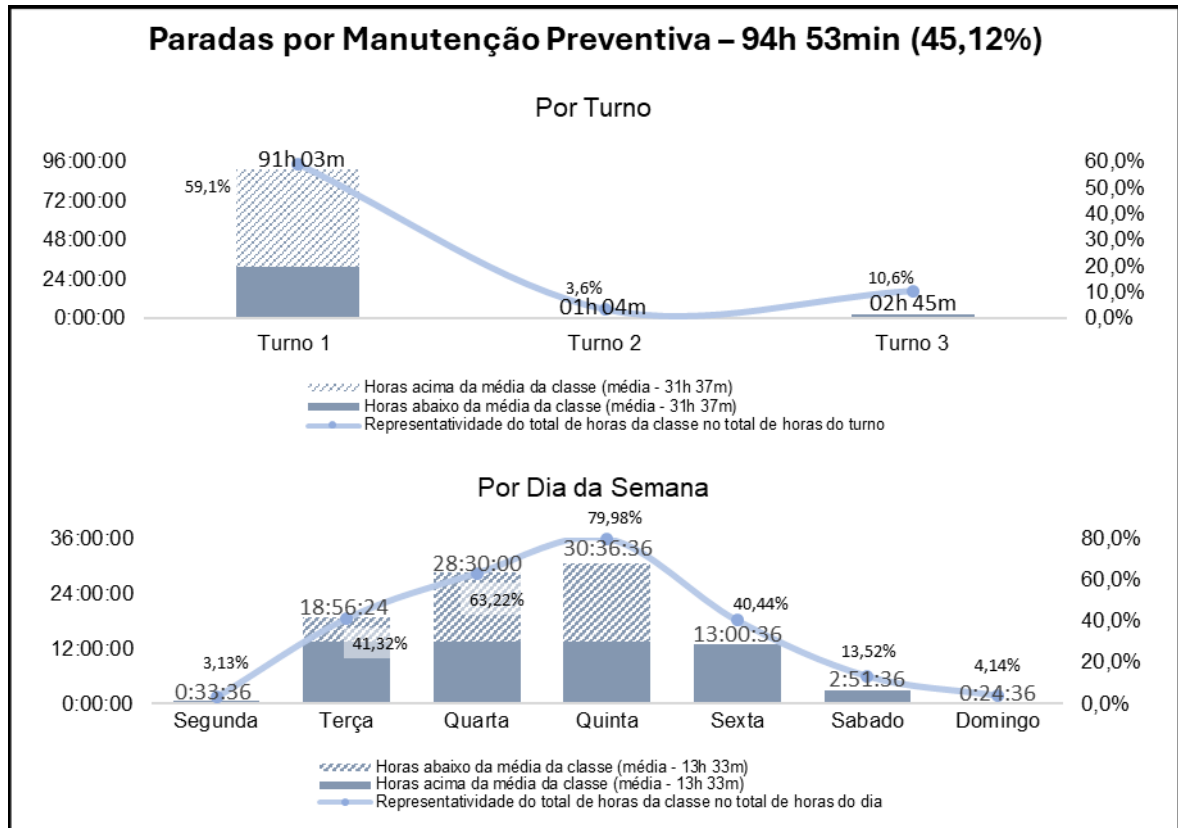


Figura 23: Análise gráfica das paradas por manutenção periférica.

#### 4.5.2. Reparos

As paradas devido a reparos representam 39,44% das paradas mecânicas. Dentre os motivos presentes dentro da classe, reparo da máquina tem a maior porcentagem de contribuição, representando 66,8% das paradas (Tabela 26).

Tabela 26: Paradas por treinamento

<b>Reparos (39,44%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Reparo da máquina	55:24:36	66,8%
Reparo da grua	25:57:00	31,3%
Reparo da garra	1:34:48	1,9%
<b>Total Geral</b>	<b>82:56:24</b>	<b>100,0%</b>

As paradas devido a reparos foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 24).

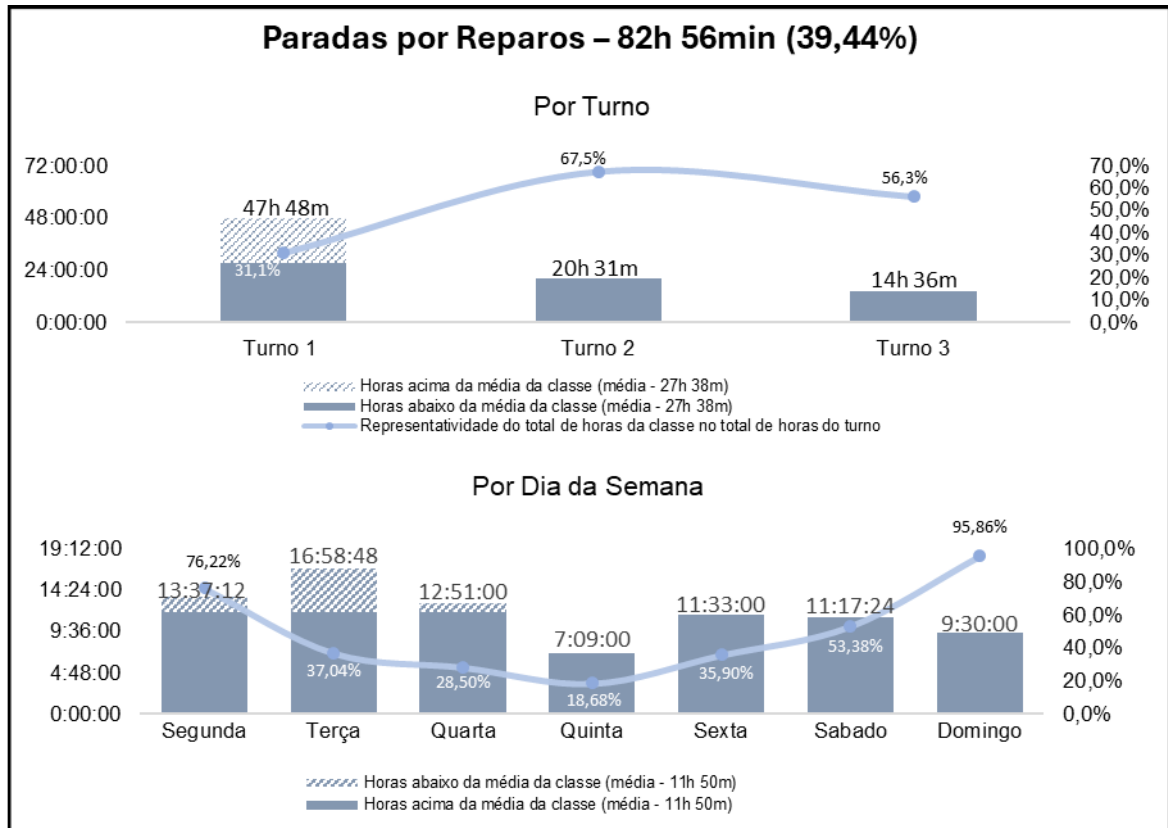


Figura 24: Análise gráfica das paradas por reparo.

#### 4.5.3. Falta de peça

As paradas devido à falta de peças representam 11,66% das paradas mecânicas (Tabela 27).

Tabela 27: Paradas por falta de peça

<b>Falta de peça (11,66%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Falta de peça	24:31:48	100%
<b>Total Geral</b>	<b>24:31:48</b>	<b>100%</b>

As paradas devido à falta de peça foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 25).

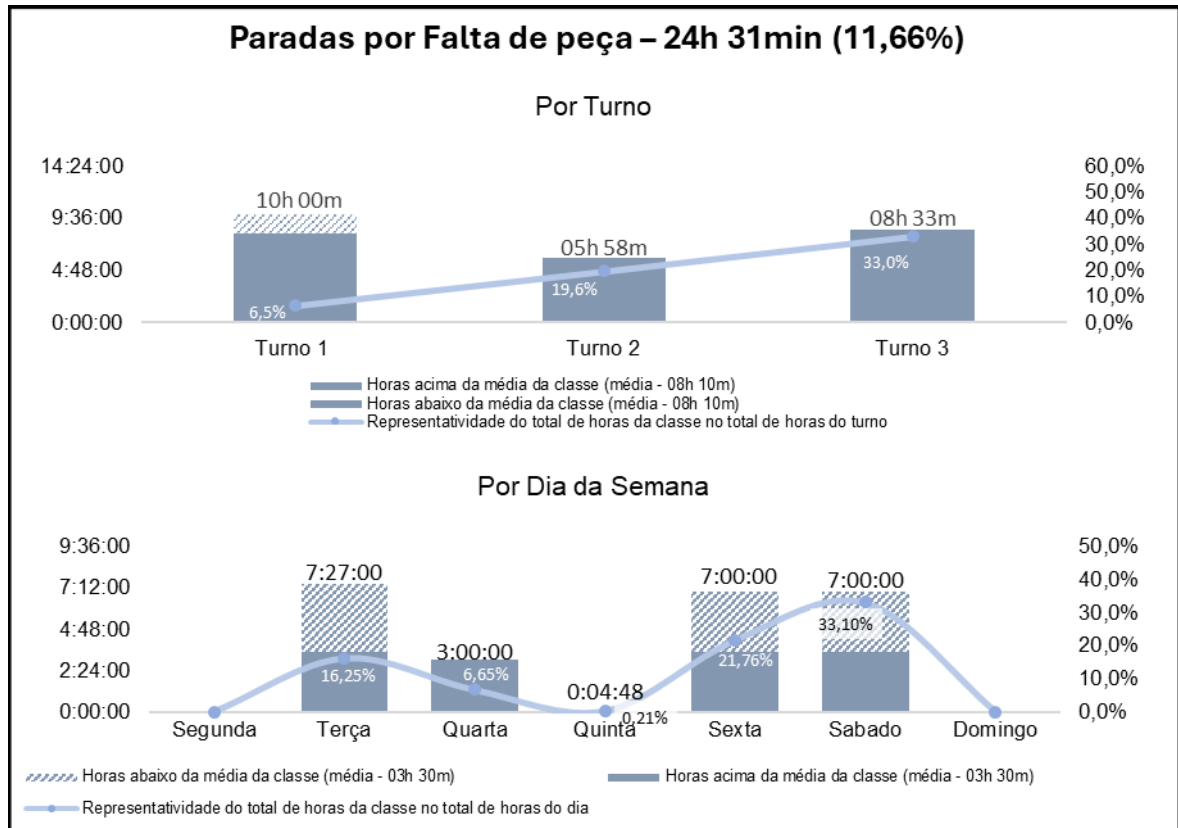


Figura 25: Análise gráfica das paradas por falta de peça.

#### 4.5.4. Manutenção periférica

As paradas devido a manutenção periférica representam 1,84% das paradas mecânicas (Tabela 28).

Tabela 28: Paradas por manutenção periférica

<b>Manutenção periférica (1,84%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Manutenção periférica	03:51:36	100%
<b>Total Geral</b>	<b>03:51:36</b>	<b>100%</b>

As paradas devido a manutenção periférica foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 26).

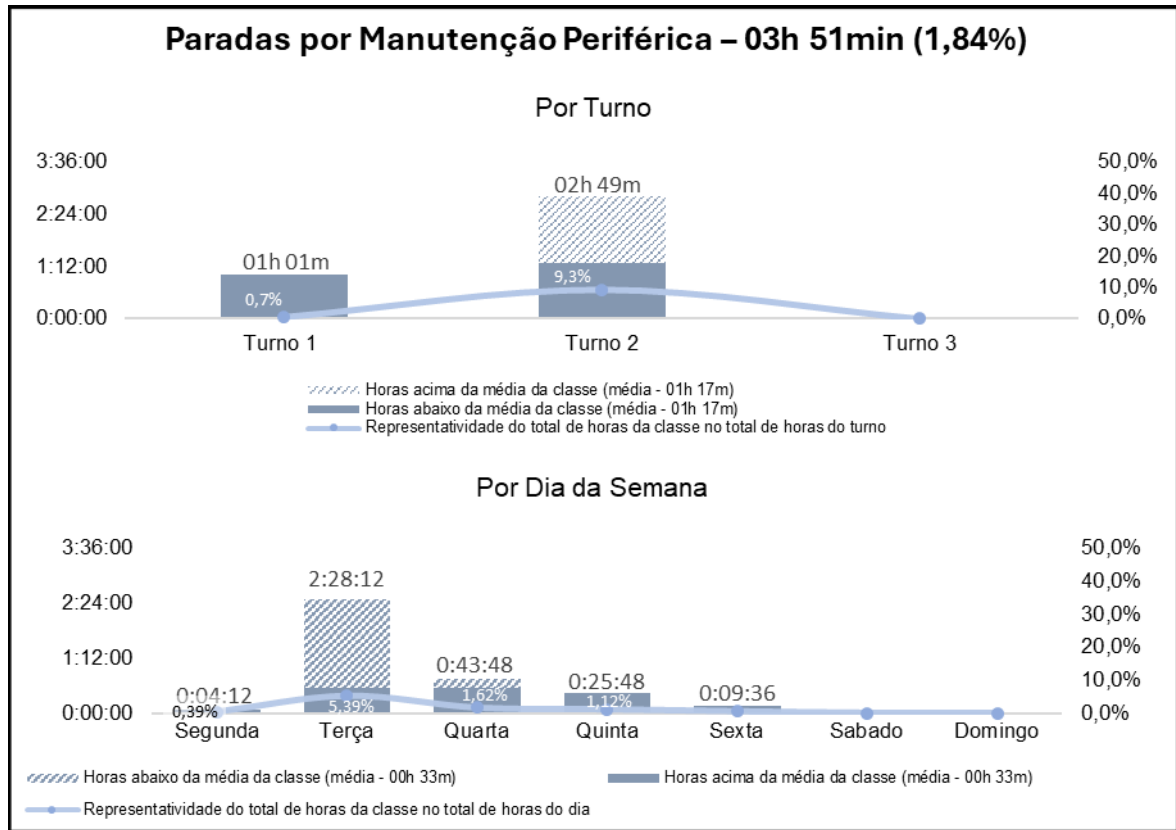


Figura 26: Análise gráfica das paradas por manutenção periférica.

#### 4.5.5. Troca de pneu

As paradas devido a troca de pneu representam 1,72% das paradas mecânicas (Tabela 29).

Tabela 29: Paradas por troca de pneu

<b>Troca de pneu (1,72%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Troca de pneu	03:37:12	100%
<b>Total Geral</b>	<b>03:37:12</b>	<b>100%</b>

As paradas devido a troca de pneu foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 27).

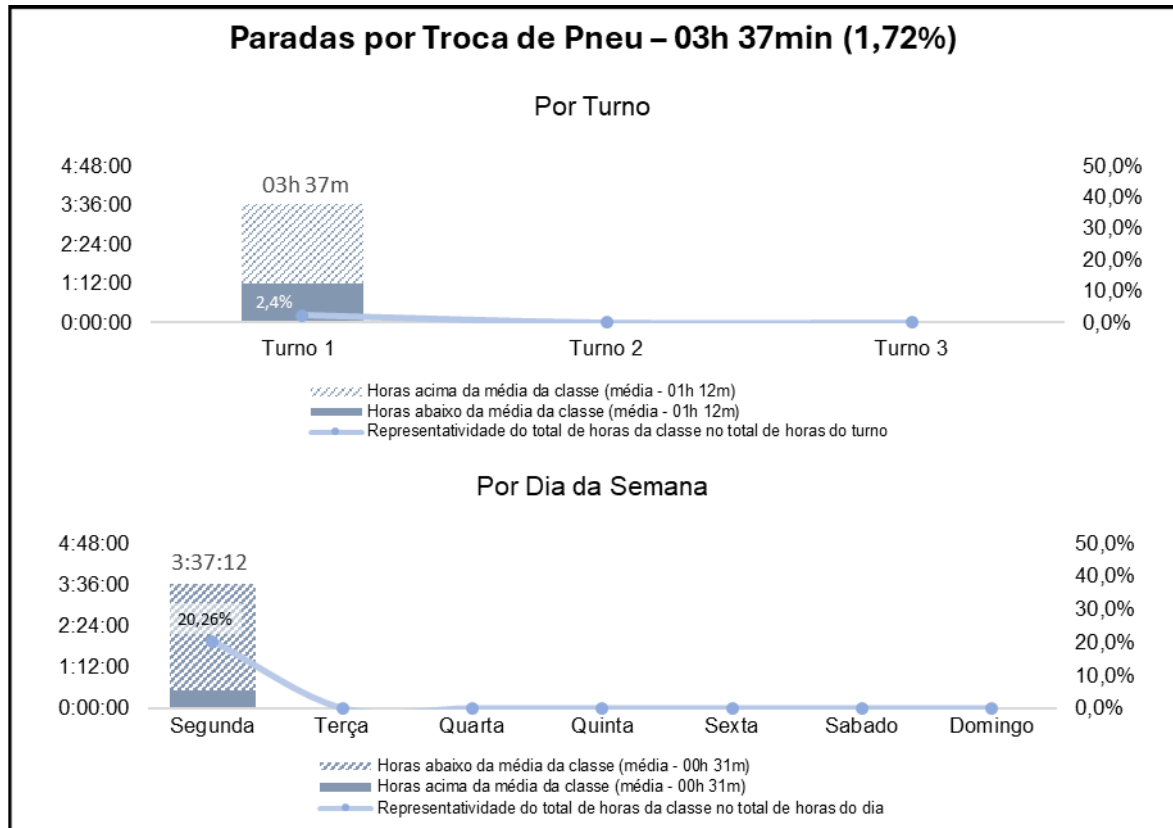


Figura 27: Análise gráfica das paradas por troca de pneu.

#### 4.5.6. Aquecimento da máquina

As paradas devido ao aquecimento das máquinas representam 0,21% das paradas mecânicas (Tabela 30).

Tabela 30: Paradas por manutenção preventiva

<b>Aquecimento da Máquina (0,21%)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Horas</b>	<b>%</b>
Aquecimento da máquina	0:27:00	100%
<b>Total Geral</b>	<b>0:27:00</b>	<b>100%</b>

As paradas devido ao aquecimento da máquina foram classificadas e analisadas de acordo com o turno, máquina e dia da semana (Figura 28).

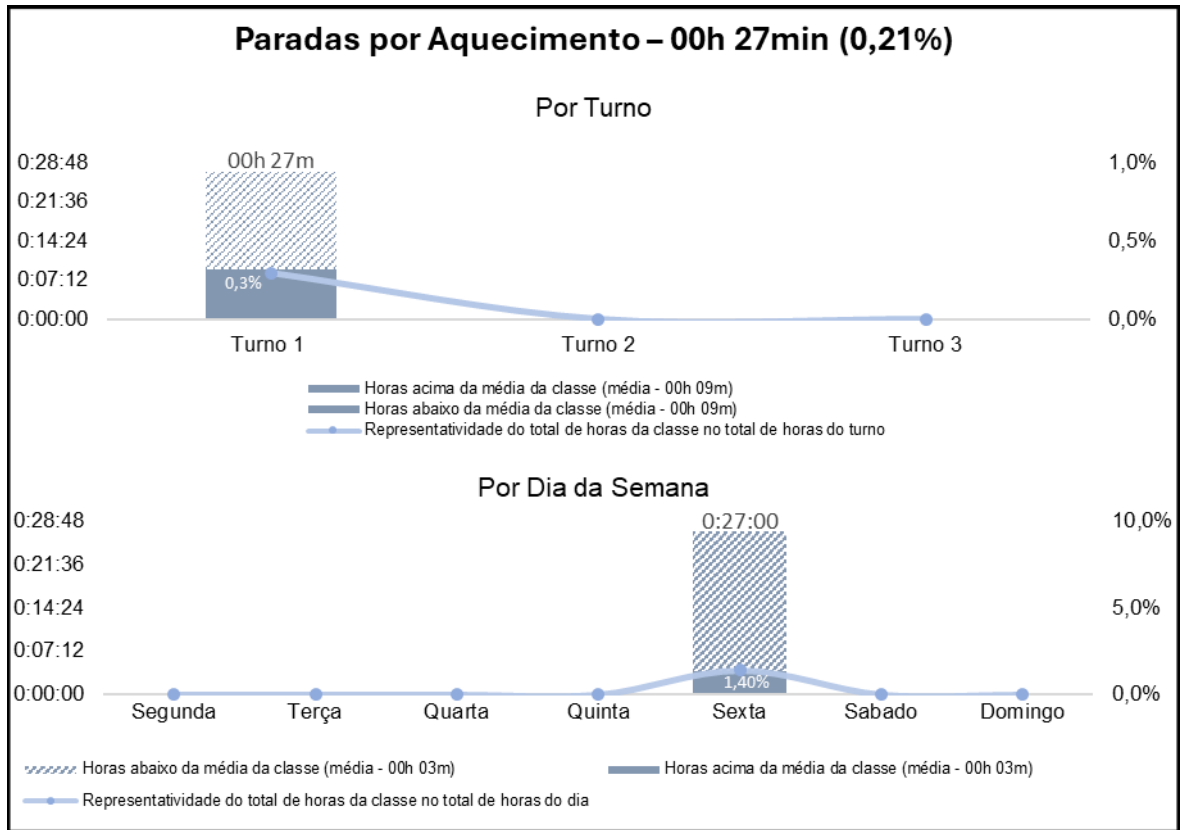


Figura 28: Análise gráfica das paradas por aquecimento das máquinas.

## 5. DISCUSSÕES

O estudo demonstra que a operação analisada apresenta valores satisfatórios de disponibilidade mecânica e eficiência operacional, em que valores acima de 70% para eficiência operacional são considerados satisfatórios (MACHADO, 1998) e valores acima de 92% para máquinas novas e 85% para máquinas seminovas são valores aceitáveis de disponibilidade mecânica para a colheita florestal (FONTES & MACHADO, 2014).

A eficiência operacional encontrada foi de 75%, estudos anteriores realizados em plantios de eucaliptos nos estados de São Paulo apresenta valores superiores ao encontrado na operação analisada, sendo 82,21%, (SIMÕES & FENNER., 2010). Os valores de eficiência operacional diferem de acordo com a inclinação, demonstrado em estudos realizados no Paraná, em que em declividade 10 a 20° a EO encontrada foi de 94,4%, já para declividades de 21 a 30° o valor encontrado foi de 66,3% (LOPES et al., 2016).

Ao analisar as paradas operacionais de forma abrangente, os resultados apresentaram-se semelhantes entre os turnos, máquinas ou dias da semana, como em estudos realizados em plantações de Eucalipto localizados no Paraná (SOARES et al., 2022). O maior componente do tempo de paradas é destinado às pausas pessoais, que inclui refeições e necessidades fisiológicas. Valores consideráveis de 61,28%, para essa categoria, também foram encontrados em estudos realizados no povoamento de Eucalipto no Sul da Bahia (MASIOLI et al., 2024).

Entre as categorias restantes de paradas operacionais, as pausas relacionadas à operação representaram 35,82% do total. Dentro desta categoria, destaca-se a relevância das quebras de rotina para a saúde dos operadores. Os operadores passam longos períodos na mesma posição, realizando movimentos repetitivos e sequenciais, portanto, essas pausas são fundamentais para evitar problemas ergonômicos e garantir o bem-estar. Esses intervalos podem ser aproveitados para atividades como ginástica laboral, que contribuem para a saúde ocupacional do operador (SCHETTINO et al., 2022). Além disso, as inspeções de rotina das máquinas, realizadas antes de cada turno, desempenham um papel essencial na segurança e longevidade das máquinas, além de contribuírem para que não ocorram paradas não planejadas durante a operação.

Os deslocamentos das máquinas representaram 18,26% do total. Esse tempo inclui tanto movimentos internos entre talhões como externos entre projetos. Apesar de inevitáveis, devido à extensão das áreas florestais, esses deslocamentos demandam planejamento logístico rigoroso. Estratégias como rotas otimizadas, adequação das estradas florestais e gestão das condições climáticas podem minimizar os impactos desse componente sobre a eficiência operacional (CASTRO, 2018). Observou-se que os deslocamentos durante o turno noturno (turno 3) são inferiores, refletindo a priorização de movimentações durante o dia, visando maior segurança nessas operações.

A limpeza das máquinas contribuiu com 14,3% das paradas operacionais. Em estudos anteriores, conduzidos em plantios de eucalipto em Minas gerais encontraram valores superiores, totalizando 21,7% para as paradas destinadas à limpeza. (NUNES, 2020). Embora muitas vezes negligenciada, quando se almeja o aumento da produtividade, essa atividade é fundamental para a segurança e o desempenho das máquinas e equipamentos. A remoção de resíduos acumulados, como galhos e terra, evita problemas como superaquecimento e falhas nos sistemas das máquinas. Notou-se que os maiores tempos destinados à limpeza ocorrem nas segundas-feiras e domingos, surgindo oportunidades para integrar essa tarefa a outros períodos de baixa produtividade, com os dias de maiores atrasos operacionais.

Os atrasos representam 9,58% das paradas operacionais, assim como para o deslocamento, a grande extensão dos plantios florestais contribui significativamente para que isso ocorra. Valores maiores foram encontrados em plantios de pinos no Paraná, em que a classe “espera” representou 18% do total analisado (LOPES et al., 2016). No trabalho atual, aguardando mão de obra influencia mais de 50% das paradas da classe, apesar da empresa adotar estratégias de troca de turno que diminuem os atrasos, o deslocamento do alojamento, ou ponto de encontro dos operadores, até as áreas operacionais ainda é considerável. Hoje, considera-se a mão de obra como um grande gargalo do setor florestal, devido à baixa qualificação e a grande rotatividade do setor (SCHETTINO et al., 2020).

O abastecimento representa 7,45% das paradas operacionais, resultado semelhante ao encontrado em estudos, realizado no Espírito Santo e Bahia, com índices de 6% para a operação do *Forwarder* (SILVA et al., 2022). Na operação

analisada, o abastecimento ocorre em janelas de oportunidade, assim, apenas no turno 3, o noturno, há uma maior espera por esse abastecimento.

As trocas de turno somam 5,26% das paradas totais, valor abaixo do encontrado em outro estudo realizado em Minas Gerais, que evidenciou cerca de 28% das paradas destinadas para essa categoria (ALBANO JUNIOR, 2014). No que se refere-se ao setor florestal as trocas são realizadas de duas formas principais, de forma encavalada, em que, quando um turno acaba, os operadores seguintes já estão à espera, prática adotada na empresa estudada, o que contribui para a diminuição do tempo de ociosidade da operação quando comparado ao turno convencional, em que não ocorre essa troca antecipada.

As paradas relacionadas a acidentes, treinamentos e condições climáticas representaram, cada uma, menos de 5% do total. Entretanto, treinamento contínuos são cruciais para aprimorar a experiência dos operadores, reduzir falhas, melhorar a eficiência operacional, diminuindo a rotatividade de funcionários. A formação de operadores qualificados exige investimento significativo em treinamento e acompanhamento (DE ABREU TELES et al., 2024), mas garante a realização de tarefas com maior precisão e rapidez, minimizando a frequência de pausas não planejadas decorrentes da realização das tarefas de forma inadequada.

A disponibilidade mecânica da operação atingiu 97%, de acordo com estudos anteriores realizados em plantios de eucaliptos nos estados de São Paulo e no Sul da Bahia, foram encontrados valores inferiores ao do trabalho atual, sendo 93,6% e 92%, principalmente devido a espera por mão de obra especializada, o que não foi relevante no estudo atual, devido ao modelo de manutenção *full service* adotado pela empresa. (LINHARES et al., 2012; ROBERT et al., 2017), já em povoamento de Pinus no estado do Paraná foram encontrados valores de 99,5% para terrenos em baixa inclinação e 89,3% para inclinações maiores (LOPES et al., 2016).

No setor florestal, predominam dois modelos de manutenção para as máquinas de colheita: o *full service* e o modelo convencional. O *full service* é um serviço contratado, no qual a equipe de manutenção permanece disponível 100% do tempo, atendendo demandas específicas diretamente no campo. Esse modelo reduz significativamente o tempo de ociosidade das máquinas, elevando a disponibilidade mecânica e permitindo uma resposta rápida a problemas. Já o modelo convencional é realizado pela própria empresa, seguindo a rotina padrão de troca de turnos e

enfrenta maior dificuldade no gerenciamento de estoque de peças e na resposta imediata às demandas.

O maior tempo despendido em paradas mecânicas é destinado a manutenção preventiva das máquinas, fundamental para o bom funcionamento, segurança e rendimento da operação (LINHARES et al., 2012). Essas manutenções ocorrem de forma planejada, priorizando-se o primeiro turno da operação, e representam 45% das paradas totais, resultado também encontrado em estudos realizados no sul da Bahia (ALVES et al., 2015).

A presença de todas as peças exigidas na manutenção é um desafio para o setor florestal. Essa característica foi notada principalmente no turno noturno da operação estudada, em que as paradas devido à falta de peça representam 11,66% do total, mas no turno 3, esse valor é quase três vezes maior, totalizando 33% das paradas do turno.

As paradas relacionadas a manutenção periférica, troca de pneu e aquecimento da máquina, representam, cada uma, menos de 5% do total.

A utilização de máquinas com a presença de telemetria, como na operação estudada, tem se mostrado essencial para a gestão das operações florestais (ABREU et al., 2019; NITOSLAWSKI et al., 2021). Esses sistemas permitem o monitoramento em tempo real de indicadores como tempos de ciclo, consumo de combustível, localização das máquinas e causas de paradas, contribuindo para a identificação de gargalos e a otimização das atividades (SILVA, 2021). A análise detalhada desses dados possibilita intervenções mais eficazes e uma gestão estratégica das paradas operacionais (HOLZINGER et al., 2022).

Por fim, o estudo reforça que uma gestão eficiente do *Forwarder* não se limita apenas ao monitoramento contínuo das operações, mas necessita de uma compreensão aprofundada das causas e implicações de cada tipo de parada. Estratégias focadas em manutenções preventivas, treinamento de operadores, aproveitamento das janelas de oportunidade, como as paradas para limpeza, os dias de maiores atrasos e falta de operadores para realizar outras atividades, diminuindo o tempo ocioso, maximizando a produtividade, reduzindo custos e garantindo a sustentabilidade do setor florestal.

## 6. CONCLUSÕES

- A operação de colheita florestal apresenta bons indicadores de disponibilidade mecânica, eficiência operacional e taxa de utilização.
- As paradas operacionais apresentam valores semelhantes entre turnos e dias de semana.
- Para o aumento da produtividade da operação, é possível utilizar das janelas de oportunidades para encaixar paradas que são possíveis de serem planejadas.
- As paradas mecânicas são maiores no Turno 1, devido ao agendamento da manutenção preventiva.
- No turno 3 há uma maior ociosidade por espera de peças e suporte, sendo necessário um apoio maior da equipe de manutenção para garantir a maior produtividade da operação.

## 7. REFERÊNCIAS

ABREU, A. D.; RIBEIRO, R. N.; DE LANA, J. A. S. **Aplicação dos conceitos da Floresta 4.0 nas atividades de colheita florestal de madeira**. 2019.

ALBANO JUNIOR, I. **Gestão de pequenas empresas de colheita florestal mecanizada**. 2014. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA em Gestão Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

ALVES, E. G.; FIEDLER, N. C.; CARMO, C. A.; LOPES, E.S.; LACHINI, E.; EUGÊNIO, F. C. Efeito do turno de trabalho na produção e produtividade de máquinas de colheita de madeira. **Nativa**, v. 3, n. 3, p. 201-204, 2015.

CASTILLO-RUIZ, F. J.; PÉREZ-RUIZ, M.; BLANCO-ROLDÁN, G. L.; GIL-RIBES, J. A.; AGÜERA, J. Development of a telemetry and yield-mapping system of olive harvester. **Sensors**, v. 15, n. 2, p. 4001-4018, 2015.

CASTRO, N. L. M. **Inovações na otimização do talhonamento e microplanejamento da extração florestal**. 2018. 85 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018.

COSTA, E. M.; MARZANO, F. L. C.; MACHADO, C. C.; LEITE, E. S. Desempenho e custos operacionais de um Harvester em floresta de baixa produtividade. **Revista Engenharia na Agricultura – REVENG**, v. 25, n. 2, p. 124-131, 2017.

FONTES, J. M.; MACHADO, C. C. Manutenção mecânica. In: MACHADO, C. C. (org.). **Colheita florestal**. 3. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014, p. 243-291.

HOLZINGER, A.; MÜHLBACHER, I.; KAINZ, G.; WEBER, R.; SARANTI, A.; KAMPEL, M.; KORNER, C. Digital transformation in smart farm and forest operations needs human-centered AI: challenges and future directions. **Sensors**, v. 22, n. 8, p. 3043, 2022.

LA HERA, P.; SAUKKORIIPI, J.; RANTA, K.; KIVINEN, V.-P.; MIKKONEN, S. Exploring the feasibility of autonomous forestry operations: Results from the first experimental unmanned machine. **Journal of Field Robotics**, v. 41, n. 4, p. 942-965, 2024.

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**, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 212-219, 2012.

LOPES, E. S.; TONHATO, L.; RODRIGUES, C. K.; SERPE, E. L. Declividade do terreno e distância de extração na produtividade do forwarder com guincho de tração auxiliar. **Nativa**, Sinop, v. 4, n. 6, p. 347-352, 2016.

MACHADO, C. C. **Exploração florestal**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1989. 34 p.

MARQUES, L. S.; FERRAZ, G. A. S.; MOREIRA NETO, J.; MAGALHÃES, R. R.; DE LIMA, D. A.; TSUCHIDA, J. E.; FUZATTO, D. C. Agricultural machinery telemetry: a bibliometric analysis. **AgriEngineering**, v. 4, n. 4, p. 939-950, 2022.

MASIOLI, W.; FIEDLER, N. C.; BRISSON, E. V.; ALMEIDA, A. T. S.; LACERDA, L. C. Variáveis de influência da produtividade na extração de madeira em um sistema de toras curtas. **Contribuciones A Las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 2, p. e4781-e4781, 2024.

MUNIS, R. A.; ALMEIDA, R. O.; CAMARGO, D. A.; SILVA, R. B. G.; WOJCIECHOWSKI, J.; SIMÕES, D. Machine learning methods to estimate productivity of harvesters: mechanized timber harvesting in Brazil. **Forests**, v. 13, n. 7, p. 1068, 2022.

NITOSLAWSKI, S. A.; WONG-STEVENSON, K.; STEENBERG, J. W. N.; WITHERSPOON, K.; NESBITT, L.; KONIJNENDIJK VAN DEN BOSCH, C. C. The

digital forest: Mapping a decade of knowledge on technological applications for forest ecosystems. **Earth's Future**, v. 9, n. 8, p. e2021EF002123, 2021.

NUNES, I. B. **Modelagem e simulação da produtividade do forwarder em povoamentos de eucalipto**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR, 2020.

ROBERT, R. C. G.; TESSARO, F.; PEREIRA, R. S.; SAMPIETRO, J. A.; MALINOVSKI, R. A. Technical analysis of extraction operation performed by a forwarder with traction aid winch in an Eucalyptus spp. plantation. **Nativa**, v. 5, n. 4, p. 290-297, 2017.

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

SCHETTINO, S.; GUIMARÃES, N. V.; SILVA, D. L.; SOUZA, C. L. L.; MINETTE, L. J.; PAULA JUNIOR, J. D.; SCHETTINO, C. F. Relação entre a ocorrência de acidentes de trabalho e a baixa escolaridade dos trabalhadores no setor florestal. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n.4, p 22567-22589, 2020.

SCHETTINO, S.; MINETTE, L. J.; SORANSO, D. R.; LIMA, R. C. A. Influência de fatores ergonômicos na produtividade do sistema homem-máquina na colheita florestal mecanizada. **Scientia Forestalis**, v. 50, e3779, 2022.

SILVA, A. A.; MACHADO, C. C.; GOMES, R. R. M.; SCHETTINI, B. L. S.; MINETTE, L. J.; NUNES, I. L.; VILLANOVA, P. H. Indicador eficiência global de Máquinas Florestais (EGMF) na gestão do corte florestal. **Scientia Forestalis**, v. 50, n. e3875, 2022.

SILVA, A. A. **Tecnologias digitais aplicadas na gestão do corte florestal com harvester**. 2021. 80 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021.

SIMÕES, D.; FENNER, P. T. Avaliação técnica e econômica do forwarder na extração de madeira em povoamento de eucalipto de primeiro corte. **Floresta**, p. 711-720, 2010.

SOARES, T. A.; MENDES, G. K. S.; CHRUSCIAK, M. B.; ROBERT, R. C. G. Produtividade de turnos de trabalho no processamento de eucalyptus sp. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 11, n. 2, p. 50-65, 2022.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R. A. J; ROCHA, F. A.; SANTOS, L. C; SILVA, C. S. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis-BA. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

TELES, M. T. A.; SOUZA, A. P.; MINETTE, L. J.; LACERDA, P. H. G. A.; SCHETTINI, B. L. S.; SILVA, A. A.; VILLANOVA, P. H.; CASAS, G. G.; ZANUNCIO, J. C. Perfis e percepções das condições de trabalho de operadores de colheita florestal no sistema Cut-To-Length. **Scientia Forestalis**, v. 52, n. e4013, 2024.

VERACEL. **Relatório de Sustentabilidade 2023**. Disponível em: <<https://www.veracel.com.br/wp-content/uploads/2024/05/Relatorio-Sustentabilidade-2023-Veracel-Celulose-15-05-24.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2024.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho contribuiu significativamente para o desenvolvimento de uma gestão integrada do *Forwarder* na extração florestal, fornecendo uma base analítica e aplicável para a otimização de processos da operação. Os resultados obtidos demonstram o potencial da abordagem adotada, focando na modelagem da produtividade e na análise das paradas operacionais e mecânicas.

No entanto, para aprimorar ainda mais a precisão e a aplicabilidade dos modelos, é importante a inserção de novas variáveis que representem a complexidade da operação. Além disso, é fundamental a confiabilidade do banco de dados, permitindo uma análise alinhada com a realidade operacional.

Dessa forma, este estudo representa um passo importante, mas há oportunidades para avanços futuros, consolidando a gestão eficiente do *Forwarder* na colheita florestal.