

ARTIGO ORIGINAL

Indicador eficiência global de Máquinas Florestais (EGMF) na gestão do corte florestal

Overall Forest Machinery Efficiency Indicator (OFME) in forest harvesting management

Arthur Araújo Silva^{1*} , Carlos Cardoso Machado¹ , Raiane Ribeiro Machado Gomes¹ ,
Bruno Leão Said Schettini¹ , Luciano José Minette¹ , Ítalo Lima Nunes¹ , Paulo Henrique Villanova¹ 

¹Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, MG, Brasil

Como citar: Silva, A. A., Machado, C. C., Gomes, R. R. M., Schettini, B. L. S., Minette, L. J., Nunes, I. L., & Villanova, P. H. (2022). Indicador eficiência global de Máquinas Florestais (EGMF) na gestão do corte florestal. *Scientia Forestalis*, 50, e3875. <https://doi.org/10.18671/scifor.v50.43>

Resumo

Os indicadores de desempenho são ferramentas capazes de expor características mensuráveis e gerar informações relevantes das operações florestais, sendo considerados pilares para uma tomada de decisão ágil e assertiva por parte dos gestores. Itens como a produtividade (TP), consumo de combustível (TC), eficiência operacional (EO) e qualidade da operação ou do produto final (TQ) precisam ser mais bem estudados no setor florestal. Dessa forma, o objetivo do estudo foi avaliar a implementação do indicador Eficiência Global de Máquinas Florestais – EGMF na gestão do corte florestal com a utilização de *harvesters*. Os dados foram coletados durante o corte florestal, em plantios comerciais de eucalipto, nos estados da Bahia e Espírito Santo, Brasil. O indicador EGMF foi expresso em percentual, sendo calculado por: $EGMF = ((3*TP)+(3*TC)+(3*EO)+(1*TQ))/10$. O desempenho das máquinas foi avaliado com um modelo estocástico de simulação dinâmica de sistemas em nove cenários, propondo melhorias em relação ao volume médio individual, consumo de combustível, paradas mecânicas ou operacionais e qualidade da operação. As análises foram realizadas com o software PowerSim Studio 9. O EGMF da frota 05 foi 93,45%, sendo este maior que a meta (93%). Isto se deve à maior produtividade, eficiência operacional e qualidade da operação desta frota. O indicador EGMF se mostrou útil na gestão do corte florestal com informações adequadas e de fácil entendimento a partir de uma variedade de dados. A eficiência global do *harvester* varia com o volume médio individual da floresta, como mostrado nos cálculos e comprovado pelo modelo de simulação estocástico elaborado.

Palavras-chave: Desempenho; *Harvester*; Simulação.

Abstract

Performance indicators are tools capable of exposing measurable characteristics and generating forest operations relevant information, being considered pillars for agile and assertive decision making by managers. Productivity (P), fuel consumption (FC), operational efficiency (OE) and operation quality or final product (OQ) need to be better studied in the forestry sector. The aim of the study was to evaluate the Overall Forest Machinery Efficiency (OFME) indicator implementation in the management of forest stand harvesting data using harvesters. Data were collected during forest harvesting in commercial eucalypt stands located in Bahia and Espírito Santo states, Brazil. The OFME indicator was expressed as a percentage, calculated by: $OFME = ((3*P)+(3*FC)+(3*OE)+(1*OQ))/10$. The machines' performance was evaluated with a stochastic model of dynamic simulation of systems in nine scenarios, proposing improvements in relation to the average individual volume, fuel consumption, mechanical or operational stops and operation quality. The analyses were performed using the PowerSim Studio 9 software. The

Fonte de financiamento: Nenhuma.
Conflito de interesse: Nada a declarar.
Autor correspondente: arthur.araujo@ufv.br
Recebido: 7 abril 2022.
Aceito: 21 outubro 2022.
Editor: Mauro Valdir Schumacher.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o artigo científico seja corretamente citado.

OFME of fleet 05 was higher than the target (93%), with 93.45%. This is due to the greater productivity, operational efficiency and quality of operation of this fleet. The OFME indicator proved to be useful in the forest stand harvesting management with adequate and easy to understand information from a data variety. The harvester overall efficiency varies with the individual forest average volume as shown in the calculations and proven by the stochastic simulation model developed.

Keywords: Performance; Harvester; Simulation.

1. INTRODUÇÃO

O Setor Florestal tem posição de destaque na economia nacional, com mais de 9 milhões de hectares de plantações florestais atrelado à alta produtividade, tecnologia incorporada e boas práticas de manejo florestal (Indústria Brasileira de Árvores, 2021). As plantações de eucalipto se destacam no Brasil, com grande importância na economia, representando 1,3% do Produto Interno Bruto do país (Santos et al., 2020). O setor está em crescimento e a maior demanda de madeira torna necessária uma maior eficiência produtiva nos processos que envolvem a cadeia produtiva da madeira. Dentre estes processos se destaca a colheita florestal, que pode ser definida como um conjunto de operações que tem como objetivo preparar e extrair a madeira até o local de transporte, através do uso de técnicas e padrões estabelecidos, com a finalidade de transformá-la em produto final (Cassiano et al., 2021).

A colheita florestal é uma atividade onerosa, complexa e sujeita à diversas variáveis, que afetam a produtividade das máquinas utilizadas, e, consequentemente, os custos operacionais (Shadbahr et al., 2021), o que torna importante o planejamento adequado para aperfeiçoar esta etapa em termos operacionais e econômicos (Gomes et al., 2021). No Brasil, o sistema de toras curtas (*cut-to-length*) é o mais utilizado na colheita do eucalipto para a indústria de celulose, onde a árvore é processada no local de colheita pelo *harvester* (Holzleitner & Kanzian, 2021). O desenvolvimento de técnicas para aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção é importante, pois a depreciação, consumo de combustível e manutenção corretiva podem representar de 50 a 80% do custo total de operação do *harvester* (Santos et al., 2017), isto mostra a importância de se estudar as variáveis que influenciam os resultados do corte florestal com essas máquinas.

Neste sentido que são desenvolvidos os indicadores de desempenho (*Key Performance Indicators* – KPI), ferramentas capazes de expor características das operações de máquinas florestais (Nascimento et al., 2021). Para monitorar a eficácia das operações, o indicador Overall Equipment Effectiveness (OEE) é uma das melhores técnicas de medição, uma vez que avalia, em um mesmo indicador, a disponibilidade, produtividade e qualidade da operação (Hien et al., 2022). Existe a necessidade dos gestores das empresas se prepararem com ferramentas e metodologias para geração de informações de valor a partir de grande quantidade e variedade de dados que são gerados (Castelo-Branco et al., 2022). Estas informações são essenciais para uma tomada de decisão mais ágil e assertiva, garantindo menor tempo de resposta às variações positivas ou negativas do processo.

Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar a implementação do indicador Eficiência Global de Máquinas Florestais (EGMF), na gestão e monitoramento da atividade de corte florestal, identificando os fatores que influenciam no desempenho do *harvester*, simulando melhorias e observando o impacto na eficiência global da operação e no corte anual de madeira.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização do local de estudo

Os dados foram coletados durante operações de colheita florestal em plantios comerciais de eucalipto nos estados da Bahia e Espírito Santo, Brasil (Figura 1). O tipo de solo predominante na região é o Latossolo Vermelho-Amarelo e o relevo é plano a suave-ondulado. O clima característico da região é o tropical quente super-úmido (tipo Aw, segundo Köppen), tendo temperatura média anual de 24,4°C. A precipitação média anual na região é de 1.054,9 mm.

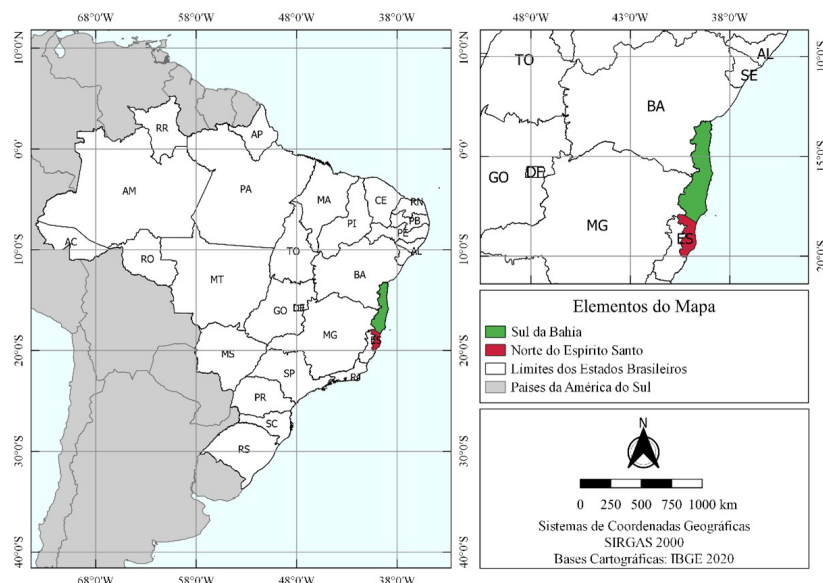


Figura 1: Localização das áreas de coleta de dados para o estudo, no norte do Espírito Santo e sul da Bahia.

2.2. Caracterização das frotas e máquinas avaliadas

No estudo foram analisadas cinco diferentes frotas de operação, sendo duas delas no estado do Espírito Santo e as outras três no estado da Bahia. Considerou-se neste estudo a quantidade de 5 máquinas por frota, sendo *harvesters* da marca Komatsu, modelo PC200, com motor de 155 HP de potência, em conjunto com cabeçote Komatsu, modelo 370E. As máquinas analisadas foram aquelas que apresentaram maior quantidade de horas trabalhadas ao final da pesquisa, até o limite máximo de dois anos de tempo de utilização.

2.3. Coleta e Análise de dados

A produtividade operacional foi determinada de acordo com a seguinte equação:

$$Prod\ Real = \frac{Na \cdot VMI}{He} \quad (Eq. 1)$$

Em que: Prod. Real = produtividade da operação ($m^3_{s/c}/h$); Na= número de árvores processadas (ud); VMI = volume individual por indivíduo ($m^3/árv.$); He = horas efetivas de trabalho.

A taxa de produtividade (TP) foi baseada na produtividade real em relação à planejada, de acordo com a seguinte equação:

$$TP\ (%) = \left(\frac{Prod\ Real}{Prod\ Plan} \right) * 100 \quad (Eq. 2)$$

Em que: TP (%) = taxa de produtividade; Prod Real = produtividade da operação ($m^3_{s/c}/h$); Prod Plan = produtividade planejada de acordo com os valores de VMI ($m^3_{s/c}/h$).

O cálculo do consumo de combustível considerou o volume de combustível (óleo diesel) colocado no tanque das máquinas. O consumo horário de cada máquina foi calculado de acordo com a seguinte equação:

$$Cons\ Hor = \frac{Q_{abast}}{He} \quad (Eq. 3)$$

Em que: Cons Hor = consumo horário de óleo diesel (l/h); Q_{abast} = quantidade de combustível depositada no equipamento (litros); He = horas efetivas de trabalho a partir do depósito de combustível.

A taxa de consumo de combustível foi calculada de acordo a seguinte equação:

$$TC (\%) = \left(\frac{Cons\ Hor}{Cons\ Plan} \right) * 100 \quad (Eq. 4)$$

Em que: TC = taxa de consumo em relação à meta estipulada (%); Cons Hor = consumo horário de óleo diesel (l/h); Cons Plan = consumo horário planejado de óleo diesel, sendo 20 l/h a meta da empresa (l/h).

A eficiência operacional foi baseada no percentual do tempo das atividades que, efetivamente, resultaram em produção, desconsiderando as paradas mecânicas e operacionais, de acordo com a seguinte equação:

$$EO (\%) = 1 - \left(Hm + \frac{Ho}{Ht} \right) * 100 \quad (Eq. 5)$$

Em que: EO = eficiência operacional (%); Hm = tempo em paradas para manutenção e reparos (horas); Ho = tempo em paradas operacionais (horas).

A qualidade da operação de corte florestal, considerando-se a altura de corte, comprimento das toras, diâmetro mínimo e descascamento foi avaliada com 100 cepas e 100 toras, por avaliação no campo. Para esta avaliação, considerou-se as seguintes especificações de conformidade adotadas pela empresa: altura do toco – 10 cm para áreas de implantação ou reforma e 15 cm para áreas de condução da rebrota; comprimento das toras - variando entre 3,5 e 6,5 m; diâmetro mínimo – máximo de 3 cm; descascamento – máximo de 5% de casca residual nas toras processadas.

A qualidade da operação foi calculada com a seguinte equação:

$$TQ (\%) = \left(\frac{Nc}{Nt} \right) * 100 \quad (Eq. 6)$$

Em que: TQ = qualidade da operação (%); Nc= número de amostras em conformidade com as normas; Nt= número total de amostras avaliadas.

Adaptado de outro indicador difundido na literatura, o OEE – Overall Equipment Effectiveness, o valor do indicador EGMF foi calculado de acordo com a seguinte equação:

$$EGMF (\%) = \left(\frac{3*TP (\%) + 3*TC (\%) + 3*EO (\%) + TQ (\%)}{10} \right) \quad (Eq. 7)$$

Em que: EGMF = Eficiência global de máquinas florestais; produtividade da operação (TP), consumo de combustível (TC), eficiência operacional (EO) e qualidade da operação (TQ). A média ponderada das variáveis foi utilizada devido à produtividade da operação ter maior impacto no processo referente à demanda da fábrica e dos custos envolvidos.

O desempenho dos *harvesters* em relação ao volume colhido de madeira, com melhorias propostas em relação ao volume médio individual (VMI), consumo de combustível, paradas mecânicas e paradas operacionais, foi avaliado de acordo com diferentes cenários com um modelo estocástico de simulação da dinâmica dos sistemas:

Cenário 1 – Baixo VMI (0,020 – 0,081 m³/ind.);

Cenário 2 - Médio VMI (0,082 – 0,143 m³/ind.);

Cenário 3 - Alto VMI (0,144 – 0,204 m³/ind.);

Cenário 4 - Médio VMI; diminuição em 5% no consumo de combustível; 10% do período de manutenção corretiva; 10% no período em troca de material de corte; altura dos tocos com 100% de conformidade;

Cenário 5 - Médio VMI; diminuição em 10% no consumo de combustível; 20% do período em manutenção corretiva; 20% do período em troca de material de corte; altura dos tocos com 100% de conformidade;

Cenário 6 - Médio VMI, diminuição em 10% no consumo de combustível;

Cenário 7 - Médio VMI, altura dos tocos em 100% de conformidade;

Cenário 8 - Médio VMI, diminuição em 20% do período de manutenção corretiva;

Cenário 9 – Médio VMI, diminuição em 20% do período de troca de material de corte.

A análise destes cenários foi realizada com o *software PowerSim Studio 9*, um pacote de *software* robusto utilizado neste tipo de análise (Kumar et al., 2011; Gunal, 2012).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produtividade de quatro das cinco frotas foi superior à meta, com a 05 superando em 4,6% a taxa de produtividade planejada e a 04 não alcançando a meta. A razão da frota 05 ter ultrapassado a meta se deve à maior média de árvores processadas por hora (142,8 árvores/hora), devido à experiência e treinamento dos operadores em relação às configurações da máquina e condições do povoamento florestal (Lopes & Pagnussat, 2017). Por outro lado, o fato da frota 04 não ter atingido a meta se deve à mesma ter operado em áreas com plantas de baixo volume individual, fustes tortuosos e alto número de galhos. Estas variáveis reduzem a eficiência do corte florestal devido, principalmente, à dificuldade no processamento da madeira colhida (Eriksson & Lindroos, 2014; Strandgard et al., 2014).

A eficiência operacional das frotas foi maior que a meta estabelecida (78,4%), porém o tempo em manutenção corretiva e aguardando manutenção da frota 02 foi maior, demandando atenção à esta frota (Tabela 1). A maior eficiência operacional das frotas em relação à meta se deve ao menor tempo gasto em paradas mecânicas e operacionais que o planejado. O maior tempo em manutenção corretiva e aguardando manutenção da frota 02 se deve ao dimensionamento ineficiente da sua equipe de manutenção, considerando a demanda de serviços. O tempo em manutenção reduz o desempenho das máquinas aumentando os custos da colheita florestal (Santos et al., 2017). A eficiência operacional com resultados adequados depende de uma equipe de manutenção bem dimensionada e treinada, compatível com a demanda de serviços (Magalhães & Katz, 2010).

Tabela 1: Resultados de indicadores operacionais em função das 5 frotas avaliadas.

Frota	TT (h)	MAN	OP	TR	EO	Meta EO
01	78.069,4	8.317,2	5.655,3	5.910,3	82,1	78,4
02	81.028,8	10.661,7	6.243,2	6.515,4	79,1	78,4
03	44.327,0	5.534,3	3.156,6	3.329,3	80,4	78,4
04	65.468,8	7.604,4	4.645,0	4.776,9	81,3	78,4
05	25.102,0	2.142,8	1.187,9	1.430,6	86,7	78,4
	293.996,0	34.260,4	20.887,9	21.962,5	81,9	78,4

Tempo total (TT em horas), manutenção (MAN em horas), paradas operacionais (OP em horas), tempo em refeição (TR em horas), eficiência operacional (EO em %) e meta de eficiência operacional (Meta EO em %).

O consumo de combustível (óleo diesel) não foi satisfatório em nenhuma das frotas analisadas, estando acima da meta estipulada de 20 l/h. O consumo de combustível acima do previsto preocupa por esta variável representar de 8 a 34% do custo total operacional dos *harvesters* (Leite et al., 2014; Santos et al., 2017). Este elevado consumo se deve ao superdimensionamento das máquinas e às suas configurações, que devem ser compatíveis com a produtividade esperada, ou seja, *harvesters* menores podem ser usados para realizar a mesma tarefa com menores custos (Sirén & Aaltio, 2003).

A qualidade da operação mostrou desvios nas variáveis altura de toco (5,3% para a frota 04); diâmetro mínimo (11,4% das “ponteiros” com diâmetro superior ao padrão para a 04); comprimento das toras (5,5% com comprimento maior ao padrão para a 02); descascamento (22,4% com porcentagem de casca acima do padrão para a 03); e conformidade do toco (11,6% das amostras não conformes para a 03) (Tabela 2). Desvios na qualidade da operação se devem aos operadores ou às especificações da máquina (Jacovine et al., 2005; Lopes e Pagnussat, 2017). Esses desvios reduzem a produtividade do corte florestal e das atividades subsequentes, como a extração e transporte florestal, além de gerar perdas econômicas e, por isto, devem ser solucionados (Shadbahr et al., 2021). Os operadores devem ser treinados

para observar as condições ambientais, características do povoamento florestal e especificações da máquina como a velocidade dos rolos do cabeçote, distância mínima entre as facas móveis, sensor de medição de comprimento, distância do suporte do cabeçote à serra, entre outros (Häggström et al., 2015).

Tabela 2: Indicadores de qualidade em função das diferentes frotas.

Frota	AT	DiM	CT	DESC	CTo	TQ	Meta TQ
01	97,30	95,90	99,60	84,10	89,20	93,22	95,00
02	98,70	98,90	94,50	83,60	92,60	93,66	95,00
03	99,80	98,20	99,60	77,60	88,40	92,70	95,00
04	94,70	88,50	98,90	89,00	97,00	93,62	95,00
05	98,90	98,50	99,75	95,40	90,70	96,65	95,00
Média	97,88	96,00	98,47	85,94	91,56	93,97	95,00

Altura do toco (AT em %), diâmetro mínimo (DiM em %), comprimento das toras (CT em %), descascamento (DESC em %), conformidade do toco (CTo em %), taxa de qualidade (TQ em %), meta de qualidade (Meta TQ em %).

A eficiência global (EGMF) da frota 05 (93,45) foi superior à meta (93,00), com maior taxa de produtividade, eficiência operacional e qualidade da operação (Figura 2). O maior EGMF, produtividade, eficiência operacional e qualidade da operação da frota 05 se deve, principalmente, ao menor tempo de paradas mecânicas, operacionais, e à qualidade do descascamento. O resultado para esta frota confirma a possibilidade de se obter uma maior produtividade devido aos cuidados com a máquina e a qualidade do serviço prestado e do produto. A metodologia utilizada neste estudo é útil na gestão do corte florestal por disponibilizar informações rápidas e de fácil entendimento a partir de dados diversos e vem sendo melhorada (Dadashnejad & Valmohammadi, 2019) e utilizada em indústrias como de aviação (Angin et al., 2017) e de bebidas a partir da análise da eficiência das máquinas de envase (He et al., 2018).

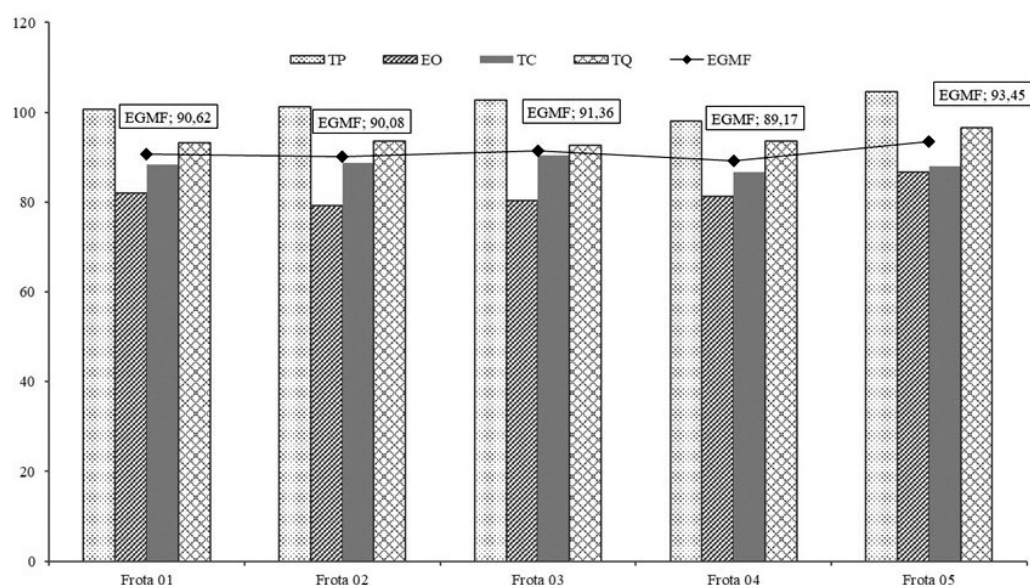


Figura 2: Indicador EGMF em função das diferentes frotas. Produtividade (TP em %), eficiência operacional (EO em %), consumo de combustível (TC em %), qualidade da operação (TQ em %), e eficiência global de máquinas florestais (EGMF em %) das frotas analisadas.

A Eficiência Global de Máquinas Florestais (EGMF) diminuiu em 15% com produção anual de madeira em 1.527.932 m³ no cenário 1 (Tabela 3). A diminuição do EGMF e do volume de madeira colhida no cenário 1 confirma a influência do volume médio individual (VMI) das

plantas no desempenho e custos dos *harvesters*, o que pode gerar falta de madeira no pátio da fábrica e, mesmo, a paralisação da produção (Burgin et al., 2017). Isto pode ser evitado ou reduzido com investimentos no melhoramento genético (Castro et al., 2016; Gallo et al., 2018), em solos (Tubert et al., 2018) e no planejamento e manejo florestal, aumentando o volume de madeira produzido por planta.

A eficiência da operação e o volume anual de madeira colhida (excedente em 2.798.063,71 m³) foram maiores em áreas com alto volume médio individual das plantas (cenário 3) (Tabela 3). A maior eficiência da operação e o volume anual de madeira colhida em áreas com alto volume médio individual permitiria reduzir o número de máquinas em operação para suprir a demanda de madeira da fábrica. Este resultado confirma o volume médio individual das árvores como o fator que mais impacta a produtividade e os custos de operação do *harvester* (Zhang et al., 2016).

O EGMF aumentou em 6 a 12% com excedente de produção anual da madeira em 810.062,00 m³ no cenário 5 (Tabela 3). O maior EGMF e produção anual de madeira no cenário 5 confirma a influência do consumo de combustível e dos tempos em manutenção corretiva e troca de material de corte no desempenho do *harvester* (Santos et al., 2017). A redução no consumo de combustível e o aumento da eficiência das máquinas de colheita de madeira reduz a emissão de poluentes emitidos por motores diesel, que afetam a saúde humana e o meio ambiente. Esta redução pode ser conseguida através de pequenas modificações no sistema das máquinas (Prinz et al., 2018).

Tabela 3: Eficiência Global de Máquinas Florestais das frota analisadas e volume m³ anual colhido em nove cenários.

Cen.	EGMF (%)					Col. Mad.
	Frota 1	Frota 2	Frota 3	Frota 4	Frota 5	
1	74,85	77,19	75,96	73,53	79,39	-1.527.932,25
2	92,53	98,62	94,90	90,47	100,64	635.065,73
3	110,21	120,06	113,84	107,41	121,88	2.798.063,71
4	94,48	100,55	96,75	92,49	102,48	699.486,14
5	96,37	102,44	98,62	94,40	104,31	810.062,00
6	95,88	101,96	98,19	93,87	104,00	635.065,73
7	92,59	98,65	94,90	90,58	100,66	635.065,73
8	92,53	98,62	94,90	90,47	100,64	744.688,01
9	92,96	99,08	95,33	90,90	100,92	699.486,09

EGMF - Eficiência Global de Máquinas Florestais; Cen - Cenários; Col. Mad. - Volume de madeira colhido em m³/ano.

4. CONCLUSÕES

A produtividade, consumo de combustível, eficiência operacional e qualidade da operação afetam a eficiência global do *harvester*. O EGMF da frota 05 foi maior que a meta estabelecida, com constância dos parâmetros estudados.

O modelo de simulação estocástico foi eficiente para estudar o impacto na eficiência global das máquinas florestais (EGMF) e no fluxo de corte de madeira. Os melhores resultados do cenário 3 confirmam a influência do volume médio individual (VMI) das árvores no fluxo de madeira colhida e na eficiência global dos *harvesters* no corte florestal.

O indicador EGMF se mostrou útil na gestão do corte florestal, gerando informações rápidas e de fácil entendimento. Esse indicador deve ser utilizado na gestão individual do desempenho dos operadores, mostrando as causas dos desvios, os quais devem ser minimizados.

5. REFERÊNCIAS

Angin, J. B. P., Manurung, E. D., & Siregar, A. H. (2017). Penerapan total productive maintenance dengan menggunakan metode OEE pada turbin uap Type C5 DS II – GVS. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 10(1), 29-36.

- Burgin, M. R. B., Lopes, E. S., & Rodrigues, C. K. (2017). Efeito do volume individual e declividade do terreno na produtividade do harvester no desbaste de pinus. *ACSA*, 13(4), 322-328. <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v13i4.936>.
- Cassiano, C. C., Salemi, L. F., Garcia, L. G., & Ferraz, S. F. B. (2021). Harvesting strategies to reduce suspended sediments in streams in fast-growing forest plantations. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(1), 96-105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.06.008>.
- Castelo-Branco, I., Oliveira, T., Simões-Coelho, P., Portugal, J., & Filipe, I. (2022). Measuring the fourth industrial revolution through the Industry 4.0 lens: the relevance of resources, capabilities and the value chain. *Computers in Industry*, 138(1), 103639. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2022.103639>.
- Castro, C. A. O., Resende, R. T., Bhering, L. L., & Cruz, C. D. (2016). Brief history of Eucalyptus breeding in Brazil under perspective of biometric advances. *Ciência Rural*, 46(9), 1585-1593. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20150645>.
- Dadashnejad, A. A., & Valmohammadi, C. (2019). Investigating the effect of value stream mapping on overall equipment effectiveness: a case study. *Total Quality Management & Business Excellence*, 30(3-4), 466-482. <http://dx.doi.org/10.1080/14783363.2017.1308821>.
- Eriksson, M., & Lindroos, O. (2014). Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets. *International Journal of Forest Engineering*, 25(3), 179-200. <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2014.974309>.
- Gallo, R., Pantuza, I. B., Santos, G. A., Resende, M. D. V., Xavier, A., Simiqueli, G. F., Baldin, T., Santos, O. P., & Valente, B. M. R. T. (2018). Growth and wood quality traits in the genetic selection of potential *Eucalyptus dunnii* Maiden clones for pulp production. *Industrial Crops and Products*, 123, 434-441. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.016>.
- Gomes, V. S., Monti, C. A. U., Silva, C. S. J., & Gomide, L. R. (2021). Operational harvest planning under forest road maintenance uncertainty. *Forest Policy and Economics*, 131(1), 102562. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102562>.
- Gunal, M. M. (2012). A guide for building hospital simulation models. *Health Systems (Basingstoke, England)*, X(1), 1-9. <http://dx.doi.org/10.1057/hs.2012.8>.
- Häggström, C., Englund, M., & Lindroos, O. (2015). Examining the gaze behaviors of harvester operators: an eye-tracking study. *International Journal of Forest Engineering*, 26(2), 96-113. <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2015.1075793>.
- He, F., Shen, K., Lu, L., & Tong, Y. (2018). Model for improvement of overall equipment effectiveness of beer filling lines. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(8), 1-20. <http://dx.doi.org/10.1177/1687814018789247>.
- Hien, N. N., Lasa, G., Iriarte, I., & Unamuno, G. (2022). An overview of Industry 4.0 applications for advanced maintenance services. *Procedia Computer Science*, 200(1), 803-810. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.277>.
- Holzleitner, F., & Kanzian, C. (2021). Integrated in-stand debarking with a harvester in cut-to-length operations – processing and extraction performance assessment. *International Journal of Forest Engineering*, 33(1), 66-79. <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2021.2013049>.
- Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. (2021). *Relatório 2021*. São Paulo: IBÁ. Recuperado em 7 de abril de 2022, de <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>
- Jacovine, L. A. G., Machado, C. C., Souza, A. P., Leite, H. G., & Minetti, L. J. (2005). Avaliação da qualidade operacional em cinco subsistemas de colheita florestal. *Revista Árvore*, 29(3), 391-400. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622005000300006>.
- Kumar, S. V., Mani, V. G. S., & Devraj, N. (2011). Production planning and process improvement in an impeller manufacturing using scheduling and OEE techniques. *Procedia Materials Science*, 5, 1710-1715. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.360>.
- Leite, E. S., Minette, L. J., Fernandes, H. C., Souza, A. P., Amaral, E. J., & Lacerda, E. G. (2014). Desempenho do harvester na colheita de eucalipto em diferentes espaçamentos e declividades. *Revista Árvore*, 38(1), 1-7. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000100009>.
- Lopes, E. S., & Pagnussat, M. B. (2017). Effect of the behavioral profile on operator performance in timber harvesting. *International Journal of Forest Engineering*, 28(3), 134-139. <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2017.1328847>.
- Magalhães, P. A. D., & Katz, I. (2010). Estudo da viabilidade econômica da mecanização do processo de colheita florestal com harvester em uma indústria madeireira. *Tékhné Lógos*, 2(1), 73-91.

- Nascimento, C. D. V., Feitosa, J. P. A., Simmons, R., Dias, C. T. S., Nascimento, I. V., Mota, J. C. A., & Costa, M. C. G. (2021). Durability indicatives of hydrogel for agricultural and forestry use in saline conditions. *Journal of Arid Environments*, 195(1), 104622. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104622>.
- Prinz, R., Spinelli, R., Magagnotti, N., Routa, J., & Asikainen, A. (2018). Modifying the settings of CTL timber harvesting machines to reduce fuel consumption and CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, 197, 208-217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.210>.
- Santos, A. P., Gomes, R. L., Furtado, E. L., & Passos, J. R. S. (2020). Quantifying losses in productivity by the rust in eucalypt plantations in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 468(1), 118170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118170>.
- Santos, L. N., Fernandes, H. C., Silva, R. M. F., Silva, M. L., & Souza, A. P. (2017). Evaluation of costs of harvester in cut and processing of Eucalyptus wood. *Revista Árvore*, 41(5), 1-9. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000500001>.
- Shadbahr, J., Bensebaa, F., & Ebadian, M. (2021). 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*, 284(1), 112073. PMID:33556830. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112073>.
- Sirén, M., & Aaltio, H. (2003). Productivity and costs of thinning harvesters and harvester forwarders. *International Journal of Forest Engineering*, 14(1), 39-48. <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2003.10702468>.
- Strandgard, M., Mitchell, R., & Acuna, M. (2014). General productivity model for single grip harvesters in Australian eucalypt plantations. *Australian Forestry*, 79(2), 108-113. <http://dx.doi.org/10.1080/00049158.2015.1127198>.
- Tubert, E., Vitali, V. A., Alvarez, M. S., Tubert, F. A., Baroli, I., & Amodeo, G. (2018). Synthesis and evaluation of a superabsorbent-fertilizer composite for maximizing the nutrient and water use efficiency in forestry plantations. *Journal of Environmental Management*, 210, 239-254. PMID:29348059. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.062>.
- Zhang, F., Johnson, D. M., Wang, J., & Yu, C. (2016). Cost, energy use and GHG emissions for forest biomass harvesting operations. *Energy*, 114, 1053-1062. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.086>.

Contribuição dos Autores: AAS: conceptualization, data curation, investigation, writing – original draft; BLSS: writing – original draft, writing – review & editing, validation; CCM and RRMG: supervision, validation; LJM, ILN and PHV: software, writing – review & editing.