

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ENGENHARIA FLORESTAL

**GESTÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA SILVICULTURA
MECANIZADA COMO FERRAMENTA DE ESG**

MATEUS RODRIGUES ROCHA



Mateus Rodrigues Rocha

**GESTÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA SILVICULTURA
MECANIZADA COMO FERRAMENTA DE ESG**

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
Instituto de Ciências Agrárias – UFMG
2024

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, a minha
família e ao meu orientador.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida e por me conceder forças para superar cada obstáculo ao longo dessa jornada acadêmica. Sem Ele, nada disso seria possível.

À minha mãe, Maria Eleny, sou eternamente grato por ensinar-me a ser forte e resiliente, e ao meu pai, Gentil Dias, por seu apoio incondicional nos momentos em que mais precisei e por sempre acreditar em mim.

Agradeço também à minha irmã, Ane Rocha, e aos meus sobrinhos, Luiz Fernando e Gael, que sempre iluminam meus dias com alegria.

Minha gratidão se estende à minha noiva, Iessa Dias, que esteve ao meu lado em todos os momentos desta caminhada, oferecendo apoio, amor e lutando junto comigo. Tenho um profundo amor por ela. Agradeço especialmente à minha filha, Mayle Dias, meu maior tesouro. Não há palavras para descrever a felicidade que sinto ao chegar em casa cansado e ser recebido com seus abraços, sorrisos e o doce som de “papai”. Tudo isso é por mim e por você.

Aos amigos, colegas de curso e ao corpo docente da Engenharia Florestal, meu muito obrigado por fazerem parte dessa jornada. Um agradecimento especial a Davi Pereira, Dawyd Novaes, Maria Rita Nascimento e a tantos outros colegas com quem compartilhei os desafios e aprendizados mais intensos. Deixo minha gratidão por cada troca de conhecimento, cada conversa e todo o apoio nos momentos mais difíceis. Foi um privilégio dividir esta etapa com vocês.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Stanley Schettino, expresso minha mais profunda gratidão. Sem sua paciência, suporte, conselhos e parceria, nada disso seria possível. Sua dedicação como profissional e ser humano é inspiradora, e espero um dia ser pelo menos metade do profissional que você é.

Agradeço também a toda a comunidade Docente do curso de Engenharia Florestal do Instituto de Ciências Agrárias (ICA) pela generosidade em compartilhar conhecimentos que levarei para a vida inteira.

Ao PET Engenharia Florestal, onde passei boa parte da minha graduação como bolsista, sou grato pelos inúmeros aprendizados. Em especial, agradeço ao Prof. Dr. Christian Dias Cabacinha pelas conversas e oportunidades, e aos colegas do programa, com quem construí amizades e troquei experiências enriquecedoras.

Sou imensamente grato às empresas que abriram suas portas para mim durante os estágios. Em especial, à Aperam Bioenergia e à Francio Soluções Florestais, onde adquiri

conhecimentos e experiências inestimáveis. Trabalhar com o que amo e encontrar pessoas incríveis no caminho foi um privilégio que levo com carinho e gratidão.

Por fim, agradeço ao Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pela oportunidade de cursar uma graduação de excelência. Também sou grato à Fundação Universitária Mendes Pimentel (FUMP) pela assistência que tornou possível minha permanência na universidade. Muito obrigado a todos que contribuíram para que esta conquista se tornasse realidade.

*“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho
é no dicionário”.*

(Albert Einstein)

RESUMO

No presente, a humanidade continua a depender fortemente de fontes de combustíveis fósseis para geração de energia, contribuindo diretamente para o aumento das emissões de carbono na atmosfera. Nesse contexto, a transição para uma matriz energética sustentável é um dos principais desafios na busca pela descarbonização global, impulsionando a busca pela melhoria da eficiência energética no setor agroflorestal. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência energética das atividades silviculturais mecanizadas, correlacionando com a potência, o consumo de combustível e a produtividade das máquinas. Três atividades silviculturais do ciclo de produção de madeira em florestas plantadas no cerrado mineiro foram analisadas: roçada, adubação e subsolagem. Para cada atividade foram avaliados o consumo de combustível e a produtividade das máquinas, considerando a utilização de diferentes tipos de tratores e, após isso, foi calculada a eficiência energética para cada caso. Foi avaliado se os valores encontrados para rendimento energético das atividades de silvicultura, apresentaram associação entre si, com os valores de potência dos tratores, com os valores de produtividade das atividades e com os valores de consumo de combustível das máquinas. Os resultados apontam que todas as variáveis analisadas (potência e produtividade dos tratores, e consumo de combustível) tem uma forte correlação negativa com a eficiência energética, independentemente da atividade e, ou do tipo e trator utilizado, significando que aumento de produtividade, de potência e, ou, melhora no consumo de combustível representam ganhos consideráveis de eficiência energética. Conclui-se que merece destaque a necessidade de aprimorar a eficiência energética na silvicultura para reduzir custos operacionais e impactos ambientais. A adoção de tecnologias avançadas, como sistemas de gerenciamento de energia, motores eficientes e combustíveis alternativos, pode diminuir significativamente o consumo de combustível e as emissões poluentes. Além disso, integrar a gestão dessas variáveis ao planejamento estratégico reforça a eficiência operacional, a sustentabilidade e o compromisso com os pilares ESG

Palavras-chave: Gestão energética; Consumo de combustível; Operações florestais; Mecanização florestal; Governança ambiental.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 A silvicultura no Brasil	4
2.2 Porque mecanizar?	5
2.3 Desafios da mecanização	8
2.4 Rendimento Energético	9
2.5 Eficiência em motores de combustão interna.....	10
2.6 Motores de combustão interna	11
2.7 ESG	12
2.8 As contribuições do setor florestal brasileiro	13
2.9 As contribuições da silvicultura	15
2.10 Desafios para redução de emissões de CO ₂	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1 Coleta de dados	19
3.2 Atividades Avaliadas.....	19
3.3 Determinação do Consumo de Combustível por Atividade	20
3.4 Determinação da eficiência energética.....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5. CONCLUSÕES.....	25
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	26

1. INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro está em constante crescimento, abrangendo uma área de 10,2 milhões de hectares de florestas plantadas. Esse avanço, em conjunto com as condições favoráveis de clima e solo do país, tem contribuído significativamente para o aumento da demanda por produtos florestais (Ibá, 2024).

Além disso, o setor florestal brasileiro é um dos setores com maior potencial para o desenvolvimento de uma economia "verde", ambientalmente correto, socialmente justo e economicamente viável. A matéria-prima desse setor é uma variedade de produtos, incluindo celulose, carvão vegetal, madeira, compensados, móveis e pisos laminados, entre outros, que são fabricados em quase todos os estados brasileiros.

Atualmente, aproximadamente 86,4% da procura global de energia ainda provém de fontes de combustíveis fósseis. A natureza finita e poluente das fontes de petróleo exige a procura de fontes alternativas de energia, tais como fontes de energia limpa, que incluem biomassa, energia solar, energia hidroelétrica e energia eólica. (Embrapa, 2021).

Para acomodar o avanço das alterações climáticas e garantir a autonomia da sustentabilidade, é imperativo transformar a economia global. Os governos de todo o mundo e vários setores procuram soluções para esta transformação. A aplicação de práticas ESG (Ambientais, Sociais e de Governança) resultou no aumento dos investimentos corporativos vinculados à redução das emissões de carbono. Exemplos incluem certificações, redução de resíduos, investimentos diretos e invasões de empresas, entre outros (Ibá, 2023).

Além dos investimentos nas operações industriais, tem havido grande ênfase na sua expansão comercial. Esta tendência permanece robusta, particularmente em relação à mudança global de hábitos, que se caracteriza pela crescente procura de produtos sustentáveis. Diante deste cenário, a indústria do plantio de árvores tem sido um dos exemplos no desenvolvimento desta "economia verde". (Ibá, 2023).

Desde a década de 1970, máquinas estão em operação no Brasil. No entanto, foi somente em 1994 que o nível de intensidade de máquinas na área florestal aumentou devido ao alto custo da mão de obra, à abertura das importações e à necessidade de um trabalho mais ergonômico. Com o crescimento exponencial da automação desde a década de 2000, o mercado tem assistido a uma maior variedade de máquinas mais adequadas às diversas atividades do setor e às condições ergonômicas do operador florestal. Consequentemente, o objetivo é reduzir os custos

de produção, diminuir a dependência de mão de obra manual, aumentar a produtividade, reduzir acidentes de trabalho e danos ambientais e, ainda, garantir o fornecimento contínuo de madeira às unidades consumidoras (Schettino, 2017).

Segundo Cortez et al., (2008), a quantidade de energia gerada nas operações florestais não é apenas resultado do consumo de combustíveis, mas também daquela gerada na fabricação e distribuição de máquinas e equipamentos, petróleo, óleo hidráulico e trabalho humano, entre outras coisas. Nas últimas décadas, as práticas de preparo do solo no setor florestal passaram por uma transformação substancial. Ocorreu uma transição de métodos intensivos, que resultaram em alterações significativas na estrutura física do solo em toda a extensão da terra por meio do uso de equipamentos pesados, para abordagens de cultivo mínimo.

Diversos equipamentos foram desenvolvidos e estão amplamente disponíveis no mercado para quem precisa romper a camada compacta do solo. Dentre eles, o subsolador é um dos principais dispositivos utilizados para eliminar ou minimizar os efeitos negativos causados pela compactação do solo (Grotta et al., 2004). Segundo Salvador et al. (2009), a subsolagem é uma das operações mecânicas mais caras e que mais consomem energia por área. No entanto, na silvicultura, muitas vezes essa prática não é realizada com o objetivo principal de romper a camada de solo compactada. Em vez disso, ela se esforça para mobilizar uma pequena porção de solo para facilitar o plantio e o estabelecimento das mudanças (Simões et al., 2007).

Operações florestais mecanizadas devem ser planejadas de forma estratégica e racional para maximizar a rentabilidade no campo (Toledo et al., 2010). Neste contexto, Hunt (1995) enfatiza que pequenas melhorias no gerenciamento das máquinas podem gerar retornos mais significativos do que economias substanciais em outros custos de produção. A identificação e quantificação de variáveis de influência são fatores críticos no planejamento e sucesso das operações, conforme enfatizam (Oliveira Júnior et al., 2009). Esses fatores desempenham um papel crítico na viabilidade econômica e otimização das atividades florestais.

De acordo com o site da Revista Opiniões (2023), a aquisição e utilização de maquinaria florestal necessita de um investimento substancial e a sua rentabilidade depende principalmente da sua eficiência energética e taxa de utilização. Atualmente existem indicadores diretos de eficiência disponíveis no mercado. No entanto, nenhuma ferramenta é capaz de explicar com precisão as diferenças observadas nos diversos resultados.

A eficiência energética é influenciada pela capacidade do operador de operar a máquina e pela capacidade de planejar seu próprio trabalho. Isso inclui a capacidade de modificar as

configurações da máquina, aumentando assim a produção e o consumo de combustível. A eficiência energética também é significativamente influenciada pelos níveis de pressão hidráulica das máquinas e pelos ajustes individuais substanciais feitos pelo computador (Revista Opiniões, 2023).

De acordo com entrevista realizada pelo site Mais Florestas (2023), uma empresa decidiu substituir máquinas com maior consumo de resíduos e diesel por equipamentos e aparelhos mais modernos. Além disso, a empresa também fez investimentos no desenvolvimento profissional de seus operadores, pois isso está diretamente relacionado ao desempenho da máquina.

Algumas empresas também implementam simulações e programas de computador, como o EcoDrive, que monitora a eficiência do trabalho e informa ao operador os níveis adequados de energia e combustível para vários cenários de campo (Revista Opiniões, 2023). Além disso, um processo de planejamento passivo e meticuloso tem o potencial de aumentar a eficiência energética, mantendo a mesma eficiência e desempenho, reduzindo o consumo de combustível e eliminando movimentos desnecessários. No entanto, os métodos atuais de medição do consumo de combustível (tipicamente medidos em litros por hora de trabalho) parecem ser insuficientes para validar a eficiência energética da atividade florestal mecanizada.

Neste contexto, este estudo ressalta sua importância nos aspectos científicos (pesquisa), tecnológico, econômico e ambiental ao fornecer incentivos satisfatórios para a tomada de decisão no que se refere ao dimensionamento de máquinas de acordo com as características das comunidades a serem mineradas.

Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência energética das atividades silviculturais mecanizadas, correlacionando com a potência, o consumo de combustível e a produtividade das máquinas, de forma a fornecer subsídios para tomada de decisões em situações de planejamento de atividades silviculturais tendo em vista os princípios e práticas de ESG.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A silvicultura no Brasil

O Brasil é um dos maiores países com florestas do mundo e tem sido amplamente explorado desde o seu descobrimento. As cinco fases que compõem o setor florestal do país são descritas por (Hora, 2015). A primeira, que começou durante a colonização portuguesa e terminou no início do século XIX, tinha elementos científicos e ornamentais. A primeira fase terminou no final e continuou até a década de 1960. Ela consistia em plantios florestais para fins econômicos e não teve muitas mudanças (Hora, 2015).

Posteriormente, a década de 1960 viu o início da terceira fase. Segundo Cunha et al., (2019), foi apenas neste período que o governo iniciou um programa de incentivos fiscais que permitiu a expansão do setor florestal com o objetivo de promover a cadeia produtiva de madeira e seus derivados.

Até o início dos anos 60, o setor florestal brasileiro era considerado inexpressivo porque o governo não demonstrava interesse no crescimento da atividade florestal do país. Como resultado, o manejo das florestas, tanto plantadas quanto nativas, era quase insignificante, com baixo uso de tecnologia e gestão de projetos. Além disso, muitos produtores não se interessavam em investir grandes quantias de dinheiro em seus projetos, principalmente devido aos riscos associados ao longo período de retorno do capital dos empreendimentos florestais (Silva, 2018; Cunha et al., 2019).

Segundo Cunha et al., (2019), mesmo após a implementação dos incentivos fiscais, a silvicultura no país enfrentou desafios técnicos e falta de conhecimento aprofundado sobre as espécies a serem cultivadas e seus cuidados (Hora, 2015). Por outro lado, as características edafoclimáticas do Brasil foram capazes de superar rapidamente esses obstáculos, permitindo um aumento de produtividade de cinco décadas em países de clima temperado para espécies como Pinus e Eucalyptus. Isso levou ao desenvolvimento da silvicultura no país a aumentar a produtividade das florestas (Cunha et al., 2019).

No final dos anos 80, a terceira etapa terminou e a quarta começou, que continuou até os anos 2000. Devido ao fim dos incentivos fiscais do governo, a base florestal plantada no país diminuiu significativamente durante esta fase (Hora, 2015).

Atualmente, as grandes empresas de papel, celulose, siderurgia e painéis de madeira reconstituída estão promovendo a quinta e última etapa. Esta fase é marcada pela recuperação da expansão florestal do país com o uso de áreas degradadas, principalmente por atividades de agropecuária. Essas áreas eram antes consideradas improdutivas e foram recuperadas principalmente para o plantio de florestas de pinus e eucalipto (Cunha et al., 2019).

Atualmente, aproximadamente 10,2 milhões de hectares de florestas são cultivadas no Brasil (Ibá, 2024).

Se tratando da economia, de acordo com os dados do (Ibá, 2024), dentre as 34 atividades setoriais do país, a indústria que planta árvores para fins industriais ocupa a 5ª posição no ranking de participação no PIB nacional.

Segundo a Relação Anual de Informações Sociais (Rais, 2021), o setor de árvores plantadas criou 2,6 milhões de empregos, diretos e indiretos. Apenas para os diretos, havia 663 mil vagas em 2022, um aumento de 8% em relação à mesma fonte do ano anterior (614 mil vagas). Isso leva a uma massa salarial de quase R\$ 2 bilhões de reais (Ibá, 2023).

O setor de base florestal continua investindo em novos empreendimentos e expansões. Nos próximos anos, são esperados investimentos de cerca de R\$ 62 bilhões, criando empregos diretos e oportunidades significativas para o efeito renda (Ibá, 2023).

De acordo com o Ibá (2023), existem 1,91 milhão de empregos indiretos e, para cada trabalhador que trabalha diretamente no setor de base florestal, os induzidos criam 5,3 empregos adicionais em todas as cadeias que usam insumos da indústria florestal brasileira. Isso resulta em 3,56 milhões de empregos induzidos, que, ao se somar aos 2,6 milhões de empregos diretos e indiretos, equivalem a mais de 6,1 milhões de pessoas.

No Brasil, ainda existe um vasto potencial para o desenvolvimento da silvicultura, com muito a ser explorado em termos sociais, econômicos e ambientais. A silvicultura, entre as atividades econômicas, pode ser a que mais contribui para a formação de uma Economia Verde, uma vez que é praticada de acordo com seus princípios e fornece recursos para que outras atividades possam trilhar o caminho da sustentabilidade (Valverde et al., 2022).

2.2 Porque mecanizar?

Analisar a produtividade envolve identificar, avaliar e reduzir a influência de elementos que possam modificar os resultados esperados, proporcionando grandes vantagens para as empresas, como incremento nos lucros e redução do retrabalho. A produtividade e os

indicadores de produtividade têm sido empregados para avaliar e monitorar o rendimento. No entanto, quando não são abordados de maneira sistemática, podem não proporcionar uma perspectiva completa das tarefas (King et al., 2019).

Produtividade é a habilidade de produzir mais e de forma mais eficiente, em um período de tempo menor, com menos esforço, sem modificar os recursos existentes. A ideia de produtividade está ligada à eficiência na utilização dos recursos na produção de um produto ou serviço. No entanto, não é o único elemento que demonstra o rendimento de uma entidade. Essa avaliação também deve levar em conta outros aspectos como eficácia, qualidade, rentabilidade, ambiente laboral e inovação (Reggiani et al., 2021).

No que diz respeito à produtividade laboral, ela é crucial para a melhoria do rendimento real, para o bem-estar das comunidades e, sobretudo, para o desenvolvimento econômico de uma nação, um tema que tem atraído a atenção de economistas e políticos. Contudo, o Brasil tem obtido progressos nos índices de produtividade, contudo, ainda requer um trabalho constante de estudo e análise (King et al., 2019).

A administração da produtividade é um elemento crucial na elaboração das estratégias competitivas das organizações, e sem ela, é improvável que uma empresa alcance o sucesso. Uma técnica frequentemente empregada e fundamental para medir a produtividade de tarefas em campo em empresas do setor de papel e celulose é a análise de tempos e movimentos, que pode fornecer informações sobre tempos que poderiam ser mais bem aproveitados. A separação das tarefas através do estabelecimento de tempos para movimentos úteis e inúteis possibilita a obtenção de dados sobre a performance e a habilidade de trabalho das máquinas agrícolas. Esses são fatores cruciais na gestão de sistemas mecanizados agrícolas, contribuindo para a tomada de decisões e buscando a eficiência máxima dos sistemas (Cunha et al., 2016).

A avaliação da produtividade de tarefas é crucial em uma empresa, indústria ou outras entidades, uma vez que permite avaliar o rendimento na produção de produtos e serviços, além de reformular o sistema produtivo para alcançar resultados de maneira mais eficaz (Reggiani et al., 2021).

Há algum tempo, acreditava-se que a maior vantagem da mecanização nas atividades florestais seria a diminuição dos gastos operacionais. Porém, devido à diminuição da disponibilidade de mão de obra e ao aumento dos custos sociais como os impostos, a mecanização tornou-se um elemento vital na busca de maior produtividade e de um controle mais eficaz dos custos e dos aspectos administrativos.

A partir da década de 1990, a abertura do mercado brasileiro à importação de máquinas e equipamentos impulsionou a intensificação da mecanização na área florestal. Com base na experiência de países com maior tradição florestal, essas máquinas foram ajustadas às condições tropicais do Brasil (Machado et al., 2008). Atualmente, com a expansão do setor de árvores plantadas, as atividades silviculturais ganharam destaque. Porém, as operações realizadas no Brasil diferem daquelas praticadas em outros países, o que exige a criação e o desenvolvimento de tecnologias exclusivas para o setor (Montebello;Bacha, 2009).

Na maioria das grandes empresas, a colheita de madeira é realizada principalmente por meio mecanizado. No entanto, a maior parte do trabalho silvicultura é realizado de forma manual ou semimecanizada, o que acarreta custos elevados (Ersson, 2010). Ao discutir a mecanização, é importante destacar que este método de trabalho é promovido não só pela redução dos custos de produção, mas também pela facilitação do trabalho por turnos, pela resposta à escassez de mão-de-obra e pelo cumprimento dos requisitos laborais e de certificação que exigem condições confortáveis e seguras para os trabalhadores florestais (Almado, 2013; Vieira et al., 2016). Contudo, a mecanização das operações silviculturais exige a qualificação e otimização dos recursos humanos disponíveis, aumentando assim a produtividade e a gestão de custos, o que facilita as atividades administrativas.

A necessidade de mecanização está intimamente ligada à silvicultura de precisão, que visa otimizar a aplicação específica de insumos por meio de máquinas com processos automatizados. Isso envolve a utilização de drones para obter dados sobre o cultivo e uma integração da colheita com a silvicultura, levando em conta uma interdependência entre essas atividades. Além disso, o rigoroso controle de qualidade, semelhante a uma linha de produção industrial, ajuda a otimizar os processos (Melo, 2016; Terezan et al., 2016).

A mecanização na silvicultura é de extrema importância devido às várias vantagens que oferece, tais como: redução dos custos de implantação de povoamentos; redução da mortalidade das mudas devido à baixa qualidade dos tratamentos silviculturais; menor dependência do trabalho manual e da necessidade de grande quantidade de mão de obra; melhoria das condições ergonômicas com a redução do esforço físico na silvicultura; e preparação do solo realizada de acordo com a necessidade, evitando trabalhos desnecessários (Bäckström, 1978; Malmberg, 1990).

2.3 Desafios da mecanização

No setor florestal, a expansão das plantações em áreas íngremes e a mecanização das atividades representam um desafio significativo para a silvicultura (Pereira et al., 2012). Dentre as atividades do setor, o preparo do solo por subsolagem é a prática mais comum entre as empresas florestais. Contudo, apesar dos avanços tecnológicos, esta tarefa continua desafiadora e muitas vezes não consegue atingir a qualidade desejada (Simões et al., 2011; Montebello; Bacha, 2009).

Em áreas com declividades significativas, os motocultivadores têm sido utilizados, principalmente em pequenas propriedades, para preparo do solo. No entanto, esta atividade conduz a um elevado consumo de energia, baixa eficiência e uma quantidade limitada de volume de solo mobilizado (MINETTE et al., 2010). Uma alternativa para áreas íngremes é a escavadeira hidráulica, que proporciona maior estabilidade em terrenos com grande declive e é menos afetada pela presença de tocos e resíduos de colheita, quando comparada aos tratores com subsoladores, como demonstram os estudos pioneiros realizados por (Hall, 1995; Souza et al. 2018).

A subsolagem resulta em alto consumo de energia e custos para as empresas, sendo necessária sua execução dentro de padrões de qualidade para garantir ganhos de homogeneidade, produtividade e rentabilidade nas plantações florestais (Salvador et al., 2008; Simões et al., 2011).

O Brasil possui um forte setor agrícola, o que influencia significativamente a produção de máquinas e equipamentos. Conseqüentemente, o equipamento utilizado no setor florestal consiste frequentemente em equipamento agrícola modificado. Isto pode levar a um aumento nos custos operacionais e, em muitos casos, não conseguir entregar a qualidade esperada. Atualmente, existem poucas empresas especializadas no desenvolvimento de equipamentos florestais (Almado, 2013). Portanto, é fundamental incentivar a criação destas empresas, adotando uma abordagem multidisciplinar que envolva profissionais de diversas áreas, como engenheiros mecânicos e projetistas, preferencialmente com experiência prática na área.

Outro desafio é a escassez de profissionais especializados em mecanização, bem como a ausência de instituições de ensino voltadas para esta área. Isso torna importante a revisão dos currículos dos cursos de engenharia florestal no Brasil, a fim de alinhá-los mais às necessidades atuais (almado, 2013). A mecanização florestal é dispendiosa e uma das barreiras tem sido o atraso no retorno dos investimentos, que muitas vezes ocorre a médio e longo prazo.

2.4 Rendimento Energético

No início do século XIX, a indústria siderúrgica chegou ao Brasil. A produção de carvão vegetal e lenha industrial para usos siderúrgicos e domésticos era quase totalmente direcionada à exploração de florestas nativas. Posteriormente, o gênero *Eucalyptus* foi introduzido no país para substituir as madeiras nativas, além de servir como fonte de matéria-prima para várias finalidades (Junior, 2020).

Com o desenvolvimento da indústria automobilística, o petróleo ganhou uma posição de destaque no panorama energético global, graças às suas propriedades que facilitam a sua manipulação e adaptação. No entanto, reconhecemos que o petróleo é limitado (além do aspecto ambiental) e, portanto, precisamos procurar alternativas para sua utilização (Ferreira, 1979).

Segundo a Fao (2007; Goldemberg et al., 2008 apud Junior, 2020), a bioenergia é a energia gerada a partir de matéria orgânica ou biomassa. Esta forma de energia está ganhando cada vez mais relevância na economia mundial, uma vez que é uma opção aos combustíveis fósseis, que são limitados e provocam efeitos no meio ambiente. Conforme a Embrapa (2021), a biomassa é mencionada como um potencial fonte de energia desde o começo dos anos 90. Vários estudos indicam que, no período de 2025 a 2050, a contribuição da biomassa na matriz energética global oscilará entre 7% e 27%.

No que diz respeito ao rendimento energético em motores de combustão interna, é crucial que a energia gasta para acelerar seus componentes, em um estado transitório, seja a mínima possível (Bizarro, 2015). Isso acontece porque a energia gasta para acelerar os componentes do motor é vista como um desperdício, já que não se transforma em trabalho produtivo.

A relação entre a energia útil gerada por um sistema e a energia total fornecida a ele é chamada de rendimento. Em um motor de combustão interna, a energia útil representa o esforço realizado pelo motor, enquanto a energia total fornecida representa a energia presente no combustível. Uma forma simples de ilustrar o rendimento de um motor de combustão interna é através da comparação entre o que o motor produz em trabalho (output) e a energia que ele obtém para funcionar (Fuel Energy) (Carvalho et al., 2010).

2.5 Eficiência em motores de combustão interna

A eficiência, também conhecida como rendimento, refere-se ao grau de sucesso na realização de um processo de transferência ou conversão de energia (Carvalho, 2010). Segundo Çengel e Boles (2006), a eficiência pode ser expressa como a razão entre o produto desejado e o insumo necessário, conforme mostrado na equação 5.1:

$$\eta = \text{resultado desejado} / \text{fornecimento necessário}$$

Onde:

- η representa a eficiência;
- Resultado desejado refere-se à potência de saída do motor;
- Fornecimento necessário é o recurso disponibilizado para atingir o objetivo proposto, que, no caso dos motores de combustão interna (MCI), é a energia fornecida pelo combustível.

O desempenho de um equipamento de combustão pode ser caracterizado pela eficiência da combustão, definida pela equação 5.2 (Carvalho, 2010):

$$\eta_c = Q / PC$$

Onde:

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

Em motores de combustão interna a eficiência térmica pode ser definida pela relação entre a potência de saída do motor pela energia de entrada do combustível (Heywood, 1988). A eficiência do motor, também conhecida como eficiência de conversão do combustível, é dada por:

$$\eta_t = W / m \cdot PC$$

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 (Carvalho, 2010). 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 (Carvalho, 2010). Outro fator importante é o tipo de combustível utilizado o que acaba por resultar em diferentes medidas de desempenho, eficiência e também emissões.

2.6 Motores de combustão interna

Segundo Mateazzo (2022), um motor de combustão interna é uma máquina térmica que converte a energia química de combustíveis como álcool, gasolina, diesel, etc., em energia mecânica. Esta energia química é primeiro convertida em energia térmica pela combustão da mistura ar-combustível no sistema mecânico do motor.

A movimentação dos componentes mecânicos do motor é ocasionada pela utilização dos próprios gases de combustão como fluidos de trabalho, responsáveis por realizar os processos de compressão, aquecimento, expansão e exaustão (Uchôa, 2015).

Os motores de combustão interna podem ser divididos em dois grupos: o ciclo Otto, que funciona sugando uma mistura ar-combustível e depois queimando a mistura através de uma faísca para causar a combustão e o segundo grupo é o ciclo diesel, que suga o ar; -mistura de combustível e depois queimar a mistura através de uma faísca para causar combustão. Após a compressão, é injetado o combustível, que promove rapidamente a combustão devido ao elevado calor e alta pressão gerados pela compressão do ar de admissão (Gonçalves et al., 2018).

Máquinas térmicas são dispositivos que permitem transformar calor em trabalho (Brunetti, 2018), esse calor pode ser obtido de fontes diferentes como, por exemplo, por combustão. Em se tratando de motores de combustão interna (MCI), temos que o FA (fluido ativo) participa de forma direta na combustão, de forma que, a obtenção de trabalho ocorre como fruto de uma sequência de processos reativos com a FA.

Para Motores de Combustão Interna (MCI) muitos são os fatores que contribuem para aumentar a diferença entre a eficiência real e o valor da máxima eficiência teórica, ou, eficiência segundo o Ciclo de Carnot (Carvalho, 2010). O rendimento do motor pode ser entendido como um fruto de outros rendimentos agregados, que demonstram um resultado específico a cada

parâmetro, tais como as perdas por atritos, a eficiência do enchimento dos cilindros por ar, a eficiência da combustão, dentre outros (Carvalho, 2010).

2.7 ESG

ESG é uma classificação que se refere a três categorias fundamentais na avaliação do desempenho corporativo sob o conceito de sustentabilidade: Ambiental (Environmental), Social (Social) e Governança (Governance). Esses três componentes são cruciais para entender a influência e a responsabilidade das corporações em relação ao meio ambiente, à sociedade e à sua própria estrutura de governança.

Em resposta à necessidade crescente de incluir questões ambientais, sociais e de governança nas práticas empresariais e de investimento, o conceito de ESG surgiu. A palavra ganhou popularidade em 2005, quando a Organização das Nações Unidas (ONU) adotou o relatório “Who Cares Wins”. O objetivo deste relatório era estabelecer diretrizes que adotassem essas três dimensões nas avaliações de risco e oportunidades empresariais, particularmente para investidores institucionais (Irigaray; Stocker, 2022). A partir deste ponto, a estrutura ESG começou a ser formalmente integrada em vários círculos corporativos e financeiros.

A dimensão ambiental do ESG abrange questões como a gestão responsável dos recursos naturais, a redução das emissões de gases de efeito estufa, a preservação da biodiversidade e a implementação de práticas sustentáveis que mitiguem os impactos ambientais das atividades corporativas. As empresas que priorizam o componente ambiental do ESG não apenas se esforçam para cumprir as regulamentações ambientais, mas também buscam oportunidades de inovação e crescimento no mercado sustentável. A importância da governança ambiental aumentou à medida que consumidores e investidores se tornaram mais preocupados com questões ambientais, obrigando as empresas a adotar práticas que garantam a sustentabilidade a longo prazo (Redecker; Trindade, 2021).

A base social abrange as práticas de responsabilidade social corporativa e a maneira como as empresas interagem com as partes interessadas, incluindo funcionários, clientes, fornecedores e comunidades. Esses pilares abrangem elementos como direitos humanos, diversidade e inclusão, saúde e segurança no local de trabalho e a influência das atividades corporativas na sociedade. Empresas que implementam práticas socialmente responsáveis tendem a experimentar níveis mais altos de confiança dos funcionários, atraem uma gama mais

ampla de talentos e estabelecem relacionamentos mais sólidos com clientes e comunidades. No entanto, isso pode resultar em um desempenho financeiro mais sustentável e resiliente (Redecker; Trindade, 2021).

Governança corporativa refere-se às estruturas e práticas de administração e controle que fornecem transparência, responsabilidade e ética nas operações corporativas. Isso inclui, por exemplo, a autonomia dos conselheiros, a salvaguarda dos direitos dos ativistas e a gestão eficiente de riscos. Essa governança sólida é fundamental para a formação da confiança de investidores e outras entidades interessadas. Organizações com fortes práticas de governança provavelmente terão melhor desempenho a longo prazo e são mais capazes de enfrentar desafios externos (Redecker; Trindade, 2021).

Nos últimos anos, a incorporação de princípios ESG em estratégias de negócios tem sido vista não apenas como um imperativo ético, mas também como um poderoso catalisador para o desempenho financeiro. Organizações que usam práticas ESG podem reduzir riscos operacionais, atrair investidores focados em responsabilidade corporativa e fortalecer a fidelidade do cliente. A crescente valorização de empresas socialmente responsáveis pelos mercados financeiros afirma a importância do ESG como um fator determinante para o sucesso empresarial sustentável (Irigaray; Stocker, 2022).

O framework ESG se solidifica como uma abordagem estratégica essencial para empresas que buscam se destacar em um mercado global cada vez mais exigente e consciente. A implementação de práticas ESG não apenas melhora a reputação corporativa, mas também contribui para a criação de valor de longo prazo, demonstrando o comprometimento das organizações com a sustentabilidade e a responsabilidade social.

2.8 As contribuições do setor florestal brasileiro

Atualmente, a humanidade ainda depende predominantemente de fontes de carbono fóssil para suprir suas necessidades energéticas, respondendo por cerca de 86,4% do consumo mundial de energia. A utilização do petróleo, uma fonte finita e altamente poluente, impulsiona a busca contínua por alternativas mais sustentáveis, como as chamadas fontes de energia limpa, incluindo biomassa, energia solar, energia hidrelétrica e energia eólica (Silva, et al., 2024).

Uma necessidade crescente por fontes de energia sustentáveis destaca a urgência de alinhar práticas corporativas e governamentais com princípios ESG. Esta estratégia não visa

apenas reduzir as emissões de carbono, mas também busca promover uma economia mais resiliente e adaptável em resposta aos desafios climáticos.

Para mitigar a progressão das mudanças climáticas e promover a sustentabilidade autossustentável, é imperativo revolucionar a economia global. Governos e outros setores ao redor do mundo estão buscando soluções para essa transição. Há um aumento significativo de investimentos voltados para a redução de emissões de carbono no setor florestal, impulsionados pela adoção de práticas ESG (Ambiental, Social e Governança). Exemplos dessa tendência incluem certificações, redução de resíduos, investimentos diretos e classificação de empresas, entre outros (Ibá, 2023).

Dentro desse contexto, o setor florestal se destaca como um agente-chave na transição para uma economia de baixo carbono. A incorporação de práticas ESG na gestão florestal não só pode contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, mas também fortalece a sustentabilidade das operações e a reputação das empresas envolvidas.

No momento, o setor florestal conta com 10,2 milhões de hectares de florestas cultivadas e desempenha um papel crucial na economia do país, contribuindo com 4,2% do PIB agropecuário e 4% do PIB da indústria de transformação. Em termos globais, as indústrias de celulose são as maiores contribuintes, sendo o segundo maior exportador global (Ibá, 2024).

A sustentabilidade na indústria florestal vai além da mera conformidade ambiental, constituindo-se numa estratégia de negócios voltada para a longevidade e a credibilidade no mercado. A crise da Samarco, que resultou em centenas de óbitos e uma devastação ambiental descrita por Rufino et al. (2019), ilustra os perigos ligados à falta de atenção às práticas sustentáveis e a relevância de manter um equilíbrio entre as atividades econômicas e a administração ambiental responsável.

A progressão da sustentabilidade no setor florestal do Brasil segue um caminho de maior conscientização e incorporação de práticas ecológicas. Segundo Cunha et al. (2020), as empresas do setor florestal estão implementando estratégias para balancear a demanda por crescimento econômico com a proteção do meio ambiente e a responsabilidade social. Este equilíbrio é vital, considerando o efeito direto das ações florestais nos ecossistemas e na biodiversidade para uso industrial e conservação.

Ressalta-se que a sustentabilidade na indústria florestal está diretamente relacionada à percepção do público e à reputação da empresa. Conforme apontado por Azevedo et al. (2019), a disseminação de informações ambientais tornou-se um elemento crucial na administração de

empresas. Esta clareza não apenas cumpre as exigências regulatórias e as expectativas dos envolvidos, mas também reforça a confiança e a credibilidade das empresas no mercado.

Assim, o setor florestal do Brasil está se movendo para um cenário cada vez mais orientado para a sustentabilidade, no qual a administração ambiental eficiente e a transparência são essenciais para o êxito das empresas e a preservação do meio ambiente. A avaliação deste cenário, baseada nas visões proporcionadas pelas referências mencionadas, é crucial para compreender a dinâmica presente e as futuras dificuldades do setor em relação à sustentabilidade empresarial.

2.9 As contribuições da silvicultura

O mundo assistiu a uma grande expansão da silvicultura na última década, que já aumentou cerca de 31,9 milhões de hectares, principalmente em continentes como Ásia e América do Sul. No total são 4,06 bilhões de hectares de florestas plantadas. (provenientes de áreas de produção e conservação/recuperação), distribuídos em todos os continentes (Brainer, 2021).

Embora no período 2018-2019 tenha sido observada uma diminuição no consumo de produtos derivados da silvicultura, impulsionada principalmente pela crise em setores como construção civil, móveis e papel e celulose, atualmente com o aumento da qualidade de vida e o fortalecimento do ESG (Meio Ambiente, Social e Governança), a busca por produtos renováveis, embalagens alternativas e higiene pessoal tem impulsionado o mercado florestal (Brainer, 2021).

O conceito ESG baseia-se na responsabilidade ambiental, social e de governança como garantia de investimentos sustentáveis, que serve de base para investidores e decisões corporativas em relação a uma determinada empresa. Tais decisões consideram os impactos relevantes no crescimento e desenvolvimento do capital de uma empresa com base nos retornos gerados pelas ações ambientais, sociais e de governança de riscos (Matos, 2020).

Todos esses movimentos de mercado e as novas linhas de produtividade sustentável têm exigido das empresas cada vez mais produtividade e agilidade no corte e alternativas de produção mais tecnológicas, mecanizáveis, ambientais e sustentáveis que convergem com o conceito ESG, que abre espaço de expansão principalmente para espécies de crescimento rápido, como eucalipto e pinus. Quando se trata das principais espécies de rápido crescimento, o Brasil possui atualmente mais de 10,2 milhões de hectares de florestas plantadas. Portanto,

ênfatiza-se a extensão dos processos florestais, onde a silvicultura é um dos processos mais complexos da cadeia produtiva florestal (Ibá, 2024).

A silvicultura apresenta elevado dinamismo e complexidade operacional, pois envolve diversos processos de produção florestal ao longo do ciclo de desenvolvimento florestal, desde o plantio até o pré-corte, levando em média de 5 a 7 anos para completar os ciclos do eucalipto. Dentre esses processos, a base inicial da formação florestal concentra-se nos processos de plantio e irrigação. Essas atividades ainda são muito dependentes do trabalho rural, com predomínio da execução manual, ligada principalmente à falta de tecnologia, condições de terra e relevo (Sion, 2021). Com o surgimento do ESG o setor vem avançando de forma positiva na produtividade sustentável e ganhando novos mercados.

2.10 Desafios para redução de emissões de CO₂

Diante dos desafios enfrentados pelas empresas florestais, como a necessidade de redução de custos, aumento de produtividade, otimização dos recursos disponíveis e redução de emissões de CO₂, a adoção de novas tecnologias torna-se fundamental para potencializar as atividades florestais.

A estimativa do carbono da biomassa florestal, tanto natural como plantada, permite estimar o efeito das árvores na redução de CO₂, aumentando o azoto e o carbono presentes no território. A quantidade de carbono presente na biomassa das florestas e dos sistemas agroflorestais depende das espécies plantadas, do espaço de plantio, das práticas silviculturais e edafoclimáticas (Parron et al., 2015).

Durante o processo de fotossíntese, as plantas utilizam CO₂ para produzir compostos orgânicos que fixam carbono, liberando oxigênio na atmosfera, que são considerados os “pulmões do mundo”. Quando as plantas e os animais respiram, ocorre o processo inverso da fotossíntese, onde o CO₂ é liberado na atmosfera enquanto o O₂ é removido. Quando os animais se alimentam de plantas, eles absorvem alguns dos compostos orgânicos de carbono e, quando animais e plantas morrem, o metano é gerado durante processos de decomposição anaeróbica realizados por bactérias. CO₂ e água são então produzidos pela presença de metano na atmosfera, que é oxidado (Rodríguez, 2015).

Pela importância econômica, social e ambiental das florestas nativas ou plantadas para reflorestamento no armazenamento e absorção de carbono, elas são consideradas sumidouros

de carbono e ajudam a mitigar as mudanças climáticas ao remover CO₂ da atmosfera (Rodríguez, 2015).

O carbono absorve luz infravermelha térmica e é um dos gases de efeito estufa. Através do processo de fotossíntese, os seres vivos são capazes de assimilar carbono, e o fato de o carbono ser armazenado é chamado de carbono fixo. O reverso desse processo é a decomposição biológica, que libera CO₂ na atmosfera. O que leva ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera são as ações antrópicas. Dentre as funções desempenhadas pelas florestas para regular as condições ambientais durante a fotossíntese está a capacidade de absorção de carbono do CO₂ atmosférico, com aumento do carbono sequestrado durante a fase de crescimento e estabilização durante a fase de maturação (Brasil, 2022).

O carbono constitui os quatro principais gases de efeito estufa, metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), perfluorocarbonos (PFCs) e hidrofluorocarbonetos (HFCs). Graças ao processo de fotossíntese, as florestas plantadas possuem grande capacidade de fixar carbono em sua biomassa, mas pouco se sabe sobre o estoque de carbono nesses ecossistemas (Miranda, 2018).

Para identificar e estimar o estoque de carbono nas florestas é necessário utilizar modelos matemáticos e determinar a biomassa. Modelos matemáticos estimam a biomassa e o carbono das espécies vegetais utilizando variáveis facilmente disponíveis como DAP e altura, sem a necessidade de utilização de métodos diretos como corte e peso total da árvore (Miranda, 2018).

O acúmulo de carbono nas fitomassas florestais e no solo permite a fixação de carbono, mas a quantidade de carbono fixado varia de uma região para outra, de acordo com a tipologia florestal, tipos de solo e silvicultura (Miranda, 2018).

De todo o carbono que um ecossistema florestal pode sequestrar, 45 a 55% é encontrado na biomassa acima do solo (caules, cascas, galhos e folhas); 20 a 26% em biomassa subterrânea (raízes); 20% no solo (respiração radicular e respiração heterotrófica dos microrganismos do solo) e 6 a 8% na serapilheira, podendo esses valores variar de acordo com o estágio de desenvolvimento da floresta (Cassol, 2021).

As espécies florestais têm a capacidade de retirar grandes quantidades de CO₂ da atmosfera e de armazenar esse gás, que contribui para o efeito estufa, na biomassa de folhas, galhos, troncos e raízes (Lipinski, 2015).

A queima de combustível fóssil, florestas em decomposição e em desmatamento, ou seja, ações decorrentes a ação humana são as principais fontes de emissão deste gás. Todas essas atividades que proporcionam o aumento do efeito estufa geram um efeito global, portanto nenhum país está livre dos efeitos causados pelo aquecimento global (Burali, 2019).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Coleta de dados

A coleta de dados ocorreu em áreas de uma empresa florestal que cultivava eucaliptos, situadas nas regiões dos vales dos Rios Jequitinhonha e São Francisco, no estado de Minas Gerais, em um raio de 300 km da cidade de Itamarandiba. As áreas de plantio localizam-se, predominantemente, em áreas planas a suave onduladas, com declividade máxima em torno de 5°. O clima predominante na região é o Aw - tropical úmido de savana, caracterizado por invernos secos e chuvas intensas no verão. A estação das chuvas se estende de outubro a março (Nascimento et al., 2011).

3.2 Atividades Avaliadas

Foram avaliadas três atividades presentes no ciclo de produção de madeira de florestas plantadas no cerrado de Minas Gerais, sendo roçada, adubação e subsolagem (Quadro 1).

Quadro 1 - Descrição das atividades analisadas

Atividades	Caracterização da atividade
Roçada	Controla a vegetação indesejada entre as linhas de cultivo, reduzindo a competição por recursos e facilitando o desenvolvimento das árvores.
Adubação	Adubação feita após o plantio das espécies visando a manutenção dos níveis de nutrientes do solo durante o desenvolvimento do vegetal.
Subsolagem	Prática que consiste em revolver o solo através do subsolador que mobiliza o solo em profundidade por hastes rompendo camadas de solo compactado.

Conforme as práticas usuais de manejo florestal na região do estudo, a atividade de subsolagem é realizada antes do plantio inicial, exceto em áreas de condução de rebrota. As atividades de roçada e adubação são aplicadas diversas vezes por hectare ao longo dos 7 anos de cultivo.

Também, de acordo com o tipo de solo e a declividade, são utilizados diferentes tipos de tratores para realizar cada atividade, sendo os dados operacionais apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados operacionais das atividades silviculturais mecanizadas realizadas na área de estudo

Trator	Roçada		Adubação		Subsolagem	
	Consumo (l/hora)	Produtiv. (ha/h)	Consumo (l/hora)	Produtiv. (ha/h)	Consumo (l/hora)	Produtiv. (ha/h)
4x4 - 75 CV	5,00	1,00	4,50	1,00	n.r.	n.r.
4x4 - 110 CV	7,50	1,20	7,00	1,20	9,00	1,20
4x4 - 140 CV	8,50	1,30	n.r.	n.r.	11,00	1,30
4x4 - 180 CV	10,50	1,45	n.r.	n.r.	13,00	1,45
Fator de Potência	0,40		0,55		0,75	

n.r. - Não realiza a atividade com o respectivo trator.

3.3 Determinação do Consumo de Combustível por Atividade

A determinação do consumo de combustível por atividade foi a partir da produtividade média de cada atividade (horas de máquina por hectare) e o volume de combustível consumido por unidade de potência por hora de trabalho (litros por hora) o que, por relação direta, permitiu a obtenção do consumo de combustível por atividade (litros por hectare) durante o ciclo de produção nas atividades de silvicultura.

Para cada atividade avaliada, foram tomados como base os rendimentos operacionais padrões de uma empresa florestal que opera em áreas localizadas no cerrado de Minas Gerais, por meio de estudos de tempos e movimentos com o uso do método de tempos contínuos (Barnes, 1977), de forma a determinar as horas de máquina necessárias para sua realização, ou seja, a produtividade média de cada atividade.

O consumo de combustível por máquina foi calculado com base na metodologia proposta pela ASAE - American Society of Agricultural Engineers (Asae, 1989; Asae, 1996).

3.4 Determinação da eficiência energética

A avaliação da eficiência energética baseou-se no consumo de combustível dos tratores empregados na silvicultura nas tarefas de roçada, adubação e subsolagem, levando em conta a variação na produtividade de cada atividade (trator). Assim, calculou-se o rendimento energético (g/kW.hora/ha) através do consumo específico (g/kW.hora) e da produtividade (ha/h), conforme as equações 1 e 2.

$$RE = \frac{Ce}{Prod} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: RE = rendimento energético da atividade de silvicultura (g/kW.h/ha);
Ce = consumo específico de combustível do trator(g/kW.h);
Prod = produtividade do trator (ha/h).

$$Ce = \frac{Q}{N} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: Ce = consumo específico de combustível do trator (g/kW.h);
Q = consumo de combustível do trator (l/h);
N = potência do motor do trator (kW);

Avaliou-se a relação entre os valores obtidos para o rendimento energético das atividades de silvicultura, a produtividade das florestas e o consumo de combustível dos tratores. 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). As análises foram conduzidas no ambiente Excel e as análises estatísticas foram feitas com o auxílio do software STATISTICA for Windows, desenvolvido pela STATSOFT Inc., em 1995.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos cálculos da eficiência energética, a partir da potência, da produtividade das máquinas e do consumo de combustível, em máquinas durante a realização de atividades silviculturais mecanizadas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados dos cálculos da eficiência energética em máquinas durante a realização de atividades silviculturais mecanizadas

Trator	Eficiência Energética (g/kW.hora/ha)		
	Roçada	Adubação	Subsolagem
4x4 - 75 CV	77,05	69,34	n.r.
4x4 - 110 CV	65,66	61,29	78,80
4x4 - 140 CV	53,97	n.r.	69,85
4x4 - 180 CV	46,49	n.r.	57,56

n.r. - Não realiza a atividade com o respectivo trator.

Fonte: Do autor (2024).

De forma a verificar a associação entre o rendimento energético, a potência dos tratores, os valores de produtividade das atividades e os valores de consumo de combustível das máquinas, operando nas atividades de roçada, adubação e subsolagem durante o período de estudo, os resultados da análise da matriz do coeficiente de correlação de Pearson (r), obtidos por meio do teste t a 5% de probabilidade, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz de coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis de estudo

Variáveis	Consumo de Combustível	Produtividade	Potência
Eficiência Energética	-0,447*	-0,731*	-0,753*

* Significativo, a 5% de probabilidade de erro, pelo teste t com 8 graus de liberdade.

Fonte: Do autor (2024).

Os resultados apontam que todas as variáveis analisadas (potência e produtividade dos tratores, e consumo de combustível) tem uma forte correlação negativa com o Rendimento Energético, independentemente da atividade e, ou do tipo e trator utilizado. Vale ressaltar que o sinal negativo destas correlações é desejável, visto que, quanto menor for o valor assumido pela variável eficiência energética, melhores serão os seus efeitos (menor quantidade de energia é necessária para a realização da atividade em uma mesma unidade de área, no caso o hectare). Isso significa que aumentos, isolada ou conjuntamente, na potência dos tratores e na produtividade das atividades, apresentará, como consequência imediata uma desejável melhora na eficiência energética da atividade.

Quando esse aumento da eficiência energética das máquinas é conectado à operação de motores a diesel, como os empregados em tratores florestais, o modo de operação é baseado em uma potência nominal, com fornecimento de combustível e rotação constantes (Almeida et al., 2010). Dessa forma, a eficiência energética aumentará à medida que a produtividade da máquina aumentar. Nesse cenário, os benefícios da eficiência energética serão transferidos para a esfera ambiental, resultando em uma redução nas emissões de CO₂ por tonelada de madeira extraída.

Segundo Silveira e Bernardi (2021), o consumo de energia para a fragmentação de material vegetal pode ser influenciado por uma variedade de fatores, incluindo a taxa de alimentação, o tamanho dos fragmentos, a velocidade das lâminas, o comprimento da lâmina, o ângulo da lâmina, o tipo de lâminas e as interações entre elas.

Cordeiro (2016) explica que as avaliações diretas do rendimento de tratores em situações de campo são realizadas por meio da instrumentação e supervisão desses equipamentos, permitindo a identificação de elementos diretamente relacionados à eficácia operacional do trator. O autor conduziu uma análise de desempenho de um trator agrícola, levando em consideração o pneu, a carga e a velocidade de deslocamento. Ele concluiu que esses fatores influenciaram significativamente a conversão de energia, a tração e a potência de condução do veículo.

Um modelo é proposto por Mialhe (2019) que emprega medição de torque para avaliar as demandas de potência na avaliação do desempenho da máquina. O modelo representa a força de tração necessária pelas máquinas de escavação utilizando a força média de tração. Essa

média é determinada pela adição dos valores instantâneos durante o trajeto e posteriormente dividindo a soma pelo tempo.

Mahl et al. (2002) observaram que o desempenho do conjunto foi influenciado pela mudança na velocidade quando eles fundiram seis linhas com espaçamento de 0,45 m e três velocidades de deslocamento (4,4; 6,1; 8,1 km h⁻¹). À medida que a velocidade aumentou, houve um aumento de 86% na capacidade operacional e uma redução de 26% no consumo de combustível por hectare.

As máquinas mais eficientes energeticamente são aquelas que conseguem executar tarefas ou processos com a menor quantidade de energia, maximizando assim a utilização de recursos e minimizando o desperdício. Nos últimos anos, os avanços tecnológicos permitiram o desenvolvimento de sistemas mais inteligentes e sustentáveis, capazes de operar de forma mais eficiente e, ao mesmo tempo, reduzir os efeitos negativos sobre o meio ambiente.

O objetivo da busca por equipamentos mais eficientes energeticamente é reduzir o consumo de energia e, conseqüentemente, os custos operacionais, mantendo a qualidade e a produtividade do produto final. Isso se torna viável por meio da implementação de inovações como motores elétricos de alta eficiência, sistemas de recuperação de energia, componentes aprimorados e inteligência artificial para realizar ajustes automáticos em tempo real.

Além de oferecer benefícios econômicos, máquinas eficientes são essenciais para a sustentabilidade. A demanda global por soluções que reduzam as emissões de gases de efeito estufa e o impacto ambiental da produção industrial resultou no investimento em tecnologia avançada e na implementação de práticas de eficiência energética.

Por fim, os resultados apresentados sugerem que a inovação continua sendo a chave para o desenvolvimento de máquinas cada vez mais eficientes. O estudo de novos materiais, como supercondutores e tecnologias de armazenamento de energia, tem o potencial de criar novas oportunidades para reduzir o consumo de energia em diversos setores, da produção ao transporte, proporcionando benefícios diretos tanto às corporações quanto à natureza.

5. CONCLUSÕES

Todas as variáveis analisadas apresentaram forte correlação negativa com o Rendimento Energético, independentemente da atividade e, ou do tipo e trator utilizado.

É essencial aprimorar a eficiência energética em máquinas na silvicultura para tornar as operações mais sustentáveis, diminuir os gastos operacionais e minimizar o impacto no meio ambiente. A aplicação de tecnologias de ponta, tais como sistemas de gerenciamento de energia, motores mais eficientes e a utilização de combustíveis alternativos, pode levar a uma diminuição considerável no uso de combustível e na emissão de gases poluentes.

A gestão das variáveis relacionadas ao rendimento energético deve ser integrada ao planejamento estratégico para garantir maior eficiência operacional, reduzir impactos ambientais e fortalecer a governança. Esse processo reflete um compromisso com os pilares ESG, promovendo operações mais sustentáveis e responsáveis.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALMADO, R. P. Intensificação da mecanização e da automação em atividades silviculturais na Arcelormittal Bioflorestas. **Série Técnica IPEF**, v. 17, n. 38, p. 7-21, 2013.

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.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (ASAE). Agricultural tractor test code. In: **ASAE standards 1989**: standards engineering practices data. St. Joseph, 1989. p. 44-8. (ASAE S-209.5).

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (ASAE). Agricultural machinery management data. In: **ASAE standards 1996**: standards engineering practices data. St. Joseph, 1996. p. 332-9. (ASAE D-497.2).

AZEVEDO, Y. G. P.; MEDEIROS, V. C.; MÓL, A. L. R. MELO. C. L. L. Divulgação voluntária de informações ambientais: uma análise dos fatores determinantes nas empresas listadas na BM&FBovespa. **Revista Sociedade, Contabilidade e Gestão**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 1-17, 2019.

BÄCKSTRÖM, P. O. **Maskinell plantering – förutsättningar, teknik, prestationer och kostnader**. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. Stockholm. Avhandling. 74 p. 1978.

BARNES, R.M. **Estudo de movimentos e de tempos: Projeto e medida do trabalho**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

BIZARRO, Á. J. G. O. **Projeto do Pistão de um Motor de Combustão Interna para um Veículo de Elevada Eficiência Energética**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automóvel) - Faculdade de Ciências e Tecnologia. Coimbra, 2015.

BRAINER, M. S. C. P. Silvicultura. **Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil**, ano 6, n.154, 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Pagamento por serviços ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios**. Brasília, DF, 275 p. (Biodiversidade, 42). 2022.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna: v. 1 - 2**. ed. Blucher, São Paulo, 2018.

BURALI, J. B. **Aquecimento Global: O clima de extremos**. XIV CONOSUR; XIII ENERI. São Paulo, 2019.

CARVALHO, M. A. S. et al. **Metodologia para o estudo do rendimento termodinâmico de motores de combustão interna ciclo otto**. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2010.

CASSOL, H. L. G. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono em um fragmento de floresta ombrófila mista com uso de dados ópticos de sensores remotos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. New Jersey: Lawrence Earlbaum Associates. 1988.

LOPES, A.; LANÇAS, K. P.; SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; NAGAOKA, A. K.; REIS, G. N. Desempenho de um trator em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de trabalho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.2, p.366-370. 2005.

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

CUNHA, G. T.; LOPES, I. L., OLIVEIRA, R. M., PÁSCOA, K. J. V., GOMIDE, L. R.. Panorama do setor florestal brasileiro com ênfase no Estado de Minas Gerais. **Enciclopédia Biosfera**, v. 16, n. 29, p. 1583-1602, 2019.

CUNHA, J. P. B.; SILVA, F. M.; MARTINS, F. G. L. CONCEIÇÃO, F. G.; CAMELO, L. G. Estudo técnico e econômico de diferentes operações mecanizadas na cafeicultura. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 87-96, 2016.

CUNHA, L. C.; KAETSU, P. T.; FERREIRA, G. T. Materialidade e serviços ambientais: o caso de uma empresa florestal. **Revista Organizações e Sustentabilidade**, Londrina, v. 8, n. 1, p. 108–123, 2020.

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 17 de dezembro de 2024.

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 17 de dezembro de 2024.

ERSSON, B. T. **Possible concepts for mechanized for tree planting in Southern Sweden – an introductory essay on forest technology**. Sveriges lantbruksuniversitet. S901 – 83. Umea, 2010.

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>. Acesso em 03 de dezembro de 2024.

GROTTA, D. C.; LOPES, A.; FURLANI, C. E. A.; KLINGER, B. B.; REIS, G. N. R.; SILVA, R. P. Subsolador: avaliação do desempenho em função da velocidade de trabalho e espaçamento entre hastes. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 1, p. 21-26, 2004.

GONÇALVES, Edeimar et al. Análise da instalação de um sistema de sobrealimentação em um motor ciclo diesel. **Anais da Engenharia Mecânica/ISSN 2594-4649**, v. 3, n. 2, p. 18-40, 2018.

HALL, P. Mechanical site preparation using excavators. **New Zeland Florestry**, 31-35. 1995.

HORA, A. B. Análise da formação da base florestal plantada para fins industriais no Brasil sob uma perspectiva histórica. **BNDES Setorial**, v. 42, p. 383-426, 2015.

HUNT, D. **Farm power and machinery management**. 9. ed. Ames: Iowa State University Press, 363 p. 1995.

IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores). **Relatório Anual 2023**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Economia (IBRE), da Fundação Getulio Vargas (FGV): 2023.

IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores). **Relatório Anual 2024**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Economia (IBRE), da Fundação Getulio Vargas (FGV): 2024.

IRIGARAY, H. A. R.; STOCKER, F. ESG: novo conceito para velhos problemas. **EBAPE**, v. 20, n. 4, 2022.

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 03 de dezembro de 2024.

KING, N. C. O.; LIMA, E. P.; COSTA, S. E. G. Produtividade sistêmica: Conceitos e aplicações. **Production**, v. 24, n. 1, p. 160-176, 2019.

LIPINSKI, E. T. **Dinâmica de biomassa e carbono da parte aérea durante 17 anos em um fragmento de floresta ombrófila mista montana**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

MACHADO, C. C.; SILVA, E.N.; PEREIRA, R.S. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. Viçosa: UFV, p. 15-42, 2008.

MAHL, D. **Desempenho de semeadoras-adubadoras de milho (Zea mays L.) em sistema de plantio direto**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu. 2002.

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 17 de dezembro de 2024.

MALMBERG, C. E. **Mekanisering av skogsodling**. Styrelsen för Teknisk Utveckling. Stockholm. STU-info: 196 p. 1990.

MATOS, P. **ESG and responsible institution al investing around the world: A critical review**. 2020.

MELO, E. A. S. C. Desafios e oportunidades para a silvicultura de precisão: uma síntese do congresso brasileiro de agricultura de precisão de 2014. **Série Técnica IPEF**, v. 24, n. 45, p. 7-10, 2016.

MIALHE, L. G. Ensaio e certificação de tratores. In: MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: Ensaio & certificação**. Piracicaba, Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, p.385-462. 2019.

MIRANDA, D. L. C. **Modelos matemáticos de estoque de biomassa e carbono em áreas de restauração florestal no Sudoeste Paulista**. Dissertação de mestrado. Curitiba, 2018.

MONTEBELLO, A. E. S.; BACHA, C. J. C. Avaliação das pesquisas e inovações tecnológicas ocorridas na silvicultura e na produção industrial de celulose no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 47, n. 2, p. 485-517, 2009.

MINETTE, L. J., SILVA, E. P., SOUZA, A. P., & HERMSDORSS, W. L. Avaliação ergonômica do protótipo de um motocoveador hidráulico, utilizado em atividades de silvicultura florestal. **Engenharia na Agricultura**, 18(6), 488-495. 2010.

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.

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

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**. EMBRAPA, Brasília, DF, 2015.

PEREIRA, D. P., FIEDLER, N. C., LIMA, J. S. S., GUIMARÃES, P. P., MÔRA, R., & CARMO, F. C. A. Eficiência da subsolagem na profundidade de preparo do solo em função da declividade do terreno. **Cerne**, 18(4), 607-612. 2012.

REDECKER, A. C.; TRINDADE, L. M. Práticas de ESG em Sociedades Anônimas de Capital Aberto: um diálogo entre a função social instituída pela lei 6.404/76 e a Geração de Valor. **PUC/RS**, v. 2, p. 59–125, 2021.

REGGIANI, G. B.; PRADA, N.; FIGUEIREDO, D. F. Gestão da produtividade: metodologia aplicada a uma indústria de bebidas. In Simpósio de Engenharia de Produção, 15.; 2021, São Paulo. **Anais ISSN 1809-7189**. São Paulo: Unesp, 2021.

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 17 de dezembro de 2024.

SALVADOR, N., BENEZ, S. H., & MION, R. L. (2008). Consumo de combustível na operação de subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo. **Engenharia Agrícola**, 28(2), 256-262, 2008.

SALVADOR, N. BENEZ, S. H.; MION, R. L. Demanda energética na subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2501-2505, dez. 2009.

SCHETTINO, S.; CAMPOS, J. C. C.; MINETTE, L. J. and SOUZA, A. P. Work precariousness: ergonomic risks to operators of machines adapted for forest harvesting. **Rev. Árvore [online]**. v. 41, n. 1, p. 1-9, 2017.

SILVA, AJF da; SCHETTINO, S.; CABACINHA, CD; MINETTE, LJ; SORANSO, DR **Determinação da eficiência energética em máquinas de colheita florestal em sistema Full-tree**. REVISTA DELOS , [S. l.] , v. 54, pág. e1390, 2024.

SILVA, J.C.S., et al. **Aspectos históricos e técnicos do cultivo de Eucalyptus no Brasil**. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. 2018.

SILVEIRA, G. M.; BERNARDI, J. A. Estudo do consumo de energia por órgãos ativos de roçadora. **Bragantia**, Campinas, v.60, n.3, p.245-252. 2021.

SIMÕES, D., SILVA, M. R., & FENNER, P. T. Desempenho operacional e custos da operação de subsolagem em área de implantação de eucalipto. **Bioscience Journal**, 27(5), 692-700. 2011.

SIMÕES, D. FENNER, P. T.; MARCELINO, F. A.; MAHL, D.; SILVA, J. R. Desempenho do conjunto trator de pneus e subsolador adubador no preparo do solo para o plantio de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Bonito, MS. **Anais...** Jaboticabal: CONBEA, 2007.

SOUZA, G. S., SILVA, S. A., LIMA, J. S. S., VERDIN FILHO, A. C., INFANTINI, M. B., & KROHLING, C. A. Avanços na mecanização do cafeeiro conilon. **Incap em Revista**, 9, 31-41. 2018.

TEREZAN, L. H.; BERNARDI, M.; SILVA, A. I. G. Controle de qualidade florestal na Eldorado Brasil S.A. **Série Técnica IPEF**, v. 24, n. 45, p. 38-43, 2016.

TOLEDO, A.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P.; LOPES, A.; DABDOUB, M. J. Comportamento espacial da demanda energética em semeadura de amendoim em latossolo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 12, n. 30, p. 459-467, 2010.

UCHÔA, I. M. A. **Combustíveis base diesel microemulsionados com glicerina: formulação e avaliação de desempenho**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do norte, Natal. 2015.

VALVERDE, S. R.; MAFRA, J. W. A.; MIRANDA, M. A.; SOUZA, C. S.; VASCONCELOS, D. C. **Silvicultura brasileira: oportunidades e desafios da economia verde**. Rio de Janeiro: FBDS, 2022.

VIEIRA, C. G.; DORNELAS, G. V.; DEUS JUNIOR, J.; SILVA, J. F.; BORGES, M. P.; BRUNHEROTO, V.; SILVA, V. E. Mecanização e silvicultura de precisão na Eldorado. **Série técnica IPEF**, v. 24, n. 45, p. 51-58, 2016.