

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

**TRABALHO DE
CONCLUSÃO DE CURSO
ENGENHARIA FLORESTAL**

**DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA SOBRE A
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO TRANSPORTE DE MADEIRA**

THAIS SALES GONÇALVES



Thais Sales Gonçalves

**DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA SOBRE A
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO TRANSPORTE DE MADEIRA**

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
Instituto de Ciências Agrárias – UFMG
2022

Aos meus pais, minhas irmãs Thainá e Thamires e a minha Vó Chica por todo apoio,
amor e orações dedicados a mim.

AGRADECIMENTOS

Ao fazer uma retrospectiva sobre esses cinco anos e essa louca jornada que foi a graduação, muitas reflexões surgiram junto com o sentimento de gratidão principalmente pelas pessoas. Algumas chegaram antes do início deste ciclo e trilharam em momentos importantes comigo os caminhos da superação e autoconfiança, da amizade e da irmandade. Igor Alberte, obrigado por sempre estar ao meu lado e ser meu irmão de alma. Alguns, bem poucos, chegaram durante e achei que ficariam até o fim, mas Graças a Deus e a sua arquitetura PERFEITA, se foram antes mesmo de terminar o tempo mínimo que imaginei que duraria. E agora falaremos daqueles que chegaram, em tempos diferentes mas no tempo certo, e fizeram morada da forma mais genuína que somente vocês poderiam, com a reciprocidade e verdade.

Paulo Ricardo, o que seria de mim sem você meu amigo. Você é um cara incrível e merece o mundo por toda a sua luta e principalmente por não perder sua fé e seus princípios. Para você meu amigo, estarei pronta, sempre para te estender a mão, abraçar e claro conversar muito e falar mal da hipocrisia alheia. Obrigada pela sua amizade mesmo após quase ter morrido por ter pegado sua “tosse de carro”, sigo afirmando que você pode contar comigo sempre, nos dias de luta e em breve nos nossos de Glória.

Migles, para os não íntimos, Maria Eduarda, acho que um dos meus maiores ensinamentos de força na UFMG foi você. Cara, você não tem ideia da gigante que você é e a força da mulher que reside em você, me orgulho muito de você ter me dado a lição do não julgar somente pelo o que vê, lá no início. Seremos eternamente sua família de Moc (urso) e vocês a minha família de Capelinha (Panda). Ari, ou melhor dizendo, Ariane Nogueira, sintam a força desse nome que soa tão forte com a força que a dona dele possui. Que pessoa espetacular e genuinamente genial você é amiga, eu te admiro em proporções astronômicas. Obrigada pela sua amizade e companhia e pelo lindo exemplo de vida e superação que você e sua mãe maravilhosa são para mim. Amo vocês “Tchucas”.

E como a vida é extremamente surpreendente eu não poderia deixar de falar do que talvez tenha sido meu presente mais inimaginável da UFMG. Deus, mais uma vez, em sua Arquitetura PERFEITA me colocou em uma jornada de aprendizado e autoconhecimento guiada por alguém muito especial. Obrigada Deus por ter me trazido já quase no finalzinho dessa jornada alguém tão especial. Loic, o que eu posso TENTAR dizer é o quão eu sou grata e o quão fundamental você é e foi nesse final de jornada e em outras jornadas. Você nesses dois anos e pouco foi amigo, namorado, monitor, torcedor,

professor, psicólogo, aconselhador, porto seguro, e lógico, aquela voz martelando “VOCÊ VAI SE LASCAR SE NÃO FIZER ISSO!!!”. “*Merci!*”. Por tudo!

Falado dos poucos que marcaram de uma maneira mais especial e concreta durante essa jornada, eu não poderia deixar de falar dos que embarcaram no mesmo barquinho desde o processo do vestibular comigo e remaram a plenos pulmões e braçadas a cada dia comigo. PAI, MÃE, Nanah e Bibows. Se não fosse por vocês, e para vocês, hoje esse sonho não seria concretizado. Mãe, Pai, hoje vocês podem afirmar com plena certeza que NOS TORNAMOS ENGENHEIROS EM 2022 E VENCEMOS ESSA BATALHA.

Meus nenéns, Bibows e Nanah vocês me viram chorar várias vezes, ser injustiçada, descrente em mim mesma e a perder a força que eu sempre tentei demonstrar e ensinar vocês a ter. Foram vocês que resgataram essa Thais que se perdeu em meio às situações que passou e me devolveram a força e a crença em mim mesma e o que eu posso fazer quando me dedico a algo. Juntas nesses cinco anos fortalecemos nossa base e nosso triângulo foi mantido intacto quando eu, uma das pontas fraquejei, e também nesse período eu vi surgir mulheres fortes e incríveis ao meu lado e que me provaram todos os dias que somos invencíveis quando juntas e que nunca estaremos só porque temos uma a outra. Obrigada por serem MEU TRIO.

Mãe, obrigada por ser minha sanidade, provavelmente esse diploma é mais seu do que meu. Obrigada por não ligar em dias que sabia que eu precisava da sua força de longe e por ligar mil vezes quando sabia que eu precisava de você na solidão estando tão longe de casa no período do estágio. Obrigada por se revoltar comigo e por me trazer a calma necessária para superar e manter a cabeça erguida. Obrigada por acolher aos meus e ser a SUPER JACK que todos admiram e que acolheu e abraçou algumas pessoas nessa jornada a meu pedido e com seu coração gigante de super mãe e amiga. Pai, obrigada por ser a minha razão e provocação. Por me provocar a nunca me contentar com os “nãos”, a receber as críticas e usá-las de escada para o sucesso e superação, a saber a dançar e me ajustar a música sem deixar de lado meus valores e princípios, sabendo sempre dos meus limites e que posso também superá-los. Obrigada por cada dia em que perguntou como estavam as notas, a pesquisa, por mesmo quando eu decidi arriscar com o estágio, ter me apoiado e sido forte ao meu lado, mesmo sabendo que sofreria junto comigo a distância e por ter me deixado ir mesmo com medo do que eu veria e enfrentaria sem a sua proteção, juntos aprendemos muito nessa jornada né?!

Professor Stanley, eu sequer um dia poderia imaginar que eu terminaria essa trajetória ao lado e sob orientação de uma pessoa tão humana e incrível como o senhor. O seu cuidado com cada detalhe e até com o jeito de falar e ouvir, de se colocar no lugar

do outro e ser compreensivo só aumentaram a admiração que eu já sentia e desejo que muitos outros alunos possam ter “Stanleys” como o senhor na vida deles. Não tenho palavras para mensurar tudo o que ser orientada por você significou para mim e na minha vida. Te agradeço de todo o coração e desejo que Deus em sua infinita bondade te conduza nessa jornada de mestre sempre e que lhe conceda a sabedoria necessária para continuar transformando vidas através do seu dom de ensinar e transmitir ensinamentos e segurança.

Ao pessoal da Aperam Bioenergia, obrigada por essa experiência incrível nesses 10 meses de estágio. Professor Fausto Makishi, CODEVASF, em especial, Alex, Cléo e Anderson, obrigada pela experiência impar de ter desenvolvido um projeto de tamanha relevância para a nossa região. Aos meus colegas do Engenheiros Sem Fronteiras do Núcleo Montes Claros - MG, em primeiro lugar, o pessoal da equipe de Comunicação e Marketing, que foram os primeiros a acreditar em mim e me acolheram durante a minha gestão enquanto diretora da equipe e que se esforçaram junto comigo para aprender e se reinventar durante a nossa jornada de aprendizado, sem vocês eu não teria tido confiança suficiente para assumir a gestão do núcleo ou mesmo saberia lidar com as pessoas, vocês me ensinaram muito. Àqueles que confiaram em mim para dirigir o núcleo mesmo ainda sendo uma pessoa que estava na graduação, e estiveram ao meu lado durante a gestão, meu muito obrigada pela confiança e credibilidade depositada. O ESFMOC foi um dos meus maiores aprendizados nessa jornada e também o que mais me orgulho. Juntos fomos mais fortes e transformamos vidas e isso não tem palavras suficientes para descrever e tão pouco há palavras suficientes para agradecer tamanho aprendizado como pessoa e profissional.

Ao laboratório de Inovação Florestal da UFMG e ao PET Engenharia Florestal, em especial, professor Carlos Alberto e professor Christian Cabacinha, e a cada um dos colegas, meu muito obrigada pela troca e ensinamentos. Ao professor e vice-diretor Helder, obrigada pelo profissionalismo e por prezar sempre pelo interesse e bem-estar dos alunos, o meu estágio não teria acontecido se não fossem todos os seus esforços no momento crucial. Aos meus amiguinhos da segurança e das guaritas, obrigada pela receptividade, por me ajudarem nas vezes que precisei com o carro ou mesmo sem carro. Obrigada. Meninas da limpeza do CPCA, obrigada por tudo, e principalmente pelos momentos de descontração e de cafezinho.

Não menos importante, Vó, Tia Ida, Mara, Tia Jane, Gera, Tia Nete, Tia Salete, Tia Ferna e Tio Marquim, obrigada pelas orações e por todo carinho, cuidado, compreensão e amor que têm por mim e por me tratarem como filha. Por sempre estarem pedindo por mim e me guardando em seus corações. O apoio de vocês também foi

fundamental para essa conquista. E por fim, mas não por uma questão cronológica, Obrigada Deus e a Nossa Senhora Aparecida por nunca terem me abandonado e me dado forças sempre que eu precisei e clamei. E Obrigada Instituto de Ciências Agrárias e todos os profissionais envolvidos por todo esse tempo e pela formação oferecida.

OBRIGADA.

*“Next time someone complains that you have made a mistake, tell him that
may be a good thing. Because without imperfection, neither you or I
would exist.”- Stephen Hawking.*

RESUMO

O setor de árvores plantadas, referência mundial, com predominância na destinação a fabricação de uma gama de produtos de origem madeireira como, por exemplo, celulose, papel e carvão vegetal para aço verde, gera emprego e renda ao Brasil, combinada com uma atuação socialmente e ambientalmente responsável. Para o abastecimento das unidades consumidoras de madeira, o modal de transporte, assim como a matriz de transporte brasileira, é, predominantemente, rodoviário. Desta forma, este estudo objetivou correlacionar o rendimento energético do transporte de madeira, usando-se o consumo específico de combustível (em g/kWh^{-1}), com as variáveis tempo de secagem da madeira, potência dos caminhões e o consumo de combustível, de forma a contribuir para o gerenciamento sustentável da atividade. A partir de uma base de dados fornecida por uma empresa de transporte florestal atuando na região do Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais, foram compilados os resultados de 1.387 viagens, com uma distância média de 110 km, utilizando caminhões do tipo tritrem florestal, com capacidade nominal de 58,5 m^3 de madeira em toretes com seis metros de comprimento e uma capacidade máxima de 51 t de carga útil dentro dos limites estabelecidos em legislação, com potência média de 440 CV. Foram analisadas simulações considerando o tempo de secagem da madeira no campo em intervalos de 10 dias até completar 160 dias e o efeito desse tempo sobre o rendimento energético do transporte da madeira. Os resultados encontrados permitiram concluir que existe forte correlação negativa entre o tempo de secagem da madeira no campo (antes do transporte até as unidades consumidoras), o consumo de combustível dos caminhões e o acréscimo de potência nos mesmos e o rendimento energético do transporte de madeira. Ainda, que a cada 10 dias de secagem da madeira no campo (partindo-se de um teor de umidade de 60% no momento da colheita) tem-se, em média, uma redução de 2,0% no teor de umidade da madeira e, como consequência, uma melhoria de 2,8% no rendimento energético do transporte de madeira, mantidas constantes as demais condições. Adicionalmente, foi verificado que uma redução da ordem de 10% no consumo de combustível é capaz de proporcionar uma melhora de, cerca de, 9,0% no rendimento energético da atividade; e que um acréscimo de 20 CV na potência dos caminhões representa um ganho possível de até 4,4% no rendimento energético da atividade de transporte de madeira, mantidas constantes todas as demais variáveis. Conclui-se que a busca pela melhoria no rendimento energético da atividade de transporte de madeira pode representar uma importante ferramenta para um modelo de gestão baseado nos princípios da sustentabilidade.

Palavras-chave: eficiência energética; transporte; teor de umidade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2.1. O setor florestal brasileiro	2
2.1.2 Situação atual	3
2.1.3 Tendências para o futuro	4
2. 2. Transporte de madeira.....	6
2.2.1 Modais de transporte	6
2.2.2 Transporte rodoviário florestal	7
2.2.3 Tipos de caminhão utilizados no Brasil	8
2.2.4 Lei da balança.....	9
2. 3. Rendimento energético.....	10
2.3.1 Eficiência em motores de combustão interna.....	10
2.3.2 Motores de combustão interna	12
2.4. Secagem da madeira de eucalipto	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Coleta de dados	14
3.2 Transporte da madeira.....	14
3.3 Determinação do teor de umidade da madeira	15
3.4 Determinação da eficiência energética.....	16
3.5. Análises estatísticas.....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
6. REFERÊNCIAS	24

1. INTRODUÇÃO

Partindo-se do pressuposto de que não é recente o interesse global na economia de combustível fóssil e na redução das emissões de gases por motivos econômicos e ecológicos, cadeias produtivas também começam a se atentar a esses aspectos, principalmente quando se faz uso amplo do combustível em alguma de suas etapas como por exemplo, o transporte rodoviário florestal.

No Brasil, o setor de árvores plantadas têm sido um importante indicador de desenvolvimento econômico, social e ambiental de maneira tal que o setor se tornou competitivo e em franca expansão tornando necessário aumentar a área de produção de madeira e conseqüentemente, o transporte (IBÁ,2020). A matriz de transporte florestal é essencialmente rodoviária (MACHADO et al., 2009), de tal maneira que um elevado consumo de combustíveis fósseis está diretamente associado a isso.

Os programas que regulamentam as emissões veiculares têm servido como medida para certificar que os fabricantes de veículos trabalhem no sentido de diminuir as emissões de poluentes e cumpram os limites regulamentados. Diante dessa necessidade, os esforços têm reunido empresas fabricantes de veículos e motores, em conjunto com instituições do ramo de combustíveis, lubrificantes e componentes na busca de tecnologias para melhorar os níveis de emissões de novos projetos de motores veiculares (CARVALHO, 2011).

No entanto, a apuração do consumo de combustível (em km/litro) parece não ser suficiente para demonstrar a eficiência energética do sistema, bem como fornecer subsídios para a tomada de decisões quanto ao dimensionamento de veículos para transporte de madeira.

Por conseguinte, é cada vez maior a preocupação em se estabelecer metodologias que não comprometam a eficiência energética do sistema de transporte, maximizando-a e minimizando as emissões de gases poluentes, principalmente, visando a redução do consumo e gastos com combustíveis através de uma correta tomada de decisões envolvendo o tipo de caminhão a ser utilizado, programas de gerenciamento de manutenção mecânica e ~~programas~~ de manutenção de estradas florestais, por exemplo.

Desta forma, o presente trabalho objetivou correlacionar o rendimento energético do transporte de madeira, usando-se o consumo específico de combustível (em g/kWh^{-1}), com as variáveis tempo de secagem da madeira, potência dos caminhões e o consumo de combustível, de forma a contribuir para o gerenciamento sustentável da atividade.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O setor florestal brasileiro

Até por volta do início dos anos 60, o setor florestal brasileiro era considerado pouco expressivo, naquele período o governo não tinha interesse no desenvolvimento da atividade florestal no país, dessa maneira, o manejo de florestas nativas e/ou plantadas, era inexpressivo, com reduzido emprego de tecnologia e gestão de projetos (CUNHA, 2019). Quantidade considerável do maciço florestal era importada, além de boa parte dos produtores não se interessavam em investir grandes quantias em seus projetos, principalmente pelos riscos associados ao longo período de retorno do capital pelos empreendimentos florestais (SILVA, 2018).

Os plantios florestais com espécies de rápido crescimento, principalmente com os gêneros *Pinus* e *Eucaliptos*, tiveram significativa expansão a partir dos anos 60, sobretudo no período de vigência dos incentivos fiscais, de 1966 a 1988 (KENGGEN, 2001). Como resultado, as florestas plantadas passaram a suprir de forma crescente, inicialmente a demanda da indústria de celulose e papel e, posteriormente, de outros segmentos importantes tais como a produção de painéis, siderurgia e secagem de grãos (MOREIRA, 2017). No entanto, no final dos anos 80, com o encerramento dos incentivos fiscais oriundos das políticas governamentais, a oferta de matéria-prima para a indústria foi diretamente afetada dando assim início à uma nova fase.

Entre 1991 e 2001, a atuação do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) começou a se destacar com a disponibilização de recursos destinados aos empreendimentos e pesquisas florestais brasileiras (EISFELD *et al.*, 2017). Assim, setor florestal no Brasil teve o BNDES como principal financiador da atividade, apoiando as indústrias que têm nas florestas a matéria-prima essencial para a geração de empregos e riquezas para o país (COSTA, 2016). Outra importante modalidade de subsídio que ajudou o setor florestal a prosperar no Brasil é o fomento, que consiste em um instrumento estratégico para a inserção dos produtores rurais na cadeia de produção de madeira (CUNHA, 2019).

Atualmente, o fomento florestal é promovido por grandes empresas do ramo de papel, celulose, siderurgia e painéis de madeira reconstituída. Os programas se destacam, cada vez mais, pelo fato de promover uma alternativa ao uso de áreas que eram deixadas de lado pela agricultura, em pequenas e médias propriedades rurais (CUNHA, 2019). Desde então, o setor florestal brasileiro vem crescendo e se consolidando.

2.1.2 Situação atual

Referência mundial, o setor de árvores cultivadas, que inclui fabricação de produtos de madeira e celulose, papel e produtos de papel, painéis de madeira, pisos laminados e carvão vegetal para aço verde, gera emprego e renda para o Brasil, combinada com uma atuação socialmente e ambientalmente responsável (IBÁ, 2020).

Segundo o relatório anual emitido pela a Indústria Brasileira de árvores (IBÁ) publicado em 2020, em 2019, o setor florestal brasileiro registrou uma receita bruta de R\$ 97,4 bilhões, um crescimento de 12,6% em relação ao ano anterior. O Produto Interno Bruto brasileiro (PIB) cresceu 1,1% em 2019, seguindo o desempenho modesto dos últimos anos após o fim da recessão em 2016.

O relatório da IBÁ ressaltou ainda que, apesar de ter sido um ano conturbado, de crises políticas, um cenário internacional colérico pela disputa comercial entre Estados Unidos e China com reflexos negativos nas contas externas brasileiras e a desvalorização do Real, a contribuição do setor florestal na balança comercial brasileira permaneceu expressiva. A cadeia produtiva contribuiu com 1,2% (valor adicionado) na formação do PIB brasileiro no ano de 2019, segundo melhor resultado dos últimos 10 anos.

Com a alta nos preços dos combustíveis e desvalorização do real o índice de custos de produção de madeira acumulado aumentou, tendo sido de 6,77% em dezembro de 2019. O aumento dos custos de produção gerou uma alta de preços no setor e ligeira queda no volume de produção e valor adicionado do PIB, gerando uma queda real nos produtos relacionados estimado pelo Monitor do PIB da FGV (Fundação Getúlio Vargas) IBRE (Instituto Brasileiro de Economia) em 2019 (IBA, 2020).

No Brasil, o setor de árvores plantadas tem sido um importante indicador de desenvolvimento econômico, social e ambiental. Em 2019, a área total de árvores plantadas totalizou 9,0 milhões de hectares, um aumento de 2,4% em relação a 2018 conforme pode ser observado na Figura 1. Desse total, a maioria (77%) é representada pelo cultivo de eucalipto, com 6,97 milhões de hectares, e 18% de pinus, com 1,64 milhão de hectares. Além desses cultivos, existem 0,39 milhão de hectares plantados de outras espécies, entre elas a seringueira, acácia, teca e paricá (IBA,2020).

EVOLUÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO E PINUS NO BRASIL, 2014-2019

Change in Eucalyptus and Pine Productivity in Brazil, 2014–2019

Elaboração: FGV e Iba. | Source: FGV and Iba.

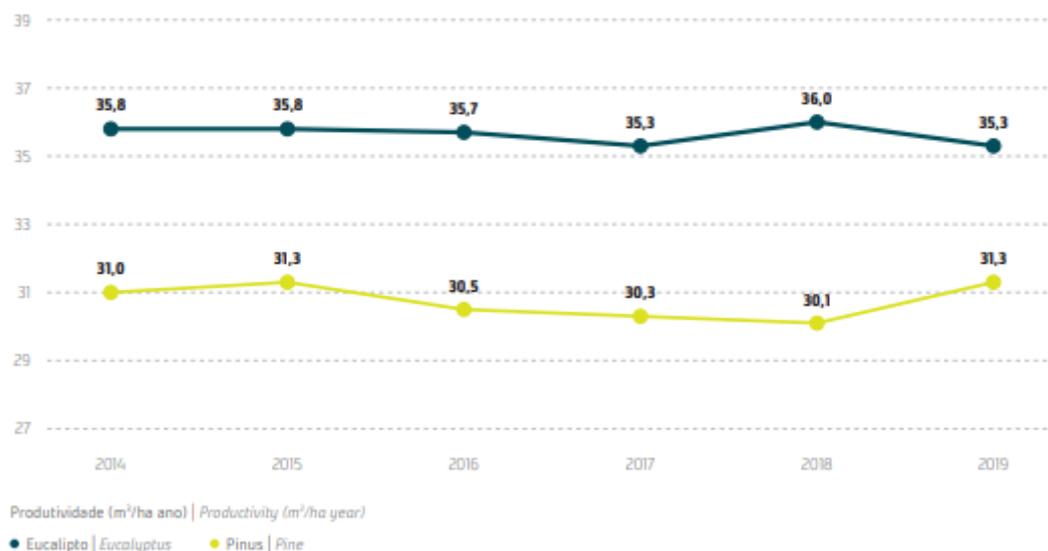


Figura 1. Evolução da produtividade de eucalipto e pinus no Brasil, 2014-2019.

Fonte: IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – Relatório IBÁ 2020

A adoção de boas práticas de manejo, o melhoramento genético e as condições edafoclimáticas do País levaram a um reconhecimento mundial da alta produtividade brasileira, em comparação com os demais países, considerando o volume de madeira produzido por área ao ano e por um dos menores ciclos entre o plantio e a colheita do mundo (IBA, 2020). Quando tratamos dos dois mais expressivos produtos carvão e celulose, temos que a celulose, coloca o Brasil como sendo o maior exportador no mercado mundial, tendo exportado US\$ 1,7 bilhão a mais do que o segundo colocado (Canadá) e o carvão vegetal nacional posicionam o Brasil como principal produtor no mundo (IBA, 2020). É válido ainda ressaltar, que, o carvão, originado de árvores cultivadas, substitui insumos de origem fóssil, diminuindo a emissão de GEEs (Gases de Efeito Estufa) na siderurgia, por exemplo. Desta maneira, o setor reforça o compromisso ambiental, beneficiando outras indústrias.

2.1.3 Tendências para o futuro

O indicador de recursos destinados à inovação, figura 2, medido pela Sondagem da Inovação da FGV/ABDI mostra que o investimento neste segmento em 2019 aumentou em relação a 2018, superando inclusive o indicador agregado da indústria (IBA,2020).

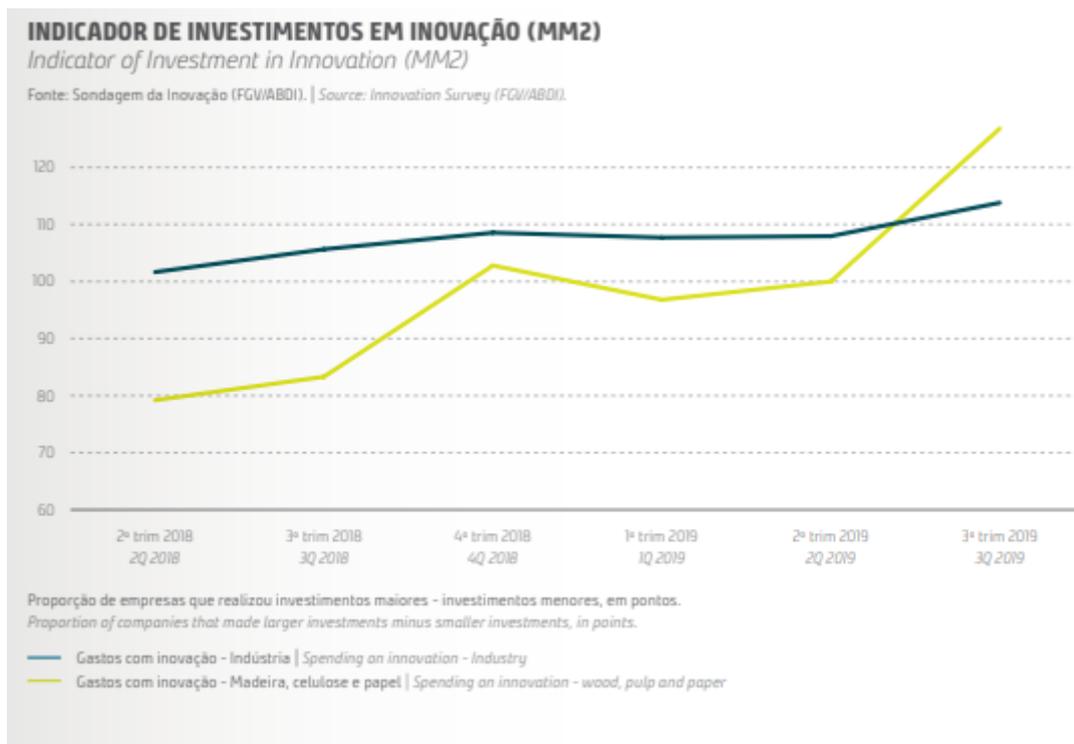


Figura 2. Sondagem da Inovação da FGV/ABDI – Indicador de investimentos

Fonte: IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – Relatório IBÁ 2020

Em 2019, 2% dos investimentos anuais foram destinados para a inovação, o equivalente a quase R\$ 50 milhões distribuídos na área florestal e industrial. Deste montante, parte foi direcionada para Pesquisa e Desenvolvimento (P&D): 1,5% no âmbito florestal, o equivalente a R\$ 25,5 milhões, e 0,8% no âmbito industrial, que representa R\$23,8 milhões (IBA,2020). Na parte florestal, o investimento em tecnologia está atrelado a vários fatores, dentre eles os programas de melhoramento genético, técnicas de manejo, aprimoramentos em processos produtivos, compra de maquinários, dentre outros. Na parte industrial, estão associados ao aprimoramento de produtos e/ou processos, e o que vem chamando atenção, são as iniciativas e pesquisas voltadas para a redução no consumo de energia e/ou redução do consumo de combustíveis fósseis.

Conforme o relatório de 2020 do IBA retrata, segundo a Associação Brasileira de Biotecnologia Industrial (ABBI), a bioeconomia tem potencial para evitar a emissão de até 2,5 bilhões de toneladas de CO2 por ano, reduzir a importação de mais de 130 bilhões de litros de gasolina nos próximos 10 anos, além de substituir o uso de petroquímicos em 25% apenas na próxima década.

2. 2. Transporte de madeira

O transporte é uma atividade indispensável ao funcionamento de qualquer economia. Sendo assim, o transporte de cargas desempenha um papel fundamental inclusive no Brasil, de forma que viabiliza a movimentação de insumos para as plantas industriais e de produtos acabados para os consumidores sendo importante abordar ainda que, na maior parte das indústrias a atividade de transporte tem significativa importância na composição do custo logístico, de forma que, os serviços de transporte devem buscar eficiência, qualidade e ainda contemplar o fator economicidade (RODRIGUES, 2007).

A fim de elucidar melhor sobre a temática, temos que um sistema de transporte, é constituído por: **modo** (via de transporte) que pode ser ferroviário, rodoviário, marítimo, fluvial/lacustre, aquaviário, dutoviário ou aéreo; pela **forma** (relacionamento entre os vários modos de transporte como, por exemplo, unimodal, sucessivo, segmentado ou multimodal); pelo **meio** (elemento transportador) e pelas **instalações complementares** (terminais de carga).

2.2.1 Modais de transporte

Como modais de transporte, conforme citado anteriormente, temos o ferroviário, rodoviário, marítimo, fluvial/lacustre, aquaviário, dutoviário e aéreo. A amplitude e maior uso de cada um destes é variável conforme a localidades, aspectos geográficos, estruturais, históricos e econômicos podendo ainda variar internamente de uma região para outra e vice-versa.

“De acordo com a história, três métodos de transporte florestal predominavam: o fluvial, o rodoviário e o ferroviário. Com a evolução tecnológica, surgiram os métodos dutoviário e aeroviário, mas, por razões econômicas, são pouco utilizados. Até o século XIX, o transporte fluvial de madeira foi o método predominante na Europa Central. Com a construção de uma rede viária pública, composta por rodovias e ferrovias, o transporte fluvial de madeira chegou à total paralisação. Todavia, o transporte fluvial continua tendo importância para o norte da Europa, sobretudo nas regiões de florestas boreais de coníferas (Sibéria) e nas florestas tropicais do oeste da África e da Amazônia. Durante a primeira metade do século XX, o transporte ferroviário de madeira teve considerável relevância nos alpes europeus, no leste da Europa, na América do Norte e nas regiões tropicais do oeste africano. O transporte de madeira por via aérea, especialmente por helicópteros, comprovou sua eficiência, tanto no transporte de pessoal e de material quanto no controle e na proteção florestal nas regiões desprovidas de rede viária. Em virtude dos elevados custos, os helicópteros têm sido utilizados no transporte de madeira na América do Norte, Ásia e Europa em pequena escala comercial.” - (MACHADO et al, 2013).

Segundo Rodrigues (2007), em seu livro “Introdução aos sistemas de transporte no Brasil e à logística internacional”, a geografia brasileira aponta para uma vocação marítima, ele ainda nos apresenta que o transporte hidroviário como o mais econômico entre todos os modais de superfície, de maior capacidade de carga e maior vida útil, no entanto, o que se percebe é uma priorização do modal rodoviário no Brasil, associado a toda uma contextualização histórica e evolutiva, de forma que Rodrigues ainda nos apresenta que se a matriz de transporte brasileira fosse reorientada para aquaviária ou ferroviária, o valor agregados dos produtos reduziria e consequentemente a competitividade de mercado interno e externo ampliada.

“No Brasil, o transporte rodoviário corresponde a 59% da carga transportada, enquanto o transporte ferroviário detém 24%. Segundo Machado et al. (2009), em outros países com dimensões similares ao Brasil o transporte ferroviário tem maior força como na Rússia (81%) e Canadá (46%).” – Rodrigues, 2007.

No cenário nacional temos que, majoritariamente o transporte florestal é realizado pelo modal rodoviário, devido a tendência e histórico nacional. Além disso, alguns fatores contribuem para esta situação: extensa malha viária, oferta de diferentes tipos de veículos, baixo valor de instalação quando comparado a outros modais existentes (MACHADO et al., 2009).

Considerando tal cenário, temos, portanto que um melhor planejamento do tipo de veículo a ser utilizado no transporte de madeira, deve ser levado em consideração a quantidade de madeira a ser transportada e a capacidade de carga de cada veículo (ALVES et al, 2013), de forma que tais fatores exercem influência na precificação do produto e ainda tornando necessária uma análise do aspectos técnicos e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares de carga.

2.2.2 Transporte rodoviário florestal

O transporte florestal consiste na movimentação de madeira dos pátios ou das margens das estradas nos talhões até o local de consumo ou pátio das empresas. No Brasil, pode ser realizado por diversos meios (ferroviário, dutoviário, rodoviário), em que este último representa 85% de toda a madeira que é transportada e, ainda, 62% de todos os produtos transportados no país (SILVA et al., 2007).

Silva (2007) sinaliza que vários são os fatores que influenciam o transporte de cargas pelo modal rodoviário, e, no caso florestal, isso não poderia ser diferente. Ganham

destaque os tipos de veículo, as condições em que se encontram a malha rodoviária, a capacidade de carga em volume que o veículo transporta, as condições locais e regionais e os tipos de equipamentos de carregamento e descarregamento (MACHADO et al., 2000).

A madeira é um insumo de baixo valor específico e agregado, possuindo grande peso e baixo valor unitário, ou seja, o seu valor em relação ao seu peso e, ou, volume é baixo. Por isso, o custo de transporte dessa mercadoria é relativamente alto. O custo de transporte varia diretamente com a distância percorrida (SILVA, 2007) sendo assim, temos que, quanto maior o trajeto percorrido, mais elevado será o custo unitário por volume de madeira transportada (SILVERSIDES, 1976). Como alternativa, uma forma de reduzir o custo em longos percursos tem sido a escolha e utilização de veículos com maior capacidade de carga (LEITE, 1992).

Os custos de transporte rodoviário florestal principalmente por estar condicionado às oscilações da cotação de petróleo e conseqüentemente, aos preços dos combustíveis no cenário nacional de maneira que os gastos com combustíveis representam cerca de 35% do custo total das empresas de transporte de carga rodoviária (GUIMARÃES, 2014) sendo, portanto, um dos fatores mais onerosos da atividade. Desta forma, temos o combustível como uma variável de alta influência na redução de custos de transporte e ainda alívio de gases de efeito estufa de forma que uma economia no consumo de combustível dos veículos de transporte pode ser conseguida com reduções de peso nos constituintes dos veículos e resistência dos pneus, melhorias na aerodinâmica e eficiência do motor (GUIMARÃES, 2014).

Atualmente, percebe-se a busca em se otimizar a quantidade de madeira transportada por veículo respeitando sempre a sua capacidade de carga e a legislação vigente para tal. Sendo assim, os veículos utilizados no transporte florestal rodoviário podem ser classificados conforme a sua capacidade de carga.

2.2.3 Tipos de caminhão utilizados no Brasil

Para um melhor planejamento do tipo de veículo a ser utilizado no transporte devemos levar em consideração a distância a ser percorrida do local de carregamento ou de descarga, a quantidade de madeira a ser transportada e ainda, a capacidade de carga do veículo a ser utilizado.

Em se tratando da capacidade de carga, os veículos podem ser classificados da seguinte forma: **veículos leves**, que têm capacidade de carga que não ultrapassa 10 toneladas; **veículos pesados**, que suportam de 30 a 40 toneladas de carga; e **veículos extrapesados**, com capacidade de carga acima das 40 toneladas (SILVA et al, 2007).

“Como exemplo de veículos extrapesados, tem-se o bitrem (um cavalo mecânico e dois semi-reboques), tritrem (um cavalo mecânico e três semi-reboques), treminhão (um caminhão e dois reboques) e o rodotrem (um veículo articulado e um reboque) (MACHADO et al., 2000)” (SILVA et al, 2007).

Para uma adequada escolha e tomada de decisão, estudos devem ser realizados para identificar qual o tipo de veículo mais indicado para se transportar o tipo de madeira em questão bem como o seu porte, devendo-se sempre estar em alerta para o que foi estabelecido no planejamento operacional da empresa, ressaltando assim que uma correta identificação dos fatores operacionais, do veículo mais adequado, e ainda o correto momento a ser feito o transporte, podem ser preponderantes e geradores de uma economia significativa de custos e recursos para as empresas do setor e ainda um aumento a eficiência energética do transporte.

2.2.4 Lei da balança

Em se tratando da escolha de um dado veículo como fonte de transporte, associado ao dimensionamento do veículo e a sua capacidade de carga, deve-se sempre estar atento as restrições de circulação e capacidade permitida nas principais rotas que este deverá fazer, onde para isso, o limite permitido de peso da carga transportadas nas rodovias devem ser verificados conforme o disposto nas Resoluções 2010/06 e 2011/06 do COTRAN (Conselho Nacional de Transito), popularmente conhecida como Lei da balança.

A Resolução nº210 de 13/11/2006, foi construída considerando o que consta do o disposto no art. 99, do Código de Trânsito Brasileiro, que dispõe sobre peso e dimensões, e a necessidade de definir os limites de pesos e dimensões para a circulação de veículos. Os limites de pesos e dimensões (altura, largura e comprimento) para a circulação dos veículos, variam conforme o número de eixos, tipo e posicionamento do motor, se são articulados ou não, peso bruto bem como outros fatores, onde se estabelece os limites para cada em específico.

“Art. 12-A. O peso e as dimensões máximos aqui estabelecidos não excluem a competência dos demais órgãos e entidades executivos rodoviários fixarem valores mais restritivos em relação a vias sob sua circunscrição, de acordo com as restrições ou

limitações estruturais da área, via/pista, faixa ou obra de arte, desde que observado o estudo de engenharia respectivo.

Parágrafo único. O órgão e entidade com circunscrição sobre a via deverá observar a regular colocação de sinalização vertical regulamentadora, nos termos do Manual de Sinalização Vertical de Regulamentação, especialmente as placas R-14 e R-17, conforme o caso.” - Resolução nº210 de 13/11/2006 do CONAMA.

A Lei da balança se correlaciona de certa maneira com o consumo de combustível, uma vez que, ao circular com carga excedente, além de contribuir com o desgaste do veículo, das vias, ainda corrobora com o aumento do consumo de combustível. A determinação do peso também leva em consideração o eixo do veículo e, ao se ultrapassar o peso permitido, a fiscalização pode aplicar as multas cabíveis.

2. 3. Rendimento energético

A pandemia do COVID-19 afetou em maior proporção o consumo de derivados de petróleo (ênfase no consumo de transportes), com previsão de queda de 9,3% em 2020 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021) conforme podemos observar a seguir (figura 3) os dados relacionados na Resenha Energética brasileira, publicada em junho de 2021 referente ao ano de 2020.

Tabela 21: Matriz Energética de Transportes (% e tep)

Fonte	Brasil		OCDE		Outros (*)		Mundo	
	1973	2020	1973	2020	1973	2020	1973	2020
Derivados de petróleo	98,7	73,2	95,7	91,4	83,2	88,3	94,4	90,9
Gás Natural	0,0	2,1	2,4	2,7	0,4	7,9	1,6	4,4
Carvão Mineral	0,01	0,0	1,1	0,0	13,5	0,0	3,0	0,0
Eletricidade	0,3	0,2	0,7	0,9	2,8	2,5	0,9	1,4
Bioenergia	1,0	24,5	0,0	5,0	0,08	1,4	0,06	3,4
Total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
Total - Mtep	19	79	695	1.178	183	1.121	1.081	2.778
% do mundo (**)	1,8	2,9	64,3	42,4	16,9	40,4		

(*) Exclusivo Brasil e países da OCDE. (**) Bunker, incluído apenas no mundo, completa 100%.

Figura 3. Matriz energética de transporte (% e tep) em 2020

Fonte: Resenha Energética brasileira (2020), pg. 26. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/ResenhaEnergéticaExercicio2020final.pdf>

2.3.1 Eficiência em motores de combustão interna

A eficiência, também conhecida por rendimento, representa o grau de sucesso com que um processo de transferência ou conversão de energia é realizado (CARVALHO,

2011). Segundo ÇENGEL e BOLES (2006), expressão da eficiência pode ser apresentada através da relação entre os termos de um resultado desejado e de um fornecimento necessário (equação 5.1):

$$\eta = \frac{\text{resultado desejado}}{\text{fornecimento necessário}} \quad (\text{eq.1})$$

Onde,

- η representa a eficiência;
- Resultado desejado representa a potência de saída do motor;
- Fornecimento necessário é o recurso que foi disponibilizado para a realização do objetivo proposto. No caso dos MCI é a própria energia do combustível.

O desempenho do equipamento de combustão pode ser caracterizado pela eficiência da combustão, definida pela equação 5,2 (CARVALHO, 2011):

$$n_c = \frac{Q}{PC} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde,

- n_c , representa a eficiência da combustão,
- Q é a quantidade de calor liberada durante a combustão,
- Fornecimento necessário resultado desejado $n_c = \frac{Q}{PC} = \frac{m \cdot PC}{W_{nt}}$. • •
- 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:

$$n_t = \frac{W}{m * PC} \quad (\text{eq.3})$$

Onde,

- n_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, 2011). 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, 2011). Outro fator importante é o tipo de combustível utilizado o que acaba por resultar em diferentes medidas de desempenho, eficiência e também emissões.

2.3.2 Motores de combustão interna

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, 2011). 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, 2011).

2.4. Secagem da madeira de eucalipto

Segundo Oliveira (2015), a secagem da madeira de eucalipto é tida como uma das fases de maior importância para a produção de carvão vegetal, pois, ao se proporcionar a redução da massa de água presente na madeira, conseqüentemente propicia-se uma diminuição do custo com transporte, e ainda um aumento do rendimento gravimétrico, redução no tempo de carbonização e a diminuição da emissão de gases poluente (PINHEIRO, 2013).

Antes de ser transportada, a madeira é deixada por um período no campo para que perca um certo teor de umidade antes de ser transportada. Esse período possui influência

direta na etapa seguinte e a que estamos procurando otimizar dentro do proposto pelo presente trabalho.

Para a produção de carvão vegetal, a forma mais recorrente de secar a madeira consiste no empilhamento das toras no campo, próximo ao local de colheita (ZANUNCIO et al, 2013). A saída de água da madeira ocorre de forma natural, em função das condições ambientais locais de temperatura, umidade relativa e circulação de ar (OLIVEIRA, 2015). Na secagem ao ar livre, o teor de umidade da madeira varia bastante sendo a posição na pilha e diâmetro das toras um dos fatores que colaboram para essa variação. Tal método de secagem apresenta baixo custo de execução, no entanto necessita de grandes áreas e requer longo período de tempo para atingir teores de umidade, entre 30 e 40%, aceitos como adequados para conversão em carvão (OLIVEIRA, 2015).

“No início do processo de secagem, a perda de água é bastante rápida, pois a madeira apresenta umidade elevada. À medida que a umidade da madeira vai aproximando-se da umidade de saturação das fibras, em torno de 30%, a perda de água torna-se mais difícil e conseqüentemente a secagem torna-se mais lenta (JANKOWSKY, 1990) uma vez que, temos dois tipos de água presentes na madeira, a livre, que é a primeira a ser perdida e a presente nas paredes celulares, sendo essa última mais difícil de ser perdida. O tempo de secagem da madeira destinada à produção de carvão, normalmente varia entre 90 e 150 dias, ou seja, a madeira colhida deve ficar estocada durante este período para atingir valores adequados de umidade, em média 30% (CARNEIRO; OLIVEIRA, 2013; OLIVEIRA, 2015).” – Oliveira, 2015.

É válido ressaltar que tanto o tempo de secagem e o teor de umidade sofrem influência das condições ambientais e climáticas do local e ainda das características intrínsecas da madeira em que se está trabalhando, como por exemplo, sua estrutura anatômica. Outro fator que também influencia nesse processo e no tempo é o tamanho das toras expostas para secagem.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Coleta de dados

Os dados foram coletados em áreas de uma empresa florestal localizada nas regiões do Jequitinhonha e do São Francisco, Estado de Minas Gerais, situadas entre os meridianos de 42°48'00" a 43°43'00" de longitude a Oeste de Greenwich e os paralelos de 16°49'00" a 17°42'00" de latitude a Sul da linha do Equador. A altitude varia entre 600 e 1.100 m.

A região abrange áreas com precipitação média anual que vão de 750 mm até 1.400 mm. Segundo a classificação climática de Köppen, os tipos climáticos predominantes na região são 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) e Cwb - temperado chuvoso e moderadamente quente, com preponderância de chuvas em verões brandamente quentes (MEIRA JUNIOR et al., 2017).

Na área de estudo, as florestas são, em sua totalidade, cultivadas com eucaliptos em povoamentos de clones híbridos (*Eucalyptus urophilla* x *E. grandis*) com produtividade média de 245 m³/ha, em regime de alto fuste com rotação de 7 anos de idade, espaçamento 3 x 3 m e índice médio de sobrevivência de 95%, sempre em 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 7 anos de idade, a madeira apresenta densidade básica média de 0,450 g/cm³ (ou 0,45 t/m³). A colheita, por sua vez, é realizada através do sistema de árvores inteiras (*full-tree*), sistema em que, de acordo com Malinovski et al. (2014), a árvore é derrubada e levada para a margem da estrada ou pátio intermediário, onde é processada em forma de pequenas toras, com menos de seis metros de comprimento.

3.2 Transporte da madeira

O transporte da madeira, desde o campo até as unidades de carvoejamento, é realizado utilizando caminhões do tipo tritrem florestal (Figura 4), com capacidade nominal de 58,5 m³ de madeira em toretes com seis metros de comprimento, limitado 74

t de peso bruto total combinado o qual, descontados a tara do cavalo mecânico e do implemento, representa uma capacidade máxima de 51 t de carga útil dentro dos limites estabelecidos em legislação específica.

Na região de estudo, a distância média de transporte é de 55 km, ou 110 km considerando o ciclo total (viagem vazia e retorno carregado).

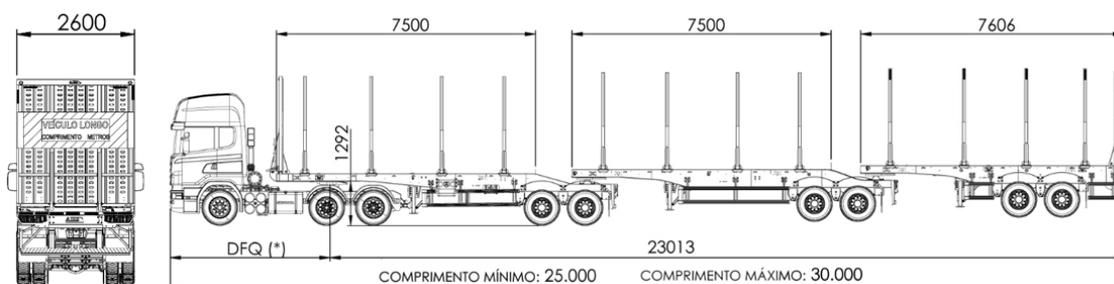


Figura 4. Tritrem florestal utilizado no transporte de madeira.

Fonte: <http://www.aizimplementos.com.br/tritrem-florestal-aizimplementos.html>

Foram monitoradas as viagens de transporte de madeira de 16 caminhões, no período de janeiro a dezembro de 2020, totalizando 1.387 viagens de ida e volta. Os veículos possuíam potências variando de 420 a 540 CV e foram considerados os seguintes dados médios por caminhão: volume de madeira (m³) por viagem; consumo médio de combustível (km/l) e velocidade média da viagem completa, ida e volta (km/h). A partir desses dados, foram realizadas as demais análises para o cálculo do rendimento energético do processo de transporte de madeira.

3.3 Determinação do teor de umidade da madeira

Para determinar a umidade da madeira após a colheita e o processamento, durante o período de secagem às margens dos talhões, foi assumido que a perda diária de umidade da madeira de eucalipto é de 0,1288% (EUFRADE JUNIOR, 2019).

Foram estimados os valores de umidade diários da madeira desde o momento da colheita até 160 dias de secagem, que é o tempo máximo de secagem da madeira no campo adotado por empresas produtoras de carvão vegetal na região do estudo. Para estimativa dos valores de rendimento energético do transporte dessa madeira, foram considerados intervalos de 10 dias de secagem.

3.4 Determinação da eficiência energética

A eficiência energética do transporte de madeira foi determinada a partir do consumo de combustível dos caminhões utilizados no transporte da madeira, considerando a variação dos volumes de madeira transportados após diferentes períodos de secagem da madeira no campo. Para tanto, foi calculado o rendimento energético por unidade de madeira transportada (m^3), conforme as Equações 4 e 5, a seguir.

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

Onde: RE = rendimento energético (g/kW/ m^3);

Ce = consumo específico de combustível (g/kWh);

Prod = produtividade (m^3/h).

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

Onde: Ce = consumo específico de combustível (g/kWh);

Q = consumo de combustível (l/h);

N = potência do motor (kW);

R = densidade do combustível (kg/m^3)

3.5. Análises estatísticas

Foi avaliado se os valores encontrados para rendimento energético apresentam associação entre si e com os valores de volume da madeira após diferentes tempos de secagem em campo (m^3/t), potência dos motores dos caminhões (CV) e consumo de combustível (km/l). Para isso, foi obtido o grau de associação, efetuando-se 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 realizadas em ambiente Excel.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nas informações fornecidas por uma empresa de transporte de madeira, referentes a 1.387 viagens realizadas ao longo do ano de 2020, uma compilação dos dados foi feita, sendo os resultados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Compilação dos dados de transporte de madeira realizado por uma empresa florestal ao longo do ano de 2020

Caminhão	Volume Médio por Viagem (m ³)	Potência (CV)	Potência (kW)	Viagens	Consumo Médio (Km/l)	Velocidade Média (km/h)
1	48,96	420	308,9	165	1,10	31,0
2	50,52	420	308,9	99	1,38	31,0
3	49,84	420	308,9	181	1,38	28,0
4	55,59	440	323,6	87	1,43	32,0
5	52,21	420	308,9	122	1,37	34,0
6	48,55	420	308,9	49	1,48	29,0
7	53,55	440	323,6	145	1,28	33,0
8	49,00	440	323,6	46	1,51	28,0
9	50,09	420	308,9	76	1,35	32,0
10	48,20	540	397,2	66	1,38	32,0
11	43,58	440	323,6	64	1,43	34,0
12	46,30	440	323,6	59	1,40	35,0
13	42,07	440	323,6	70	1,55	28,0
14	53,17	440	323,6	62	1,38	35,0
15	41,64	440	323,6	54	1,55	34,0
16	47,23	420	308,9	42	1,26	29,0
Médias ⁽¹⁾	48,78	434	319	1.387	1,36	31,5

* Distância média de Transporte = 110 km ida e volta

⁽¹⁾ Médias ponderadas pelo número de viagens.

A partir dos dados da Tabela 1 acima, considerando cada caminhão durante o período de avaliação, foram calculadas as variáveis necessárias para a obtenção do rendimento energético real, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Valores calculados para obtenção do rendimento energético real do transporte de madeira realizado por uma empresa florestal ao longo do ano de 2020

Caminhão	Consumo Médio (l/km)	Consumo Efetivo (l/hora)	Consumo Específico (g/kW.hora)	Tempo Médio de Viagem (h)	Produtividade (m³/hora)	Rendimento Energético (g/kW.h/m³)
1	0,91	28,18	77,55	3,55	13,80	5,62
2	0,72	22,46	61,81	3,55	14,24	4,34
3	0,72	20,29	55,83	3,93	12,69	4,40
4	0,70	22,38	58,78	3,44	16,17	3,63
5	0,73	24,82	68,29	3,24	16,14	4,23
6	0,68	19,59	53,92	3,79	12,80	4,21
7	0,78	25,78	67,72	3,33	16,07	4,22
8	0,66	18,54	48,70	3,93	12,47	3,90
9	0,74	23,70	65,22	3,44	14,57	4,48
10	0,72	23,19	49,63	3,44	14,02	3,54
11	0,70	23,78	62,45	3,24	13,47	4,64
12	0,71	25,00	65,66	3,14	14,73	4,46
13	0,65	18,06	47,45	3,93	10,71	4,43
14	0,72	25,36	66,62	3,14	16,92	3,94
15	0,65	21,94	57,61	3,24	12,87	4,48
16	0,79	23,02	63,33	3,79	12,45	5,09
Médias ⁽¹⁾	0,74	23,35	62,36	3,52	13,96	4,42

⁽¹⁾ Médias ponderadas pelo número de viagens.

Por sua vez, o ritmo de secagem da madeira foi estimado em períodos de 10 dias, de forma a estabelecer a relação peso x volume e a capacidade técnica de carga dos caminhões (em m³), respeitando a Lei da Balança, bem como o rendimento energético (Tabela 3 e Gráfico 1). Os resultados apresentados consideram um caminhão com

potência de 440 CV, consumo de combustível de 1,36 km/l e velocidade média de 31,5 km/h (com distância total de 110 km considerando as viagens de ida e volta).

Tabela 3. Estimativa do ritmo de secagem e rendimento energético do transporte da madeira

Dias de Secagem	Teor de Umidade (%)	Relação Volume/Peso (m³/ton)	Capacidade do Caminhão (ton)	Capacidade do Caminhão (m³)	Rendimento Energético (g/kW.h/m³)
1	60,0	0,615	51	31,38	6,77
10	58,8	0,633	51	32,29	6,58
20	57,6	0,653	51	33,30	6,38
30	56,3	0,673	51	34,32	6,19
40	55,0	0,693	51	35,33	6,01
50	53,7	0,712	51	36,34	5,85
60	52,4	0,732	51	37,35	5,69
70	51,1	0,752	51	38,36	5,54
80	49,8	0,772	51	39,37	5,40
90	48,9	0,792	51	40,38	5,26
100	47,2	0,812	51	41,39	5,13
110	46,0	0,831	51	42,40	5,01
120	44,7	0,851	51	43,41	4,89
130	43,4	0,871	51	44,42	4,78
140	42,1	0,891	51	45,43	4,68
150	40,8	0,911	51	46,44	4,57
160	39,5	0,930	51	47,45	4,48

Obs.: Densidade Básica da Madeira = 650 kg/m³.

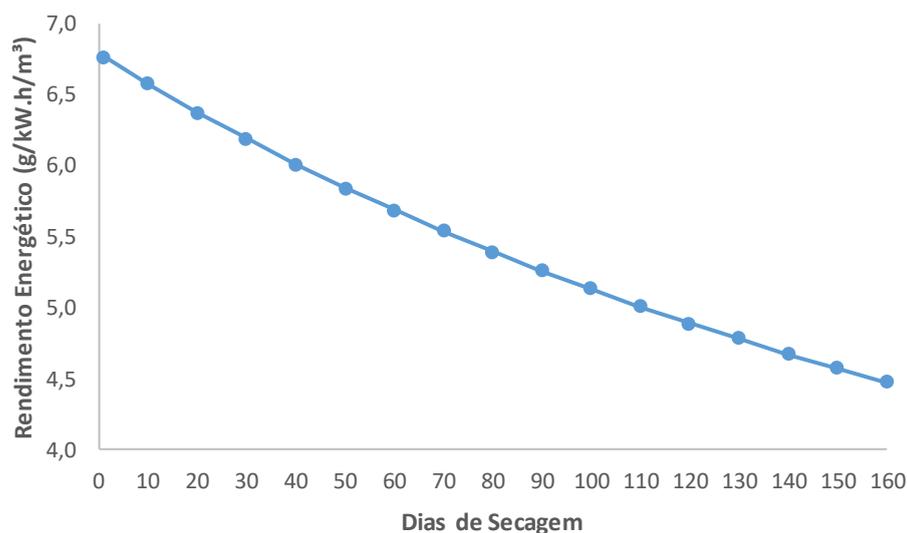


Gráfico 1. Relação entre o tempo de secagem da madeira (dias) e o rendimento energético do transporte (g/kW.h/m³), nas condições do estudo.

Para verificar a associação entre o rendimento energético, o tempo de secagem da madeira e a potência e o consumo de combustível dos caminhões utilizados no transporte de madeira, os resultados da análise da matriz do coeficiente de correlação de Pearson (r), por meio do teste t a 5% de probabilidade, são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Matriz de coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis de estudo e o rendimento energético do transporte de madeira

Variáveis	Rendimento Energético do Transporte de Madeira
Rendimento Energético	1
Relação Peso x Volume da Madeira	- 0,994*
Potência dos Caminhões	- 0,479*
Consumo de Combustível dos Caminhões	- 0,635*

Obs: * Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste t com 1.385 graus de liberdade.

Os resultados dessas análises indicaram a existência de forte correlação negativa entre as variáveis avaliadas e o rendimento energético do transporte de madeira, denotando a importância do entendimento do comportamento de tais variáveis para a

melhoria do rendimento energético. Essa forte correlação negativa indica que a secagem da madeira no campo (antes do transporte até as unidades consumidoras), a redução no consumo de combustível dos caminhões e o acréscimo de potência nos mesmos contribuem, isolada ou conjuntamente, para a melhoria do rendimento energético do transporte de madeira.

Os resultados das análises deste estudo apontaram que a cada 10 dias de secagem da madeira no campo (partindo-se de uma umidade de 60% no momento da colheita) tem-se, em média, uma redução de 2,0% na umidade da madeira e, como consequência, uma melhoria de 2,8% no rendimento energético do transporte de madeira, mantidas constantes as demais condições.

Independentemente se o processo de conversão industrial privilegia ou não a umidade da madeira como uma característica importante, todos os setores da base florestal valorizam a umidade das toras e das biomassas florestais por causa da logística florestal. Quanto mais úmida for a madeira ou a biomassa florestal, mais pesada ela poderá ser por unidade de volume, e com isso, demandará mais recursos e mais energia para ser manuseada, transportada e estocada (FOELKEL, 2016). De modo geral, pode-se afirmar que a secagem da madeira, dentre outros benefícios, promove a redução da massa da madeira, reduzindo os custos de transporte e mão de obra com o seu manuseio (JANKOWSKY, 2005).

O transporte de madeira é, dentre todas as atividades necessárias para a produção de madeira, aquela que, individualmente, representa o maior consumo de combustível. Em seu estudo, considerando uma distância média de 100 km (ida e volta) e utilizando caminhões do tipo bitrem florestal, Souza et al. (2019) encontraram que o transporte de madeira foi responsável por 12,7% de todo o combustível consumido ao longo dos 7 anos do ciclo de produção da madeira. Tal fato denota a importância da gestão do consumo de combustível nessa atividade.

É importante ressaltar que a variação de consumo de combustível pode ser, de fato, observada na prática devido a fatores como tipo de veículo e sua tecnologia, tempo de vida e manutenção do veículo, qualidade do combustível, temperatura de operação, capacidade de carga do veículo, peso da carga transportada, distância percorrida, velocidade média do percurso, qualidade das vias e infraestrutura, condições de deslocamento, fluxo e congestionamento do sistema, topografia do percurso, condições climáticas no trajeto, hábitos e comportamento do motorista durante a condução, entre outros aspectos (KAMAKATÉ; SCHIPPER, 2009; RUZZENENTI; BASOSI, 2009).

Todos esses fatores podem, isolada ou conjuntamente, ser gerenciados visando a redução do consumo de combustível e a melhoria do rendimento energético do transporte de madeira. Os resultados deste estudo permitem afirmar que uma redução da ordem de 10% no consumo de combustível é capaz de proporcionar uma melhora de, cerca de, 9,0% no rendimento energético da atividade, mantidas constantes todas as demais variáveis.

Em outra vertente, tem-se a potência dos caminhões utilizados para o transporte de madeira como um fator a ser gerenciado quando se deseja a obtenção de melhorias no rendimento energético da atividade. Campos et al. (2011) afirmam que caminhões de pequeno porte teriam emissão elevada em comparação com caminhões de grande capacidade de transporte de cargas (em razão até 4,4 vezes maior), sendo mantida relação similar em relação ao consumo de combustível.

Associa-se a isto, o fato de caminhões com maiores potências serem capazes de tracionar implementos com maior capacidade de carga e, conseqüentemente, com melhor rendimento energético. Conforme possibilitado pelos dados analisados neste estudo, mantendo constantes as demais variáveis, um acréscimo de 20 CV na potência dos caminhões representou um ganho possível de até 4,4% no rendimento energético da atividade de transporte de madeira.

Para Silveira e Sierra (2010), há no mercado diversos modelos de caminhões e no momento da compra, a escolha do proprietário se baseia na potência, no conforto, na facilidade de operação e na manutenção, além do preço. O conhecimento da eficiência energética do caminhão poderia ser mais um item a ser considerado em sua seleção.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), em 2019 o setor de transporte foi responsável por 25% das emissões totais mundiais de CO₂, perdendo apenas para o setor de geração de eletricidade e calor, que correspondeu a cerca de 40%. As emissões de GEE provenientes dos transportes tendem a provocar danos cada vez maiores ao meio ambiente, caso não sejam tomadas medidas para reduzir o avanço dessas emissões. O uso de caminhões para transporte de cargas pode proporcionar, em diversas situações, maior flexibilidade nas operações. Entretanto, há um conflito entre essas vantagens e os interesses ambientais devido aos elevados níveis de emissões provocados pela frota, conforme relatado por Richardson (2005).

Dentre os mais variados tipos de sistemas logísticos para transporte de cargas, o sistema de transporte de madeira mostra-se de grande interesse para diversas pesquisas devido ao crescente consumo mundial de produtos de base florestal associado as questões ambientais e sociais envolvidas. Sob essa ótica, considerando a questão do elevado gasto

energético que tal transporte representa, a busca pela melhoria no rendimento energético da atividade pode representar uma importante ferramenta para um modelo de gestão baseado nos princípios da sustentabilidade: economicamente viável, socialmente justo e ambientalmente correto.

5. CONCLUSÕES

Nas condições em que este estudo foi realizado, conclui-se que:

- Existe forte correlação negativa entre o tempo de secagem da madeira no campo (antes do transporte até as unidades consumidoras), o consumo de combustível dos caminhões e o acréscimo de potência nos mesmos e o rendimento energético do transporte de madeira.
- A cada 10 dias de secagem da madeira no campo (partindo-se de um teor de umidade de 60% no momento da colheita) tem-se, em média, uma redução de 2,0% no teor de umidade da madeira e, como consequência, uma melhoria de 2,8% no rendimento energético do transporte de madeira, mantidas constantes as demais condições.
- Uma redução da ordem de 10% no consumo de combustível é capaz de proporcionar uma melhora de, cerca de, 9,0% no rendimento energético da atividade, mantidas constantes todas as demais variáveis.
- Um acréscimo de 20 CV na potência dos caminhões representou um ganho possível de até 4,4% no rendimento energético da atividade de transporte de madeira.
- A busca pela melhoria no rendimento energético da atividade pode representar uma importante ferramenta para um modelo de gestão baseado nos princípios da sustentabilidade.

6. REFERÊNCIAS

- ALVES, R. T. et al. Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares. **Revista Árvore**, v. 37, p. 897-904, 2013.
- BRUNETTI, F.. **Motores de Combustão Interna-Vol. 1**. Editora Blucher, 2018. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ppvqDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA13&dq=motores+de+combust%C3%A3o+interna&ots=MNY9pX4pdy&sig=K9J30VVpNEOTi-ed6L32Xx_7wp8#v=onepage&q=motores%20de%20combust%C3%A3o%20interna&f=false> . Acessado em 09 de agosto de 2021.
- CAMPOS, E. F.; PUNHAGUI, K. R. C.; JOHN, V. M. Emissão de CO₂ do transporte damadeira nativa da Amazônia. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 2, p. 157-172, 2011.
- 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.
- ÇENGEL Y.A., BOLES M. A. **Termodinâmica**. 5ª ed., MC Graw Hill, 2006. CETESB. Informações sobre regulamentações de emissões. 2011.
- COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. New Jersey: Lawrence Earlbaum Associates, 1998.
- CONAMA. Resolução nº210 de 13/11/2006 do CONAMA. Art.12-A. Disponível em:<[https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=104243#:~:text=Estabelece%20os%20limites%20de%20peso,de%2003%2F01%2F2022\)%3A](https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=104243#:~:text=Estabelece%20os%20limites%20de%20peso,de%2003%2F01%2F2022)%3A)> . Acesso em: 09 de janeiro de 2022
- COSTA, M. M. Financiamento para a restauração ecológica no Brasil. In: SILVA, A. P. M. da; MARQUES, H. R.; ROSA, R. H. (Orgs.). Mudanças no código florestal brasileiro: desafios para a implementação da nova lei. Rio de Janeiro: IPEA-Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2016. p. 235-260.
- CUNHA, G.T. *et al.* PANORAMA DO SETOR FLORESTAL BRASILEIRO COM ÊNFASE NO ESTADO DE MINAS GERAIS. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, v. 16, n. 29, 2019.
- EISFELD, R. de L.; SOCHER, L. G.; RIBEIRO, C. C. Modelo de fomento florestal nas instituições estaduais nos estados do Sul, são paulo e minas gerais. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2, n. 2, p. 1-9, 2017. Disponível em: DOI:<<http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v2i2.53230>>.
- EUFRADE-JUNIOR, Humberto de Jesus. Predição e controle da umidade da madeira para otimização da cadeia produtiva de energia de eucalipto. 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/182137>>. Acesso em: 02 de janeiro de 2022.
- FOELKEL, C. **Secagem na floresta e ao ar livre de toras e biomassa de eucalipto**. Eucalyptus Online Book & Newsletter. 2016. Disponível em: <<https://www.eucalyptus.com.br/newsletter.html>> Acesso em: 01 Fev 2022.

- GUIMARÃES, P. P.. Consumo de combustível em duas combinações veiculares de carga no transporte rodoviário florestal. 2014.
- IBA – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – Relatório IBÁ 2020. Brasília: IBA, 2020. Disponível em:< <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/986/o/relatorio-iba-2020.pdf>> . Acesso em: 03 de agosto de 2021.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Greenhouse gas emissions from energy data explorer. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/articles/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>>. Acesso em: 25 Jan 2022.
- JANKOWSKY, I. P. Fundamentos de secagem de madeiras. Piracicaba: ESALQ, 1990. 13 p.
- JANKOWSKY, I. P. Secagem adequada é decisiva para qualidade. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 33-37, 2005.
- KAMAKATÉ, F.; SCHIPPER, L. Trends in truck freight energy use and carbon emissions in selected OECD countries from 1973 to 2005. **Energy Policy**, v. 37, n. 10, p. 3743-3751, 2009.
- KENGEN, S. A política florestal brasileira: uma perspectiva histórica. Porto Seguro: Série Técnica IPEF, n. 34, 2001. p. 18-34.
- LEITE, A. M. P. Análise dos fatores que afetam o desempenho de veículo e o custo de transporte de madeira no distrito florestal do Vale do Rio Doce/ MG. 1992. 105p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1992.
- MACHADO, C. C. **Elementos básicos do transporte florestal rodoviário**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2000. 167p.
- MACHADO, C.C.; LOPES, E.S.; BIRRO, M.H. **Elementos básicos do Transporte Florestal Rodoviário** 2.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009.167p.
- MACHADO, C.C; MACHADO, R. R.; PORTUGAL, C. R. Transporte Rodoviário Florestal. Eucaliptocultura no Brasil, SILVICULTURA, MANEJO E AMBIÊNCIA 2 ed, cap 19, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Machado-Cardoso-2/publication/313657753_Transporte_rodoviario_florestal/links/58a34819aca272d3a4960314/Transporte-rodoviario-florestal.pdf . Acesso em: 05 de agosto de 2021.
- MALINOVSKI, J.R.; CAMARGO, C.M.S.; MALINOVSKI, R.A. Sistemas. In: MACHADO, C.C. (Ed.). **Colheita Florestal**. 3 ed. Viçosa, MG, Ed. UFV, 2014. p. 178-205.
- MEIRA JUNIOR, M. S. D., PEREIRA, I. M., MACHADO, E. L. M., MOTA, S. D. L. L., RIBEIRO, P. S. S. D. P.; OTONI, T. J. O. Impacto do fogo em campo sujo no Parque Estadual do Biribiri, Minas Gerais, Brasil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, e00110814, 2017.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resenha Energética Brasileira. 2021. Edição de 09 de julho de 2021. Disponível em:< <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/ResenhaEnergéticaExercício2020final.pdf>>. Acesso em 09 de janeiro de 2022.

- MOREIRA, J. M. M. Á. P.; SIMIONI, F. J.; DE OLIVEIRA, E. B. Importância e desempenho das florestas plantadas no contexto do agronegócio brasileiro. **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 85-94, 2017.
- 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, Aylson Costa. Secagem de toras de eucalipto. 2015. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6848>>. Acesso em: 09 de fevereiro de 2022.
- PINHEIRO, M. A. Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal. 2013. 80p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2013.
- RICHARDSON, B. C. Sustainable transport: analysis frameworks. **Journal of Transport Geography**, v. 13, n. 1, p. 29-39, 2005.
- RODRIGUES, P. **Introdução aos sistemas de transporte no Brasil e à logística internacional** 4.ed. São Paulo: Aduaneiras, 2007.
- RUZZENENTI, F.; BASOSI, R. Evaluation of the energy efficiency evolution in the european road freight transport sector. **Energy Policy**, v. 37, n. 10, p. 4079-4085, 2009.
- SILVA, M. L.; OLIVEIRA, R. J.; VALVEREDE, S. R.; MACHADO, C. C.; PIRES, V. A. A. V. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos. **Revista Árvore**, v.31, n.6, p.1073-1079, 2007.
- SILVA, T. A. L. da. A apropriação capitalista da Silvicultura no Brasil e sua lógica de produção do espaço. *Terra Livre*, v. 1, n. 50, p. 159-199, 2018. Disponível em: <<http://agb.org.br/publicacoes/index.php/terralivre/article/view/1447/1387>>.
- SILVEIRA, G.M.; SIERRA, J. G. Eficiência energética de tratores agrícolas fabricados no Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.4, p.418-424, 2010.
- SILVERSIDES, C. R. Survey of trucks for raw material transport. *World Wood*, v.17, n.12, p.42-52, 1976.
- 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.
- ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F. Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. *Scientia Forestalis*, v. 41, n. 99, p. 353-360, 2013.