

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Agrárias
Campus Regional Montes Claros

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ENGENHARIA FLORESTAL

**DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
MÁQUINAS DE COLHEITA FLORESTAL EM SISTEMA
“FULL-TREE”**

ANTONIA JAYNE FARIAS DA SILVA

Montes Claros – MG

2023

Antonia Jayne Farias da Silva

**DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
MÁQUINAS DE COLHEITA FLORESTAL EM SISTEMA
“FULL-TREE”**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Ciências
Agrárias da Universidade Federal de Minas
Gerais, como requisito parcial, para a
obtenção de título de Bacharel em
Engenharia Florestal.

Orientador: Stanley Schettino

Montes Claros - MG
2023

A minha mãe Francisca, minhas irmãs Jakeline e Jacinta, meu irmão Jonas e aos amigos
que fizeram parte dessa trajetória. Obrigada!

AGRADECIMENTOS

Foram longos cinco anos até esse momento, e finalmente chegou. Há tanto o que agradecer, há tantas pessoas que preciso mencionar aqui. Primeiramente, quero agradecer a Deus, que me permitiu vivenciar esse momento e que me proporcionou experienciar esse sonho e minha maior conquista de vida até agora, que é meu tão sonhado diploma de engenheira florestal.

Quero agradecer tanto à minha mãe, Francisca Alves da Silva. Ainda não conheci mulher mais forte que ela. Filha e neta de agricultores, saiu do interior do Ceará buscando melhor condição de vida. Teve que se casar tão nova, mas ainda assim conseguiu sustentar os cinco filhos. Por isso, deixou de viver sua vida para se dedicar à maternidade. Tenho um orgulho imenso da minha mãe e sou muito sortuda por ser filha dela. Eu te amo, mãe!

Quero agradecer às minhas irmãs, Jakeline Farias da Silva e Antônia Jacinta Farias da Silva, e ao meu irmão, Jonas Farias da Silva. Onde juntamente com minha mãe, foram meus suportes financeiros e psicológicos. Sem vocês, não conseguiria estar onde estou. Isso tudo é graças a vocês.

Não poderia deixar de mencionar minha sobrinha, Anna Lúcia Farias Paulo. Tenho um grande amor por ela. Mesmo estando um pouco ausente durante a graduação e tendo perdido um pouco de seu crescimento, eu a amo como se fosse minha filha e irmã. Anna Lúcia, quero que você saiba que também participou desse meu processo. Isso é por mim e por você.

Aqueles que estiveram comigo durante a graduação, amigos, colegas de curso, colegas da moradia, e todo corpo docente de engenharia florestal, obrigada por terem participado dessa jornada comigo. Em especial, meu melhor amigo, Guilherme Henrique Fortes, obrigada por ter me motivado, por seus conselhos, por sua companhia nos estudos e pelas várias conversas ao longo desses anos. Você faz parte de tudo isso também. Obrigada Elaine, Manu, Nadine, Bel, Gabriel, Rafael, Simone, Nayara, Beatriz, Rejane e Carlos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Stanley Schettino, meu muito obrigada. Sem o senhor, nada disso seria possível. Agradeço de verdade pela paciência, pelo suporte nos estudos, pelos conselhos e pela parceria. Eu não poderia ter orientador melhor. Eu o admiro muito, e algum dia quero ser pelo menos metade da profissional que você é.

A toda a comunidade docente do curso de engenharia florestal do Instituto de Ciências Agrárias, com quem pude compartilhar o tempo que fiquei em Montes Claros, e por todo o conhecimento que me foi proporcionado. Vocês ficarão marcados em minha vida.

Agradeço à Klabin S.A pela oportunidade de estágio que me foi concedida. A experiência que ganhei no ano em que estive no Paraná é imensurável. O destino não poderia ter sido mais generoso comigo. Além de conseguir trabalhar naquilo que amo, conheci pessoas incríveis e que vou carregar ao longo da minha vida. Meu muitíssimo obrigada primeiramente ao meu tutor, Fernando Vacelli. Obrigada pela paciência, por tirar minhas dúvidas da melhor forma possível, pelos conselhos, pela liberdade que me proporcionou

conhecer as operações florestais, e pela parceria. Obrigada Nayara Souza, Debora Kreczkiuski, Gustavo Paixão, Charles Martinelli, Rubya Beber, Diego Guio, Vilmar Vaz, Vagner Putton, Daniel Macedo, Reinaldo Correa e todo o escritório de Projetos Florestais. Agradeço a todos os coordenadores, supervisores e gerentes que tive contato, e também a equipe de operação em campo, que tive o privilégio de poder trabalhar com eles e elas. Trabalhar ao lado da operação incrementou em minha experiência e auxiliou a moldar meu caráter como profissional. E por último, mas definitivamente não menos importante, obrigada Daniela Meira. Obrigada por ter sido minha amiga durante o estágio e depois dele. Obrigada por sempre me apoiar, sempre me ouvir, obrigada pelos conselhos e as longas conversas jogadas fora. Você é uma pessoa e profissional incrível. Eu te admiro. Admiro sua força, sua coragem, sua bondade e sou grata por ter uma amiga como você.

Agradeço ao Campus de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, que me concedeu a oportunidade de estudar numa das melhores universidades do país, além de me proporcionar toda a assistência necessária para garantir a minha permanência durante a graduação, juntamente com a Fundação Universitária Mendes Pimentel (FUMP), que concederam bolsas de auxílio financeiro e me permitiram fazer parte do programa da Moradia Universitária Cyro Versiani dos Anjos. Saibam que isso faz diferença na vida daqueles que vêm de longe, ou naqueles que não têm condições de se manter na universidade até a finalização do curso. Eu acredito na educação pública de qualidade.

OBRIGADA!

Por fim, não seria eu se não tivesse algo engraçado. Então, parafraseando a cantora Anitta, quando ela diz: "Se eu fosse contar a vocês tudo que aconteceu na minha história, até chegar nesse momento, talvez vocês nem acreditassem, porque às vezes nem eu acredito, então hoje eu queria muito agradecer a mim, porque eu não desisti".

*“Eu sou de uma terra que o povo padece
Mas não esmorece e procura vencer.
Da terra querida, que a linda cabocla
De riso na boca zomba no sofrer
Não nego meu sangue, não nego meu nome
Olho para a fome, pergunto o que há?
Eu sou brasileiro, filho do Nordeste,
Sou cabra da Peste, sou do Ceará.”*

– Patativa do Assaré.

RESUMO

Atualmente a humanidade ainda é dependente de fontes de carbono fóssil para obtenção de energia, o que corrobora para o aumento das emissões de carbono na atmosfera. Um dos principais obstáculos na luta pela descarbonização do planeta é a matriz energética, o que faz com que a produção de energia renovável do setor de árvores cultivadas cresça cada vez mais. Assim sendo, o trabalho objetivou correlacionar o rendimento energético da colheita florestal, usando o consumo específico de combustível (em g/kWh^{-1}), com as variáveis produtividade da floresta, produtividade das máquinas e rendimento energético, a partir de uma base de dados fornecida por uma empresa com áreas de colheita florestal situada na região do Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais. Foi analisado as máquinas *Feller Buncher*, *Skidder* e Garra Traçadora, operando em sistema *full tree* e sua correlação com a volumetria das florestas e a produtividade das mesmas. Os resultados apontam que a variável produtividade da floresta tem uma forte correlação positiva a produtividade o *Feller Buncher*, média correlação positiva com a do *Skidder* e baixa correlação positiva com a da Garra Traçadora. Assim sendo, todas as máquinas apresentaram fortíssima correlação negativa entre produtividade e eficiência energética, demonstrando que um acréscimo na produtividade das mesmas acarreta, em ordem inversamente proporcional, uma melhoria da eficiência energética da operação, independentemente da atividade realizada. É concluído que a colheita florestal é uma importante etapa na tomada de decisão, o que faz com sejam adotadas medidas que vão desde a redução de custos, diminuição do impacto ambiental até o aumento da produtividade e conformidade com regulamentações, alinhando benefícios financeiros a sustentabilidade, mantendo a competitividade no mercado.

Palavras-chave: Consumo de combustível; Operações florestais; Mecanização florestal; Governança ambiental; Rendimento Energético.

ABSTRACT

Currently, humanity is still dependent on fossil carbon sources for energy generation, which contributes to the increase in carbon emissions in the atmosphere. One of the main challenges in the fight for the decarbonization of the planet is the energy matrix, which leads to the growing production of renewable energy from cultivated forests. Therefore, the study aimed to correlate the energy yield of forest harvesting, using specific fuel consumption (in g/kWh^{-1}), with the variables of forest productivity, machine productivity, and energy yield, based on a dataset provided by a company with forest harvesting areas located in the Jequitinhonha Valley region, Minas Gerais. The Feller Buncher, Skidder, and Grapple Skidder machines operating in the full-tree system and their correlation with forest volume and productivity were analyzed. The results indicate that the forest productivity variable has a strong positive correlation with Feller Buncher productivity, a moderate positive correlation with Skidder productivity, and a weak positive correlation with Grapple Skidder productivity. Therefore, all machines showed a strong negative correlation between productivity and energy efficiency, demonstrating that an increase in their productivity leads to an inversely proportional improvement in the energy efficiency of the operation, regardless of the activity performed. It is concluded that forest harvesting is a crucial step in decision-making, which requires measures to be taken, ranging from cost reduction and environmental impact mitigation to increased productivity and compliance with regulations, aligning financial benefits with sustainability and maintaining competitiveness in the market.

Keywords: Fuel consumption; Forest operations; Forest mechanization, Environmental governance, Energy Yield.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1. O setor florestal brasileiro	4
2.1.1 Breve histórico	4
2.1.2 Situação atual.....	5
2.1.3 Tendências para o futuro.....	6
2.2. Colheita de madeira no Brasil	7
2.2.1 Aspectos gerais.....	7
2.2.2 Sistemas de colheita (manual, semi-mecanizado e mecanizado).....	8
2.2.4 Tipos de máquinas utilizadas no Brasil.....	10
2.3. Rendimento energético	11
2.3.1 Definição.....	11
2.3.2 Modos de determinação	12
2.3.4 Relação Rendimento Energético x Potência	12
2.3.5 Consumo de combustível nas máquinas de colheita florestal	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 Coleta de dados	15
3.2 Determinação da eficiência energética.....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
5. CONCLUSÕES.....	22
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a humanidade ainda é dependente de fontes de carbono fóssil para obtenção de energia, representando aproximadamente 86,4% da necessidade energética global. As fontes de petróleo, com seu caráter finito e poluidor, fazem com que busquemos alternativas ao seu uso, como as chamadas fontes de energia limpa, onde a biomassa, energia solar, energia hidrelétrica, energia eólica, etc. se destacam por tal característica. (EMBRAPA, 2021).

A fim de conter o avanço das mudanças climáticas e permitir a autonomia da sustentabilidade, é necessário transformar a economia global. Governos do mundo todo e diversos setores buscam soluções para tal mudança. No mundo corporativo, investimentos ligados à redução das emissões de carbono vêm crescendo cada vez mais, com a aplicação das práticas ESG (*Environmental, Social and Governance* - Ambiental, Social e Governança). São exemplos as certificações, redução na geração de resíduos, investimentos diretos, ranqueamento de empresas, entre outros (IBÁ, 2023).

Além dos investimentos nas operações industriais, tem-se investido firmemente em sua expansão comercial. Essa tendência continua forte, sobretudo em relação à mudança global de hábitos, onde se procura cada vez mais produtos sustentáveis. Diante desse cenário, o setor de árvores plantadas tem sido um dos exemplos na construção dessa “economia verde”. (IBÁ, 2021) Ainda de acordo com um levantamento de dados exclusivo da IBÁ (indústria brasileira de árvores), estão em processo de confirmação ou já foram confirmados bioinvestimentos na ordem dos R\$ 57,2 bilhões até 2024.

Desde a década de 1970, já se operava com máquinas no Brasil, mas foi a partir de 1994, com a abertura das importações, o custo elevado de mão de obra e a necessidade de um trabalho mais ergonômico, que a colheita florestal se tornou mais intensiva. A partir dos anos 2000, com o crescimento exponencial da mecanização, temos máquinas no mercado mais adaptadas às diversas atividades do setor e às condições ergonômicas do operador florestal. Isso faz com que a colheita florestal atualmente seja essencialmente mecanizada. O grau de mecanização no país, só não é maior devido à dificuldade da colheita em terrenos declivosos, materiais com mais de um fuste por cepa e baixo volume por árvore. (MACHADO, 2014).

De acordo com Cortez (et al., 2008), a quantidade de energia gerada nas operações florestais, diferente do que se pensa, não é apenas resultado do consumo de combustível, mas também daquela que é gerada na fabricação e distribuição de máquinas e equipamentos, do óleo lubrificante e hidráulico, do trabalho humano, entre outros.

Segundo Junior e Seixas (2006, apud CORTEZ et al., 2008, p.86), a partir de um trabalho feito sobre balanço energético dos métodos de colheita mecanizada existentes. No ano de 1972 gastou-se em média 180MJ.m⁻³, com o consumo de combustível sendo de 5% a 10% representados no custo total da colheita de madeira. Ainda segundo esse estudo, os autores criaram uma matriz de dados, referente as operações de colheita mecanizada em plantios de eucalipto, com a finalidade de papel e celulose, e idade de corte de sete anos com uma produção de 300 m³. ha⁻¹. A partir disso foi criado um gráfico onde é apontado além do combustível, outros fatores que demandam energia do sistema produtivo, como matéria-prima, processo de fabricação e manutenção. Na pesquisa realizada por esses autores, foi visto que o sistema de toras longas apresenta uma demanda energética de 20% se comparada ao sistema de toras curtas. Apenas 0,5% do potencial energético presente no processo de colheita, representa cada m³ de madeira de reflorestamento, considerando o poder calorífico superior da madeira de 19 GJ.t⁻¹.

Assim, percebe-se que a eficiência energética da colheita florestal ainda é um desafio a ser superado. Para isso, é necessário investir em tecnologias que reduzam o consumo de combustível e outros insumos, bem como em processos de produção mais sustentáveis.

Segundo o site da Revista Opiniões (2023), a aquisição e utilização de máquinas florestais resulta em um alto investimento, e sua rentabilidade depende principalmente de sua taxa de uso e eficiência energética. Atualmente, no mercado existem indicadores direcionais de eficiência, no entanto, nenhuma ferramenta pode explicar com precisão as diferenças encontradas em diferentes resultados.

A eficiência energética é afetada pela habilidade do operador de operar a máquina e pela capacidade planejada de seu próprio trabalho. Isso inclui a capacidade de alterar as configurações da máquina, aumentando o rendimento e o consumo de combustível. Os níveis de pressão hidráulica das máquinas e os consideráveis ajustes individuais feitos pelo computador também afetam significativamente a eficiência energética (REVISTA OPINIÕES, 2023).

De acordo com uma entrevista realizada pelo site Mais Florestas (2023), uma empresa resolveu optar pela substituição de máquinas de maior desgaste e maior consumo de diesel, visando a troca por equipamentos e implementos mais modernos. Junto com isso, a empresa também investiu na capacitação profissional dos operadores, pois isso está diretamente ligado ao desempenho da máquina.

Algumas empresas também fazem a adoção de simulados e programas computacionais, como é o caso do EcoDrive, que realiza o monitoramento da eficiência de trabalho, entregando ao operador quais níveis de energia e combustível devem ser usados para as diferentes situações em campo (REVISTA OPINIÕES, 2023). Além disso, um planejamento passivo e cuidadoso tende a melhorar a eficiência energética, mantendo a mesma eficiência e rendimento, com menos combustível e eliminando movimentos desnecessários. Entretanto, ainda assim os métodos atuais de apuração do consumo de combustível (usualmente em litros/hora trabalhada) parecem não ser suficientes para demonstrar a eficiência energética da colheita florestal mecanizada.

Sob essa ótica, na busca de fornecer subsídios satisfatórios para a tomada de decisões quando do dimensionamento das máquinas de acordo com as características dos povoamentos a serem colhidos, este estudo aponta sua importância no aspecto científico (pesquisa), tecnológico, econômico e ambiental.

O objetivo do estudo é determinar a eficiência energética de máquinas utilizadas na colheita florestal operando em sistema *full tree* e sua correlação com a volumetria das florestas e a produtividade das máquinas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O setor florestal brasileiro

2.1.1 Breve histórico

Como forma de diminuir o desmatamento e ao mesmo tempo suprir a demanda de madeira, começou-se a pensar em florestas plantadas. Em 1903, o engenheiro agrônomo Edmundo Navarro de Andrade trouxe mudas de *Eucalyptus* spp. de Coimbra, Portugal, com o propósito de servir aos plantios de dormentes de estradas de ferro. Cinquenta e três anos mais tarde, seria a vez do *Pinus* spp., onde uma espécie se viu mais adaptada para a região Sudeste e a outra mais para a região Sul, respectivamente (SNIF, 2020).

Depois de muitos estudos e experimentos, plantando eucalipto de diversos locais do Brasil (coletado em pés isolados, parques e jardins) e do mundo (África do Sul, Austrália, Argentina, Argélia), Navarro identificou quais as espécies que mais se adaptavam ao Brasil e dessas, fez plantio em larga escala. Em 1921, a pedido do engenheiro ferroviário Francisco de Monlevade, foram feitos postes de eucaliptos de 15 anos, onde a duração média foi de 10 anos. Quando obtidos esses resultados satisfatórios, Monlevade sugeriu fazer testes com a madeira de eucalipto nas locomotivas a vapor da Companhia Paulista de Estradas de Ferro (CPEF) e constatou o sucesso do efeito útil nas máquinas (MARTINI, 2004).

Mas foi no início dos anos 1960, com a ajuda do governo pela lei de incentivos fiscais, que o Brasil começou a plantar em larga escala. Foram plantadas algumas espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Depois de muitos estudos, constatou-se que o sucesso dessas espécies se deve à boa adaptação às variáveis condições ambientais brasileiras, crescimento rápido, elevada produtividade, adequação da matéria-prima ao produto final, entre outras. O governo também distribuiu exemplares e técnicas silviculturais entre pequenos, médios e grandes produtores (EMBRAPA, 2021).

2.1.2 Situação atual

O setor florestal brasileiro é caracterizado por sua enorme diversidade de segmentos, como celulose e papel, carvão vegetal, madeira processada mecanicamente, biomassa, siderurgia, entre outros. Participa desde o processo de produção, passando pela colheita até o transporte final do produto. De acordo com os dados da FAO (2015 apud Cunha, 2019), no Brasil, há aproximadamente 500 milhões de hectares de florestas naturais e plantadas, o que corresponde a 59% de seu território, fazendo com que nosso país seja o segundo maior em área de florestas do mundo, ficando atrás apenas da Rússia.

Depois que a lei de incentivos fiscais foi encerrada no final dos anos 80, o país teve uma queda significativa nos reflorestamentos, o que enfraqueceu a matéria-prima trabalhada no setor industrial. O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), entre os anos de 1991 e 2001, disponibilizou mais de US\$ 400 milhões como forma de desenvolver o setor. No entanto, outra modalidade de subsídio também se sobressaiu: o fomento, que pode ser entendido como um instrumento estratégico para a inserção dos produtores rurais na cadeia de produção de madeira. Essa modalidade permite contribuir não somente ao produtor, mas também para as grandes empresas que se beneficiam usufruindo desses insumos, uma vez que não precisarão de áreas para plantio, por exemplo.

Segundo dados levantados pela IBÁ (2023) em 2022 a área de florestal plantadas totalizou cerca de 9,94 milhões de hectares (ha), sendo 7,6 milhões de ha destinados a plantio de eucalipto, 1,9 milhões de ha destinados a produção de pinus e 360 mil ha à outras espécies. Outros 6,7 milhões de hectares são destinados à conservação. Esses números nos mostram que nosso país é uma das referências mundiais na produção de papel e celulose, laminados de diversos tipos, carvão vegetal, produtos para uso doméstico como desinfetantes, vernizes, colas, tintas, vários tipos de papel como higiênicos, toalha, para impressão, entre outros.

O valor da produção florestal nacional chegou a R\$ 23,6 bilhões no ano de 2020, sendo R\$ 18,8 bilhões provenientes da silvicultura e R\$ 4,8 bilhões resultantes da extração vegetal (IBGE, 2020).

De acordo com os dados do anuário da IBÁ, em 2020, mesmo com o surto de COVID-19, o governo viu a necessidade da produção no setor florestal e permitiu que as

fábricas continuassem trabalhando. Isso garantiu o abastecimento de embalagens de papel para delivery, que se tornou uma realidade com o isolamento social. Além disso, também foram produzidos papéis para fins sanitários, papéis para bulas de remédio, celulose solúvel, matéria-prima para fabricação de materiais de proteção de profissionais da saúde, e carvão vegetal, biorredutor utilizado para a produção de aço e convertido em instrumentos cirúrgicos. Esse conjunto de fatores contribuiu para o crescimento de 17,6% do valor bruto da produção no setor florestal em relação a 2019, atingindo R\$ 116,6 bilhões (IBÁ,2021).

2.1.3 Tendências para o futuro

Com a inflação e as taxas de câmbio elevadas, a estabilização econômica é cada vez mais difícil, o que faz com que o setor florestal flutue constantemente. De acordo com Ribaski (2018), a alta no preço do dólar pode ser boa para os negócios, como é o caso da celulose, numa escala curta de tempo. No entanto, à medida que o tempo passa, o efeito reverso se manifesta, pois há aumento dos custos produtivos, uma vez que é necessário importar materiais para a produção de celulose.

O Brasil tem todo o potencial para se firmar como uma das maiores economias do mundo. Para isso, é necessário apoiar as indústrias para que continuem competitivas e diversificadas. No que diz respeito ao setor florestal, o país precisa otimizar seu desempenho na flexibilização de algumas barreiras, como a redução do prazo de licitação ambiental. Na China, o prazo não ultrapassa 30 dias, enquanto no Brasil passa de 120 dias. No entanto, o país ainda pode se sobressair na consolidação como potência da indústria mundial de base florestal (ABRAF,2013).

O avanço da tecnologia chegou ao mercado florestal com a chamada “Floresta 4.0”. Essa ferramenta facilita o processo de tomada de decisão, pois é possível realizar mapeamento de áreas e terras produtivas, medição da produção a partir do uso de satélites e drones, previsão de vendas através de dados históricos e atuais, monitoramento da atividade em campo em tempo real, diagnóstico de ataques de pragas, falhas de plantio, entre outros. Tudo isso traz mais praticidade e eficiência para o processo florestal em todas as etapas (B. FOREST, 2019).

2.2. Colheita de madeira no Brasil

2.2.1 Aspectos gerais

De acordo com Machado (2014), entende-se por colheita florestal o conjunto de operações efetuadas no âmbito florestal, com o objetivo de preparar e levar a madeira até o transporte final, usufruindo do uso de técnicas e padrões estabelecidos, a fim de transformá-la no insumo requerido. Ainda de acordo com Machado (2014), a colheita florestal se divide em partes, começando pelo corte (derrubada, desgalhamento, descascamento, traçamento, destopamento e pré-extração), extração e carregamento.

Economicamente falando, as etapas de colheita e transporte são as mais onerosas de serem realizadas, isso se comprova na participação final dos custos da empresa onde cerca de 50% dos custos estão relacionados a colheita e transporte (LIMA et al., 2019). O que faz com que essa parte do processo seja efetuada da maneira mais prática possível, a fim de maximizar e otimizar o tempo e a produção.

Os sistemas de colheita florestal, podem ser classificados em sistema de toras curtas (*cut to length*), onde a árvore é processada no local da derrubada e depois transportada até a margem da estrada ou pátio temporário em forma de pequenas toras, com menos de 6 metros de comprimento. Sistema de toras compridas (*tree length*), onde a árvore é semiprocessada no local da derrubada e levada até a margem da estrada ou pátio temporário em forma de fuste, com mais de 6 metros de comprimento. Sistema de árvores inteiras (*full tree*), onde a árvore é derrubada e levada para a margem da estrada ou pátio intermediário, onde é processada. Sistema de árvores completas (*whole tree*), onde a árvore é arrancada com parte de seu sistema radicular e levada para a margem da estrada ou pátio temporário e depois processada. Sistema de cavaqueamento (*chipping*), onde a árvore é derrubada e processada no próprio local, sendo transportada em forma de cavacos (MACHADO, 2014).

No Brasil, os sistemas de colheita mais utilizados são os de toras longas, e de toras curtas, onde a combinação de *Feller-buncher* + *Skidder* e *Harvester* + *Forwarder* podem ser representativas para esses tipos de colheita, respectivamente (LIMA et al., 2019).

2.2.2 Sistemas de colheita (manual, semi-mecanizado e mecanizado)

No tipo sistema de colheita manual, o trabalho é realizado de forma braçal não utilizando quaisquer tipos de equipamento motorizado. Esse método foi muito utilizado no passado, porém a partir de 1960 o uso de motosserras foi se concretizando e anos mais tarde com a introdução das máquinas florestais especializadas, fez com que esse método quase não seja mais utilizando hoje em dia (RODRIGUES, 2018).

Geralmente, na colheita manual, é realizado o manejo de toras com um menor comprimento, menor diâmetro e de baixo peso específico, caso contrário essa técnica seria inviável economicamente e ergonomicamente (MACHADO, 2014). Ainda de acordo com Machado (2014), esse método continua sendo utilizado hoje em dia, porém em pequenas áreas de florestas plantadas, ou em locais onde a atividade florestal é terceirizada, ou também em áreas onde a madeira é destinada a produção de energia. A vantagem desse método está relacionada a seu baixo custo operacional e fácil aquisição de equipamentos (machado, foice, facão, machete entre outros).

No sistema semi-mecanizado, é feito o uso de motosserras, onde ocorre a derrubada, o desgalhamento e o traçamento das árvores (RODRIGUES, 2018). Segundo Leite et al. (2019), para regiões em que o terreno apresenta um relevo acidentado e as máquinas não conseguem efetuar seu trabalho, uma alternativa seria o uso desse método com a motosserra ou o método manual com o auxílio do machado. Com esse tipo de técnica, o empregador teve que se adequar a novas regras em relação aos seus empregados, como a preocupação com a segurança dos mesmos (o que posteriormente veio a ser os equipamentos de proteção individual) e o devido treinamento (MACHADO, 2014).

O processo de carregamento e descarregamento no sistema semi-mecanizado é muito variável, a depender da situação. Onde geralmente, são utilizados pequenos tratores para realizar esse trabalho (MACHADO, 2014).

Método mais usado no Brasil e no mundo, o sistema de colheita mecanizada se dá pelo uso integral de máquinas nos processos de derrubada, desgalhamento, traçamento e pré-extração (RODRIGUES, 2018). Para esse tipo de sistema, podemos inferir que é um processo contínuo de melhorias nas condições de trabalho e de redução nos custos finais

de produção (SANTOS et al., 2018). Nesta etapa, são utilizadas diversas máquinas, cabendo à empresa a escolha de qual delas será empregada e para qual função se encaixa, conforme mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Máquinas utilizadas no corte da madeira

Máquinas	Função
<i>Feller</i>	Trator florestal derrubador
<i>Feller-buncher</i>	Trator florestal derrubador-empilhador
<i>Harvester</i>	Trator florestal derrubador-processador
<i>Slingshot</i>	Trator derrubador-acumulador-processador
<i>Tree-Puller</i>	Arrancador de árvores
<i>Delimber</i>	Trator florestal desganhador
<i>Delimber-buncher</i>	Trator florestal desganhador-acumulador
<i>Feller-skidder</i>	Trator florestal derrubador-arrastador
<i>Harwarder</i>	Trator florestal derrubador-processador-autocarregável

Fonte: RODRIGUES (2018).

No Brasil, o setor florestal e, especificamente, a colheita florestal, vem passando por mudanças significativas. Essas mudanças estão relacionadas à redução da mão de obra no campo, o que gera aumento de encargos sociais e insumos produtivos, crises econômicas com a redução da demanda por matéria-prima ou produtos (madeira para carvão, aço, ferro, etc.), e competitividade entre as empresas. Essas mudanças têm levado as empresas a reduzir o número de trabalhadores, adquirir novos equipamentos especializados para cada função e pessoas capacitadas para operá-los, além de adotar novos modelos e ferramentas de gestão visando aumento de eficiência, produtividade e redução dos custos operacionais (CARVALHO et al., 2018).

Ainda de acordo com Carvalho et al. (2018), conhecer os índices de produtividade e eficiência operacional das máquinas é imprescindível para a obtenção de resultados de volume de produção e custos adequados, bem como para a identificação de possíveis ganhos ou perdas econômicas decorrentes da variação dessas condições.

2.2.4 Tipos de máquinas utilizadas no Brasil

De acordo com Robert (2012, apud Rodrigues, 2018), no Brasil, geralmente são utilizadas duas máquinas para realizar o corte das árvores: o *harvester* e o *feller-buncher*. A escolha da máquina depende do sistema de colheita utilizado, da produção desejada e, principalmente, da exigência industrial em relação ao tamanho das toras, que devem ter comprimento e diâmetro pré-determinados.

Como o sistema mais utilizado no Brasil é o *cut to length*, o *harvester* se destaca por realizar o processo completo de derrubada, descascamento, desgalhamento e corte das árvores em tamanho pré-determinado, deixando-as empilhadas e prontas para serem carregadas da área de colheita (BURLA et al., 2011). Essa máquina pode ser definida como um trator derrubador, desgalhador, traçador e empilhador, com rodados em formato de esteiras ou pneus, ou uma escavadeira ou trator agrícola com cabeçote (RODRIGUES 2018).

O *feller-buncher* pode ser entendido com um trator derrubador empilhador, com rodados de esteiras ou pneus. Trajado por implementos frontais com capacidade para carregar toras de madeira durante a operação de corte, enquanto o *feller* não possui esse cabeçote (RODRIGUES, 2018).

Entende-se que o *skidder* possui esteiras ou pneus, e garras ou cabos. Além disso, os pneus podem ser equipados com uma pequena lâmina na frente para limpar a trilha de derrapagem e nivelar pequenas obstruções do solo (GHAFARIYAN, 2020).

Ainda de acordo com Ghaffariyan (2020), para facilitar na aterrisagem e criar estradas, o *skidder* de esteiras possui uma lâmina com esse propósito. Já o *skidder* de garra, como diz o próprio nome, usa a garra para capturar feixes de toras. Um *skidder* de cabo, possui um cabo (e guincho), com pinças que podem ser presas a troncos/árvores para deslocamento.

Forwarder é um trator florestal, cuja função é realizar o transporte primário por autocarregamento/descarregamento (LINHARES et al., 2012). O *forwarder* usa o guindaste para descarregar as toras de sua caçamba, esta atividade inclui pequenos deslocamentos necessários no pouso para completar o descarregamento (PROTO et al., 2018).

2.3. Rendimento energético

2.3.1 Definição

No começo do século XIX, a siderurgia foi trazida para o Brasil. A exploração florestal de matas nativas se destinava quase que completamente, a produção de carvão vegetal e lenha industrial para fins siderúrgicos e domésticos. Anos mais tarde, o gênero da espécie *Eucalyptus*, foi introduzido no país afim de substituir o uso de madeiras nativas, além de ser fonte de matéria-prima para diversos fins (JUNIOR, 2020).

Posteriormente, com o surgimento da indústria automobilística, o petróleo passou a ter posição privilegiada no cenário mundial energético, isso por causa de todas as suas características que permitem a fácil trabalhabilidade e adaptação. Entretanto, temos a consciência que o petróleo é finito (além da questão ambiental), e por isso devemos buscar alternativas para seu uso (FERREIRA, 1979).

De acordo com a FAO (2007 e GOLDEMBERG et al., 2008 apud JUNIOR, 2020), a bioenergia é a energia produzida a partir de matéria orgânica ou biomassa. Essa forma de energia está se tornando cada vez mais importante na economia global, pois é uma alternativa aos combustíveis fósseis, que são finitos e causam impactos ambientais. Segundo a Embrapa (2021), a biomassa é citada como uma fonte potencial de energia desde o início da década de 1990. Diversos estudos apontam que, entre 2025 e 2050, a participação da biomassa na matriz energética mundial terá uma variação entre 7% e 27%.

Com relação ao rendimento energético em motores de combustão interna, para se obter um bom rendimento, é necessário que a energia despendida para acelerar os seus componentes, em regime transitório, seja o menor possível (BIZARRO, 2015). Isso ocorre porque a energia despendida para acelerar os componentes do motor é considerada uma perda, pois não é convertida em trabalho útil.

O rendimento de um sistema é a relação entre a energia útil produzida pelo sistema e a energia total fornecida ao sistema. No caso de um motor de combustão interna, a energia útil é o trabalho realizado pelo motor, enquanto a energia total fornecida é a energia contida no combustível. Uma maneira simples de exemplificar o rendimento de um motor de combustão interna é por meio da relação do que o motor apresenta em forma de trabalho (*work output*), pelo que o motor ganha de energia para o seu funcionamento (*Fuel Energy*) (CARVALHO et al., 2010).

2.3.2 Modos de determinação

Os motores de combustão interna utilizam como fonte de energia o calor obtido pela queima de combustíveis fósseis (óleo diesel, gasolina, querosene etc.). O rendimento das máquinas se dá através da quantidade de trabalho mecânico extraído de uma máquina térmica e da energia fornecida a ela em forma de calor. Quanto maior o rendimento de uma máquina, maior será sua eficiência, ou seja, uma máquina térmica eficiente é aquela que produz mais trabalho consumindo menor quantidade de recursos energéticos (HELERBROCK, 2022).

Torres (1999), nos diz que existem diversas formas de medir a eficiência de um sistema. Sendo que esse fator está diretamente ligado ao desempenho, tanto dos equipamentos quanto das plantas.

A medida entre as energias possibilita a transformação dos recursos empregados no que se deseja obter. Nesse momento, a eficiência energética age no sentido de nos mostrar o quanto dessa energia é útil durante o processo. Ou seja, essa eficiência energética representa toda a energia disponibilizada no processo de conversão (BRAGA, 2011).

2.3.4 Relação Rendimento Energético x Potência

O desempenho do equipamento pode ser caracterizado pela eficiência da combustão, definida pela seguinte equação (CARVALHO, 2011):

$$\eta_c = \frac{Q}{PC}$$

(eq. eficiência da combustão)

Onde,

- η_c , representa a eficiência da combustão,
- Q é a quantidade de calor liberada durante a combustão,
- Fornecimento necessário resultado desejado $\eta = PC$ $Q_{nc} = 6 \text{ m PC W nt.}$ • = • PC é o poder calorífico do combustível.

A eficiência térmica nos motores de combustão interna, é calculada entre a potência de saída do motor pela energia de entrada do combustível Heywood (1988 apud CARVALHO, 2011). A eficiência do motor, é dada por:

$$\eta_t = \frac{W}{m * PC}$$

(eq. eficiência térmica do motor)

Onde,

- η_t representa a eficiência térmica;
- m é a vazão mássica de combustível;
- PC é o poder calorífico do combustível;
- W é a potência de saída do motor obtida em dinamômetro.

O desempenho do equipamento de combustão pode ser caracterizado pela eficiência da combustão. O melhor aproveitamento do combustível está associado ao melhor desempenho e menor consumo. Assim essa maior eficiência também proporciona menores quantidades de emissões de gases nocivos ao meio ambiente. Outro fator importante é o tipo de combustível utilizado, o que acaba por resultar em diferentes medidas de desempenho, eficiência e emissões (CARVALHO, 2011).

2.3.5 Consumo de combustível nas máquinas de colheita florestal

Nos motores e veículos de combustão interna os combustíveis mais usados são óleo diesel, gasolina, etanol e gás veicular. O diesel é o combustível mais usado no Brasil, ele alimenta máquinas e motores de grande porte como caminhões, tratores, ônibus, navios, entre outros (FIEDLER et al., 2018). Vários fatores podem afetar o consumo de combustível. Segundo Prinz (et al., 2018 apud SANTOS et al., 2021), alterações no modo de operação, no que diz respeito a rotação do motor, afetam de forma desigual o consumo de combustível nos diferentes tipos de modelos de *harvesters*. Até mesmo a ação antrópica pode ser considerada em alguns casos como um fator que contribui para o aumento do consumo de combustível. Isso ocorre quando os operadores de máquinas utilizam acelerações máximas e marchas inadequadas, conforme apontado por Silveira (et al., 2013 apud SANTOS et al., 2021). Outro fator humano importante está relacionado

ao fato da mão de obra qualificada (habilidade e nível de treinamento). O trabalhador está diretamente relacionado à eficiência da máquina, fazendo com que o consumo de horário de combustível seja otimizado, conforme Ackerman (et al., 2014 apud SANTOS et al., 2018).

O consumo de combustível pode ser apresentado como unidade de volume por unidade de tempo ($L h^{-1}$), nesse caso não se considera a influência da variação da temperatura e nem a quantidade de potência gerada. Também é possível ser feita a medição por meio de unidade de massa por unidade de tempo ($kg h^{-1}$), aqui se considera o fator temperatura, porém não contempla a potência gerada. Já no consumo específico, (forma mais técnica de se medir), refere-se à unidade de massa por unidade de potência ($g kWh^{-1}$), esta pode ser usada para comparar motores, tratores e equipamentos de tamanho e formas diferentes (LOPES et al., 2003).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Coleta de dados

Os dados foram coletados em áreas de uma empresa florestal, produtora de eucalipto, localizada nas regiões dos vales dos Rios Jequitinhonha e São Francisco, Estado de Minas Gerais, localizadas num raio de 300 km da cidade de Itamarandiba, (situada geograficamente no ponto 42°51'32" de longitude a Oeste de Greenwich e 17°51'25" de latitude a Sul da linha do Equador). A altitude média de 910 m e o clima predominante é o Aw – tropical chuvoso de savana, ou seja, inverno seco e chuvas máximas no verão, e a estação chuvosa ocorre entre os meses de outubro e março (NASCIMENTO et al., 2011).

O povoamento estudado foi o clone híbrido de eucalipto (*Eucalyptus urophilla* x *E. grandis*), com produtividade média de 245m³/ha, e idade de corte de 7 anos, com espaçamento de 3 x 3 m e índice médio de sobrevivência de 95%, sendo o relevo plano a suave ondulado. Desta forma, chega-se aos sete anos com 1.055 árvores vivas por hectare e apresentando individualmente um volume médio de 0,2322 m³/árvore. Aos sete anos de idade, a madeira apresenta densidade básica média de 0,450 g/cm³ ou 0,45 t/m³.

A colheita é realizada através do sistema de árvores inteiras (*full-tree*), sendo utilizadas as seguintes máquinas: *feller buncher* marca Caterpillar, modelo 522, equipado com cabeçote marca J de Souza, modelo CDJ14a, utilizado para realizar a atividade de derrubada das árvores; *skidder* Caterpillar, modelo 545C, com pinças, para realizar a atividade de extração das árvores derrubadas até a margem das estradas; e garras traçadoras marca J de Souza modelo GJ850rt, instaladas em máquinas Caterpillar, modelo 320D-FM-BWW, para realizar a atividade de traçamento da madeira nas margens dos talhões.

3.2 Determinação da eficiência energética

A determinação da eficiência energética se deu a partir do consumo de combustível das máquinas utilizadas nas atividades de colheita florestal (*feller buncher*, *skidder* e garra traçadora), considerando a variação nas produtividades de cada atividade

(máquina) conforme as variações de produtividade das florestas. Para tanto, foi calculado o rendimento energético (g/kW) por unidade de madeira produzida (m³), de acordo com as equações 4 e 5.

$$RE = \frac{Ce}{Prod} \quad (Eq. 4)$$

Onde: RE = rendimento energético da atividade de colheita por unidade (g/kW/m³);
Ce = consumo específico de combustível da máquina de colheita (g/kWh);
Prod = produtividade da máquina de colheita (m³/h).

$$Ce = \frac{Q}{N} \times R \quad (Eq. 5)$$

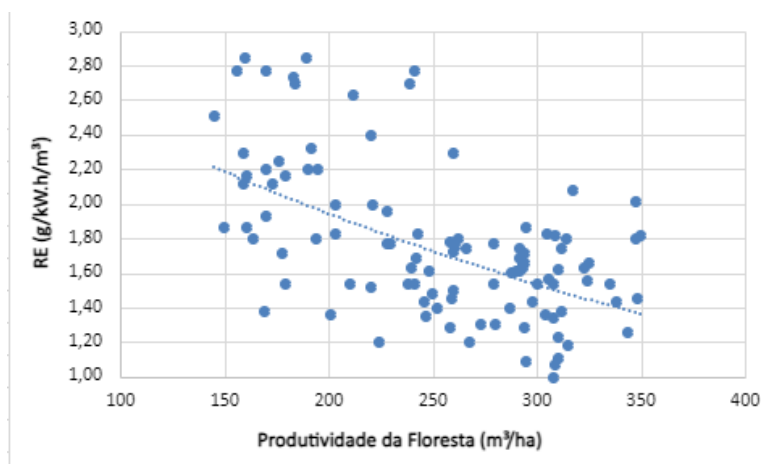
Onde: Ce = consumo específico de combustível da máquina de colheita (g/kWh);
Q = consumo de combustível da máquina de colheita (l/h);
N = potência do motor da máquina de colheita (kW);
R = densidade do combustível utilizado na máquina de colheita (kg/m³)

Foi avaliado se os valores encontrados para rendimento energético das atividades de colheita florestal, apresentaram associação entre si, com os valores de produtividade das florestas e com os valores de consumo de combustível das máquinas. Para tanto, obteve-se o grau de associação, efetuando a análise da matriz de coeficiente da correlação de Pearson (r), pelo teste t a 5% de probabilidade, sendo considerada correlação forte quando $r \geq |0,50|$, média quando $|0,50| > r > |0,30|$ e baixa quando $r \leq |0,30|$, de acordo com COHEN (1988). Em relação aos gráficos de dispersão os dois eixos (X e Y), representam a tendência de associação linear entre as variáveis com uma reta passando por esses dois pontos. A relação linear é mais forte quando essa é mais próxima de uma linha reta. Ou seja, quanto mais próximos forem os pontos da linha reta, maior é a correlação linear (FILHO et al, 2014). As análises foram realizadas em ambiente Excel e as análises estatísticas foram realizadas através do software STATISTICA for Windows (STATSOFT Inc., 1995).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

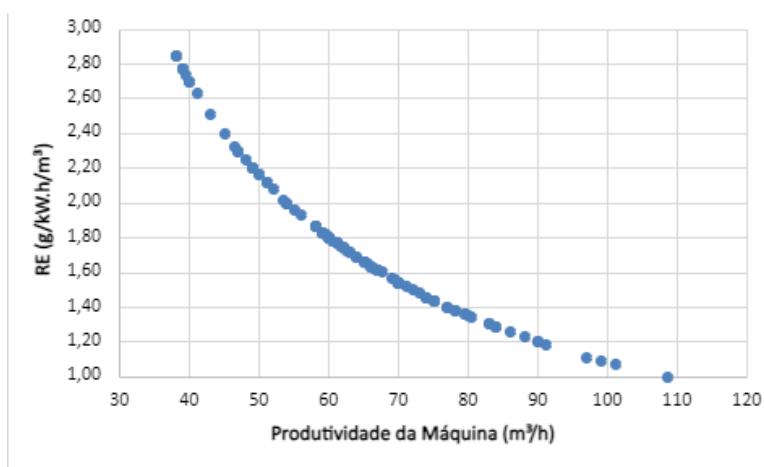
De forma a verificar a associação entre o rendimento energético, produtividade das florestas e produtividade das máquinas de colheita florestal, operando no sistema *full tree* durante o período de estudo, os resultados da análise da matriz do coeficiente de correlação de Pearson (r) por meio do teste t a 5% de probabilidade, são apresentados nos Gráficos 1 a 6 e na Tabela 1.

Gráfico 1 – Rendimento energético do *Feller Buncher* (g/kW.h/m^3) em relação a produtividade da floresta (m^3/ha)



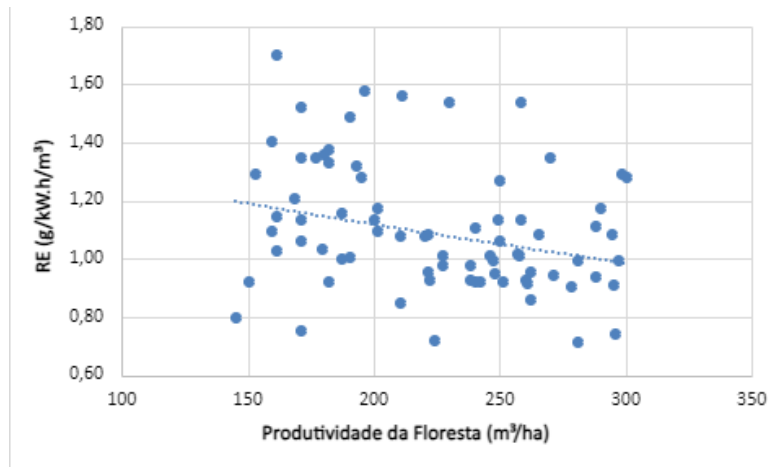
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 2 - Rendimento energético do *Feller Buncher* em relação a produtividade da máquina



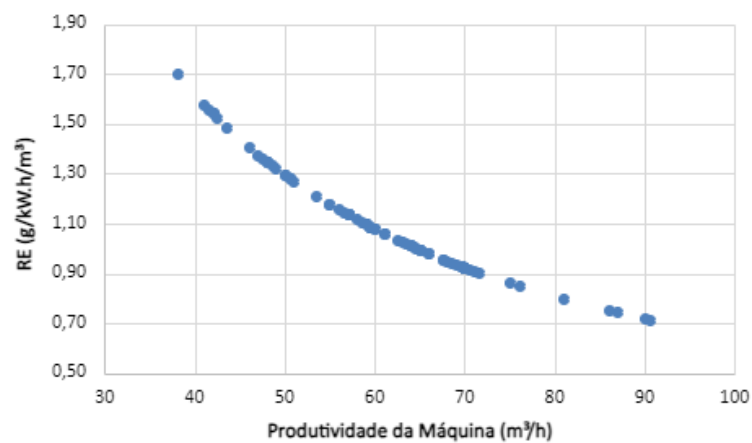
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 3 - Rendimento energético do *Skidder* em relação a produtividade da floresta



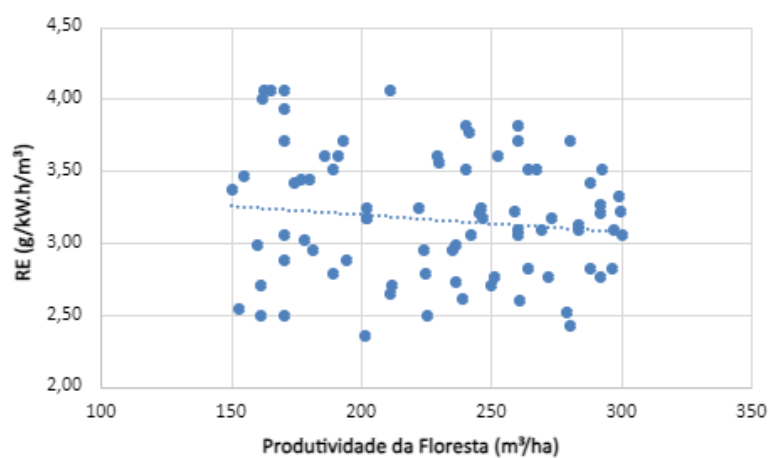
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 4 - Rendimento energético do *Skidder* em relação a produtividade da máquina



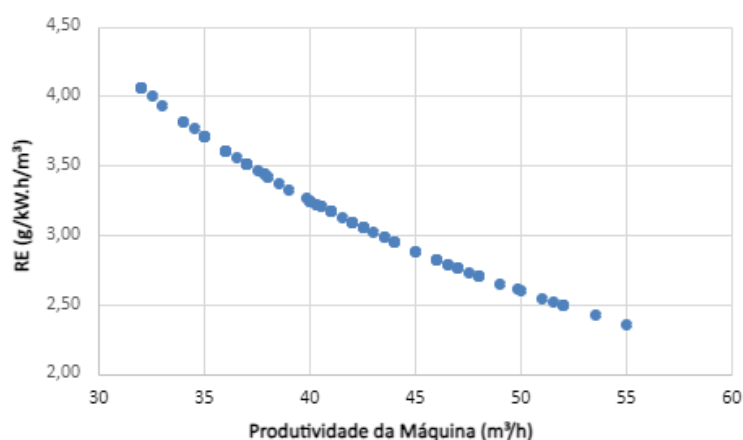
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5 - Rendimento energético da Garra Traçadora em relação a produtividade da floresta



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 6 - Rendimento energético da Garra Traçadora em relação a produtividade da máquina



Fonte: Elaboração própria

Tabela 1 - Matriz de coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis de estudo

Variáveis	<i>Feller Buncher</i>		<i>Skidder</i>		Garra Traçadora	
	PF	PM	PF	PM	PF	PM
PM	0,534*	-	0,277*	-	0,104 ^{n.s.}	-
RE	-0,574*	-0,951*	-0,298*	-0,970*	-0,150 ^{n.s.}	-0,989*

* Significativo a 5% de probabilidade de erro, pelo teste t. ^{ns} Não significativo.

Legenda: PM = Produtividade da Máquina; RE = Rendimento Energético; PF = Produtividade da Floresta.

Fonte: Elaboração própria

Os resultados apontam que a variável produtividade das florestas tem uma forte correlação positiva com a produtividade do *Feller Buncher*, média correlação positiva com a do *Skidder* e baixa correlação positiva com a da Garra Traçadora. Resultados semelhantes foram encontrados por Schettino et al. (2015), quando demonstraram maiores produtividades das máquinas de colheita com o incremento da volumetria das florestas.

Nessa mesma vertente, de forma negativa, as correlações entre a produtividade das florestas e o rendimento energético das máquinas colheita apresentaram comportamento semelhante. Vale ressaltar que o sinal negativo desta correlação é

desejável, visto que, quanto menor for o valor assumido pela variável rendimento energético, melhores serão os seus efeitos (menor quantidade de energia para a produção de uma unidade de volume de madeira).

Por sua vez, a variável rendimento energético, objeto desse estudo, demonstrou correlação negativa quase perfeita quando associada a produtividade das máquinas, indicando que, nas condições avaliadas, qualquer acréscimo de produtividade das máquinas de colheita implica em melhoria do rendimento energético da atividade. Tal constatação se deu para todas as máquinas avaliadas, independentemente da atividade que essas estavam executando.

O *Feller Buncher* é a máquina que apresenta, positivamente, a maior resposta a volumetria da floresta e que o acréscimo de produtividade do mesmo é diretamente proporcional ao incremento na volumetria dos povoamentos, corroborando os resultados encontrados por Fernandes et al. (2009), Simões et al. (2014) e Schettino et al. (2015). Oliveira Junior et al. (2009) afirmam que isso é verificado devido ao volume médio individual das árvores, que tende a ser maior quanto o maior for a volumetria das florestas, considerando o mesmo espaçamento e número de árvores por hectare, caso deste estudo. Os autores afirmam, ainda, ser possível pressupor que o tempo gasto para cortar uma árvore de 0,11 m³ seja igual ao de outra de 0,25 m³. Desta forma, o rendimento do feller buncher em termos de volume por unidade de tempo cresce à medida que se aumenta o volume médio por árvore.

O sistema de extração mecanizada com *Skidders* é beneficiado pelo aumento do volume do povoamento, embora não na mesma proporção que o *Feller Buncher*. De acordo com Oliveira et al. (2006, isso se deve à relação entre produtividade e altura das árvores, que é maior em povoamentos mais produtivos, pois a área de apreensão da pinça dessa máquina permanece constante, resultando em um maior volume arrastado com árvores mais longas. Em contraste, a garra traçadora mostrou baixa sensibilidade à produtividade florestal, embora houvesse uma correlação positiva. Estudos anteriores destacaram que o rendimento da garra traçadora é afetado pelo volume de madeira e pelo arranjo dos feixes na pilha, com destaque para o volume médio das árvores, pois o acréscimo no volume e no peso dessas pode dificultar o manuseio com a garra traçadora durante o processamento (LOPES et al., 2008).

Correlacionando esse ganho de produtividade das máquinas com o rendimento energético, tem-se que em motores diesel, caso das máquinas de colheita florestal, o

regime de trabalho se dá sob uma potência nominal, com rotação e alimentação de combustível constantes (ALMEIDA et al., 2010). Dessa forma, quanto mais trabalho for realizado pela máquina (produtividade), melhor será a eficiência energética. Há ainda que se considerar que a colheita florestal mecanizada em sistema *full tree* pode responder por até 10% do total de combustível necessário para todo o ciclo de produção florestal (SOUZA et al., 2019) e, sob essa ótica, os ganhos de eficiência energética serão extrapolados para a esfera ambiental ao reduzir as emissões de CO₂ por unidade de madeira produzida.

Há ainda que se considerar que máquinas mais eficientes do ponto de vista energético consomem menos combustível por unidade de madeira produzida, resultando em custos operacionais mais baixos para a operação de colheita florestal. Isso pode representar uma economia significativa a longo prazo. Ainda, máquinas de colheita florestal mais eficientes frequentemente têm melhor desempenho, o que pode resultar em uma maior produtividade e isso significa que uma quantidade maior de madeira ou produtos florestais pode ser colhida em um período de tempo mais curto. Merece destaque também o fato de que máquinas mais eficientes tendem a experimentar menos desgaste e, portanto, requerem menos manutenção. Isso pode economizar tempo e dinheiro, além de evitar paradas não programadas.

Em outra vertente, verifica-se o fato de que em muitas regiões, existem regulamentos ambientais rigorosos que estabelecem limites para as emissões de máquinas industriais. A melhoria da eficiência energética pode ajudar as operações de colheita a cumprir essas regulamentações e evitar penalizações. Com isso, a adoção de práticas sustentáveis, como a melhoria da eficiência energética, pode melhorar a imagem da empresa perante os consumidores, investidores e reguladores, o que pode ser benéfico para o relacionamento com partes interessadas.

Por fim, os resultados apresentados indicam a importância do entendimento de quais são as variáveis e como estas influenciam na eficiência energética das atividades de colheita florestal, como se comportam individualmente e em conjunto, de forma a fornecer subsídios para o planejamento das operações relacionadas à colheita da madeira e, concomitantemente, garantir um melhor rendimento nas operações e os benefícios ambientais associados as atividades.

5. CONCLUSÕES

Todas as máquinas apresentaram fortíssima correlação negativa entre produtividade e eficiência energética, demonstrando que um acréscimo na produtividade das mesmas acarreta, em ordem inversamente proporcional, uma melhoria da eficiência energética da operação, independentemente da atividade realizada.

A produtividade das florestas tem uma forte correlação positiva a produtividade o *Feller Buncher*, média correlação positiva com a do *Skidder* e baixa correlação positiva com a da Garra Traçadora. As correlações entre a produtividade das florestas e o rendimento energético das máquinas colheita apresentaram correlação semelhante em ordem e grandeza, entretanto de forma negativa.

A redução do consumo de combustível diminui a emissão de poluentes atmosféricos e as emissões de gases de efeito estufa por unidade de madeira produzida, contribuindo para a redução do impacto ambiental da colheita florestal. Isso é especialmente importante em um contexto de preocupações com as mudanças climáticas.

A utilização de máquinas de colheita florestal eficientes em termos energéticos pode gerar uma vantagem competitiva aos produtores florestais, uma vez que podem oferecer produtos florestais a preços mais competitivos devido aos custos operacionais mais baixos.

A melhoria da eficiência energética em máquinas de colheita florestal oferece vantagens significativas que vão desde a economia de custos e a redução do impacto ambiental até o aumento da produtividade e a conformidade com regulamentações. Portanto, é uma prática importante para o setor florestal moderno, que busca equilibrar o uso sustentável dos recursos naturais com a eficiência operacional.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012**. 2013. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3910>. Acesso em 10 de agosto de 2023.

ALMEIDA, R.A.S.; SILVA, C.A.T.; SILVA, S.L. Desempenho energético de um conjunto trator-semeadora em função do escalonamento de marchas e rotações do motor. **Agrarian**, v. 3, n. 7, p. 63-70, 2010.

B.FOREST. **Floresta 4.0**. 2019. Disponível em: https://revistabforest.com.br/wp-content/uploads/2019/09/b.forest-59_download.pdf . Acesso em 21 de outubro de 2023.

BIZARRO, Álvaro José Gandarez de Oliveira. **Projeto do Pistão de um Motor de Combustão Interna para um Veículo de Elevada Eficiência Energética**. Tese de mestrado. 2015. Disponível em: <https://eg.uc.pt/bitstream/10316/39049/1/Projeto%20do%20Pistao%20de%20um%20Motor%20de%20Combustao%20Interna%20para%20um%20Veiculo%20de%20Elevada%20Eficiencia%20Energetica.pdf>. Acesso em 10 de agosto de 2023.

BRAGA, D. R.G. **Análise do aproveitamento energético do biogás gerado no Aterro Metropolitano Centro em Salvador/BA**. 2011. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

BURLA, Everson Ramos et al. **Avaliação técnica e econômica do harvester em diferentes condições operacionais**. Engenharia na agricultura, viçosa - mg, V.20 N.5, setembro p.412-422. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.13083/reveng.v20i5.202>. Acesso em 15 de outubro de 2023.

CARVALHO, C. H. R. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). 2011.

CARVALHO, Luiza Marina Esteves de et al. **Simulação de cenários de variação da eficiência operacional e da produtividade no desempenho e custo das atividades de corte extração florestal**. Anais 18º Seminário de Colheita e Transporte de Madeira, p.27-30. 2018. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/item/14>. Acesso em 21 de outubro de 2023.

CARVALHO, Márcio Augusto Sampaio de et al. **Metodologia para o estudo do rendimento termodinâmico de motores de combustão interna ciclo otto**. VI congresso nacional de engenharia mecânica. 2010. 2010. Acesso em: <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-1955.pdf>. Acesso em 16 de agosto de 2023.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. New Jersey: Lawrence Earlbaum Associates. 1998.

CORTEZ, Luíz Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares. **Biomassa Para Energia**. Campinas, SP. Editora da Unicamp. 2008.

CUNHA, Gabriel Thales da. et al. **Panorama do setor florestal brasileiro com ênfase no estado de minas gerais**. Enciclopédia biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.16 n.29; p. 1582. 2019. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2019a/agrar/panorama%20do.pdf>. Acesso em 2 de setembro de 2023.

EMBRAPA. **Contribuições das pesquisas com eucaliptos para a expansão de fronteiras das florestas plantadas brasileiras**. Capítulo em livro técnico-científico, cap.9, p. 395-494. 2021. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/223307/1/EmbrapaFlorestas-2021-LV-EucaliptoEmbrapa-cap9.pdf>. Acesso em 5 de setembro de 2023.

EMBRAPA. **Florestas energéticas**. Capítulo em livro técnico-científico, cap. 26, p. 941-980. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/223340/1/EmbrapaFlorestas-2021-LV-EucaliptoEmbrapa-cap26.pdf>. Acesso em 8 de agosto de 2023.

FERNANDES, H.C.; LOPES, S.E.; TEIXEIRA, M.M.; et al. Avaliação das características técnica e econômica de um sistema de colheita florestal de árvores inteiras. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 83, p. 225-232, 2009.

FERREIRA, Josué Félix. **Alternativas energéticas, para motores a combustão interna**. Cadernos Ômega, Recife, v.3, n.1-2, p. 243-248, jan./dez. 1979. Disponível em: <http://hdl.handle.net/123456789/178>.

FIEDLER, Nilton César; OLIVEIRA, Michael Picanço. **Motores e Máquinas Florestais**. Alegre, ES. Ed. CAUFES. 2018.

FILHO, D. B. F.; ROCHA, E. C.; JÚNIOR, J. A. S.; PARANHOS, R.; NEVES, J. A. B.; SILVA, M. B. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson: O retorno**. Leviathan | Cadernos de Pesquisa Política. N. 8, pp.66-95. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2237-4485.lev.2014.132346>. Acesso em 30 de outubro de 2023.

GHAFFARIYAN, Mohammad Reza. **General Productivity Predicting Model for Skidder Working in Eucalypt Plantations**. Eur J Forest Eng 2020, 6(1): 1-6. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33904/ejfe.618344>. Acesso em 26 de setembro de 2023.

HELERBROCK, Rafael. "Rendimento das máquinas térmicas"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/rendimento-das-maquinas-termicas.htm>.

IBÁ. **Infográfico mudança do clima: por uma nova economia**. 2021. Disponível em: https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/infograficos/infografico-mudancadoclima-porumanovaeconomia_2.pdf. Acesso em 12 de agosto de 2023.

IBÁ. Relatório Anual IBÁ. 2021. Disponível em: <https://iba.org/publicacoes>. Acesso em 02 de agosto de 2023.

IBÁ. Relatório Anual IBÁ. 2023. Disponível em: <https://iba.org/publicacoes>. Acesso em 18 de novembro de 2023.

IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2020**. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2020_v35_informativo.pdf. Acesso em 18 de setembro de 2023.

IPEF. **Levantamento do nível de mecanização na silvicultura**. 2021. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/nivel-de-mecanizacao-2020-2021/>. Acesso em 9 de setembro de 2023.

JUNIOR, Luiz Moreira Coelho et al. **O desenvolvimento brasileiro das florestas de rápido crescimento com fins energéticos**. Brazilian Journal of Development v. 6, n. 5, p. 28111-28125, 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/10146/8490>. Acesso em 20 de agosto de 2023.

LEITE, Elton da Silva et al. **Benefícios do desempenho da motopoda no desgalhamento da colheita florestal**. Revista Engenharia na Agricultura V.27, n.1, p.30-36, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i1.854>. Acesso em 29 de agosto de 2023.

LIMA, A. F. C.; JÚNIOR, M. T. S.; CORDEIRO, V. A.; SEGATO, L. S.; MARCATTI, G. E. **PROCEDIMENTO EM SIG PARA DETERMINAÇÃO DE ÁREAS DE CORTE E ARRASTE DE MADEIRA NA COLHEITA FLORESTAL**. Anais do XIX simpósio brasileiro de sensoriamento remoto. 2019. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/09.13.17.52/doc/97514.pdf>. Acesso em 2 de outubro de 2023.

LINHARES, Mariana. **Eficiência e desempenho operacional de máquinas harvester e forwarder na colheita florestal**. Pesq. Agropec. Trop., Goiânia, v. 42, n. 2, p. 212-219, abr./jun. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pat/a/PWMQmnXPPG83BpcmJVMSSPK/format=pdf&lang=pt>. Acesso em 13 de setembro de 2023.

LOPES, S.E.; FERNANDES, H.C.; SANTOS, N.T. Avaliação técnica e econômica de uma garra traçadora operando em diferentes produtividades. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 79, p. 215-222, 2008.

MACHADO, Carlos Cardoso. **Colheita Florestal**. 3.ed., Viçosa, MG: Ed. UFV. 2014.

MAIS FLORESTAS. **Empresa Reflorestar investe em eficiência energética na colheita mecanizada**. 2023. Disponível em: <https://www.maisfloresta.com.br/empresa-reflorestar-investe-em-eficiencia-energetica-na-colheita-mecanizada/>. Acesso em 3 de novembro de 2023.

MARTINI, Augusto Jeronimo. **O plantador de eucaliptos: a questão da Preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade**. Tese de mestrado. 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8138/tde04062004231644/publico/Oplanta dorDeEucaliptos1.pdf>. Acesso em 16 de setembro de 2023.

NASCIMENTO, A.C.; LEITE, A.M.P.; SOARES, T.S.; FREITAS, L.D. Avaliação técnica e econômica da colheita florestal com feller buncher. **Cerne**, v. 17, n. 1, p. 9-15, 2011.

NASCIMENTO, Diego Weslly Ferreira do Nascimento et al. **Análise técnica e econômica de dois subsistemas de colheita de madeira de toras curtas**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias v.13, n.2, e5516, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i2a5516>. Acesso em 23 de setembro de 2023.

OLIVEIRA JUNIOR, E.D.; SEIXAS, F. BATISTA, J.L.F. Produtividade de feller-buncher em povoamento de eucalipto em relevo acidentado. **Floresta**, v. 39, n. 4, p. 905-912, 2009.

OLIVEIRA, R.J.; MACHADO, C.C.; SOUZA, A.P. Avaliação técnica e econômica da extração de madeira de eucalipto com “clambunck skidder”. **Revista Árvore**, v. 30, n.2, p. 267-275, 2006.

PROTO, A. R.; MACRÌ, G.; VISSER, R.; HARRIL, H.; RUSSO, D.; ZIMBALATTI, G. **Factors affecting forwarder productivity**. European Journal of Forest Research. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6>. Acesso em 17 de outubro de 2023.

REVISTA OPINIÕES. **Eficiência energética de máquinas**. 2023. Disponível em: <https://florestal.revistaopinioes.com.br/pt-br/revista/detalhes/9-eficiencia-energetica-de-maquinas/#:~:text=M%C3%A1quinas%20florestais%20s%C3%A3o%20um%20investimento,diferen%C3%A7as%20encontradas%20em%20diferentes%20resultados>. Acesso em 3 de novembro de 2023.

RIBASKI, Nayara Guetten. **Conhecendo o setor florestal e perspectivas para o futuro**. Braz. J. Anim. Environ. Res., Curitiba, v. 1, n. 1, p. 44-58, jul./set. 2018. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/index.php/BJAER/article/view/329>. Acesso em 4 de outubro de 2023.

RODRIGUES, Carla Krulikowski. **Colheita e Transporte Florestal**. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327751163_COLHEITA_E_TRANSPORTE_FLORESTAL. Acesso em 14 de outubro de 2023.

SANTOS, D. W. F. N., VALENTE, D. S. M., FERNANDES, H. C., SOUZA, A. P., & VOLPATO, C. E. S. (2021). **Parâmetros técnicos, econômicos e ambientais de máquinas florestais em função de configurações do motor e bomba hidráulica**. Scientia Forestalis, 49(130), e3520. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n130.13>. Acesso em 15 de outubro de 2023.

SCHETTINO, S.; MINETTE, L.J; SOUZA, A.P. **Correlação entre volumetria de florestas de eucalipto e produtividade e custos de máquinas de colheita de madeira**. Árvore, v. 39, n. 5, p. 935-942, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000500016>. Acesso em 26 de outubro de 2023.

SIMÕES, D.; FENNER, P.T.; ESPERANDINI, M.S.T. **Produtividade e custos do feller-buncher e processador florestal em povoamento de eucalipto de primeiro corte**. Ciência Florestal, v. 24, n. 3, p. 621-630. 2014. Acesso em 26 de outubro de 2023.

SNIF. Florestas Plantadas. 2020. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-plantadas>. Acesso em 12 de agosto de 2023.

SOUZA, C.L.; SCHETTINO, S.; SILVA, D.D.; GUIMARÃES, N.V. **Balanço de Carbono do processo de produção de madeira de reflorestamento no Norte de Minas Gerais**. Caderno de Ciências Agrárias, v. 11, p. 01-08, 2019.

STATSOFT, Inc. **STATISTICA for Windows, Release 5.0**. Computer program manual. Tulsa, OK: StatSoft, Inc. 1995.

TORRES, E.A. **Avaliação energética e termoeconômica de um sistema de cogeração de um polo petroquímico**. Tese de doutorado, FEM/UNICAMP, Campinas, 1999.