



RAFAEL MENALI OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO
FLORESTAL PARA O PLANEJAMENTO E CONTROLE DO
TRANSPORTE DE MADEIRA (FLoS)**

LAVRAS – MG

2021

RAFAEL MENALI OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO
FLORESTAL PARA O PLANEJAMENTO E CONTROLE DO
TRANSPORTE DE MADEIRA (FLoS)

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Planejamento e Otimização Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Lucas Rezende Gomide

Orientador

LAVRAS – MG

2021

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Oliveira, Rafael Menali.

Desenvolvimento de um sistema de otimização florestal para o planejamento e controle do transporte de madeira (FLoS) / Rafael Menali

Oliveira. - 2021.

57 p. : il.

Orientador(a): Lucas Rezende Gomide.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Transporte Florestal. 2. Planejamento Florestal. 3. Otimização.

RAFAEL MENALI OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO FLORESTAL PARA O
PLANEJAMENTO E CONTROLE DO TRANSPORTE DE MADEIRA (FLoS)

DEVELOPMENT OF A FOREST OPTIMIZATION SYSTEM FOR PLANNING AND
CONTROL OF WOOD TRANSPORT (FLoS)

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Planejamento e Otimização Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de abril de 2021

Prof. Dr. Lucas Rezende Gomide - UFLA

Profa. Dra. Carolina Souza Jarochinski e Silva - UFLA

Prof. Dr. Carlos Alberto Araújo Júnior - UFMG

LAVRAS – MG

2021

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de realizar graduação e pós-graduação de qualidade.

À FAPEMIG e CAPES, pelo apoio financeiro.

Ao Laboratório de Estudos e Pesquisa em Manejo Florestal (LEMAF), por proporcionar o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Florestal, pelos ensinamentos e boa convivência.

Ao professor Dr. Lucas Rezende Gomide pela orientação, correções e ensinamentos que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus familiares, pelo carinho e suporte.

Aos amigos de república e ao grupo dos Camisas 10, pelos momentos de descontração e laser.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

RESUMO

A logística de qualquer serviço apresenta desafios gerenciais clássicos como o dimensionamento de frota e a geração da ordem de serviço, redução de filas e aumento da eficiência veicular. O congestionamento de veículos no carregamento/descarregamento de madeira é um problema capital, pois o tempo de espera aumenta o custo do empreendimento e reduz eficiência do prestador de serviço ou do equipamento. Buscando melhorar o planejamento e escalonamento de atividades do ferramental logístico de um projeto florestal, foi desenvolvido um sistema de otimização florestal composto de heurísticas para o planejamento e controle do transporte de madeira. O sistema resolve um conjunto de problemas operacionais florestais para maximizar o desempenho dessas tarefas sob métodos heurísticos. Em essência, esses problemas estão associados ao sequenciamento de veículos de transporte, redução do tamanho de frota, custos e filas para carga/descarga. O sistema proposto é capaz de otimizar o tempo ocioso e reduzir os custos operacionais via roteamento de veículos com uma solução confiável. Os resultados do sistema desenvolvido atingem o ótimo global estabelecido por modelos matemáticos em todos os cenários e subproblemas testados. Após o processamento, o sistema fornece um cronograma de execução de atividades detalhado, abordando questões espaciais e temporais sem comprometer o abastecimento da fábrica. As análises complementares indicam que as guias são os equipamentos que causam a maioria do consumo de recursos e emissão de gases do efeito estufa. Concluímos que o sistema proposto pode ser usado como forma de suporte a tomada de decisão.

Palavras-chave: Transporte Florestal, Heurísticas, Planejamento Florestal, Roteamento de veículos.

ABSTRACT

The logistics of any service presents classic management challenges such as sizing the fleet and generating the service order, reducing queues and increasing vehicle efficiency. Vehicle jam in loading/unloading wood is a major problem, as waiting times increase the cost of the project and reduce the efficiency of the service provider or equipment. Seeking to improve the planning and scheduling of activities of the forestry logistics, we have developed a system of forest optimization for the planning and control of wood transport. The system solves a set of forest operational problems to maximize the performance of these tasks under heuristic methods. In essence, these problems are associated with the sequence of transport, reduction of the size fleet, costs and queues for loading/unloading. The proposed system is able to optimize downtime and reduce operating costs via vehicle routing with a reliable solution. The results of the developed system reach the global optimum established by mathematical models in all tested scenarios and subproblems. After processing, the system provides a detailed activity execution schedule, addressing spatial and temporal issues without compromising the factory supply. Complementary analyzes indicate that cranes are the equipment that causes the most consumption of resources and emission of greenhouse gases. We conclude that the proposed system is concise to solve transport problems and presents consistent solutions. Finally, the balance between the optimal solution and processing time is still a paradigm.

Keywords: Forest Transport, Heuristics, Forest Planning, Routing of vehicles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Planejamento florestal hierárquico.....	4
Figure 1. Flowchart of the framework system for solving the optimization problems.....	34
Figure 2. The simulated business case instances to solve the wood supply problem.....	36
Figure 3. Boxplot chart of optimization results from subproblems and instances.....	37
Figure 4. A complete graph solution designed to schedule.....	39
Figure 5. The operational efficiency and transport cost	40

LISTA DE TABELAS

Table 1. Notations and descriptions of índices.....	28
Table 2. Data set description.....	35
Table 3. Summary of the transportation system for Sp2.....	39
Table 4. Greenhouse gas emissions from all problems.....	41

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	1
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REFERÊNCIAL TEORICO	3
2.1. Planejamento florestal hierárquico	3
2.2. Transporte Florestal.....	6
2.3. Pesquisa Operacional.....	7
2.4. Teoria das Filas.....	Erro! Indicador não definido.
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	13
SEGUNDA PARTE	22
1. INTRODUCTION	24
2. METHODOLOGY	25
2.1. Problem description and mathematical models	25
2.2. The Forest logistic optimization system - FLoS.....	31
2.3. Business cases	33
2.4. Solution assement.....	34
3. RESULTS	35
4. DISCUSSION	39
5. CONCLUSION	42
REFERENCES	42

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO GERAL

No passado recente, as empresas concentram esforços para dimensionar e viabilizar a operação dos sistemas de produção. A preocupação principal, é cumprir o plano de ação alinhado as decisões de longo prazo (ANDRADE, 2007; ARENALES *et al.*, 2015). O processo implícito relacionado ao estabelecimento de diretrizes e metas é conhecido como planejamento, onde o objetivo é organizar os recursos necessários para a produção, minimizando os erros de execução e maximizando o nível de organização empresarial (CECATTO; BELFIORE, 2015). De acordo com a hierarquia de planejamento no setor florestal, o planejamento florestal possui características importantes para a produção, principalmente ligado ao controle do volume da produção (TUBINO, 2007; ANDRADE, 2007). Portanto, seus direcionamentos melhoram o desempenho das atividades ao elevar a qualidade do serviço realizado em empresas florestais, principalmente nas operações de colheita, transporte e silvicultura. No Brasil, o transporte de cargas é totalmente dependente do modal rodoviário, sendo responsável por 61,1% da carga total transportada (CNT, 2015). Então, não é adequado medir esforços para otimizar o transporte de madeira, que auxilia na manutenção do funcionamento das fábricas e influem diretamente no custo final de operação.

A logística de qualquer serviço apresenta desafios gerenciais clássicos como o dimensionamento de frota e a geração da ordem de serviço, redução de filas e aumento da eficiência veicular. Especificamente falando de filas, a sua formação impacta não somente o número de veículos de transporte, mas também ao número de carregadores florestais disponíveis no campo e às condições das estradas, fatores que afetam diretamente o desempenho dos veículos de transporte rodoviário florestal. Vale ainda ressaltar que gerenciar corretamente o transporte de madeira não é uma tarefa simples, e o uso de sistemas de otimização promovem ganhos na redução das jornadas de trabalho, redução de riscos de acidentes e congestionamentos, diminuição de impactos ambientais como a emissão de gases do efeito estufa e poluição sonora, bem como o custo final da operação (EPSTEIN *et al.*, 2007). O congestionamento de veículos no carregamento/descarregamento de madeira é um problema capital, pois o tempo de espera aumenta o custo do empreendimento e reduz eficiência do prestador de serviço ou do equipamento. O gestor de logística deve sempre prever esses eventos, a fim de garantir uma melhor qualidade na cadeia produtiva, em diversos níveis do empreendimento. Há evidência de que a atividade opera com viés de planejamento, quando o número de veículos à espera de atendimento é permanentemente

muito grande (ANDRADE, 1990). Exemplificando a magnitude dos problemas causados pelas filas, Alves *et al.* (2013) demonstram que, somente o tempo de espera por carregamento foi 7,1% do tempo total utilizado no transporte de madeira, isso demonstra um gargalo na operação. O autor ainda identifica que esse fenômeno é causado principalmente pelo não cumprimento da programação de saída de veículo da empresa. Essa constatação é coerente com as informações já citadas, sendo a grande motivação desse trabalho.

No Brasil, existem plantios florestais que estão alocados em áreas extensas que por sua vez podem se encontrar em áreas remotas e com condições climáticas e topográficas adversas. Tal fato, aumenta a necessidade de um planejamento do transporte preciso que atue para minimizar os custos operacionais (ARAÚJO JÚNIOR, 2017; ACUNA, 2017; FRANÇOIS *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2017). A melhoria dos aspectos operacionais citados pode ser associada a problemas de otimização do transporte, a maior parte desses problemas atua ou depende do roteamento de veículos (WANG, SHEU; 2019). Esses modelos exigem maior esforço computacional extra do que outros problemas clássicos da ciência florestal.

Os métodos de pesquisa operacional associados à tecnologia da informação possibilitam a utilização de sistemas de modelagem computacional (SOUSA JUNIOR *et al.*, 2016). Esses complexos problemas de otimização foram resolvidos por algoritmos heurísticos e metaheurísticos (OLIINYK *et al.*, 2019). Por exemplo, OZTEKIN *et al.* (2018) aplicaram o algoritmo genético para avaliar o transplante de órgãos humanos; ou MOAYEDI *et al.* (2020) prevendo a suscetibilidade ao fogo de áreas florestais usando sistemas fuzzy. Normalmente, os algoritmos metaheurísticos reduzem o esforço computacional e requerem menos tempo de processamento com alto desempenho da solução (DOKEROGLU *et al.*, 2019). Tem sido aplicado a problemas logísticos com respostas semelhantes (GROBA; SARTAL; VÁZQUEZ, 2018). Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um sistema composto de heurísticas para otimizar o transporte de madeira. Como resultado final, deseja-se criar um cronograma operacional com alto nível de detalhe, que permitirá a redução da ocorrência de fila nas atividades de carregamento e descarregamento de madeira. A principal abordagem para o problema atua com o intuito de: a) estabelecer o sequenciamento do transporte na coleta de madeira seguindo critérios espaciais para formação de blocos operacionais; b) minimizar o custo do transporte de madeira integrando modelos de otimização, rotas e reduzindo a ocorrência e extensão das filas.

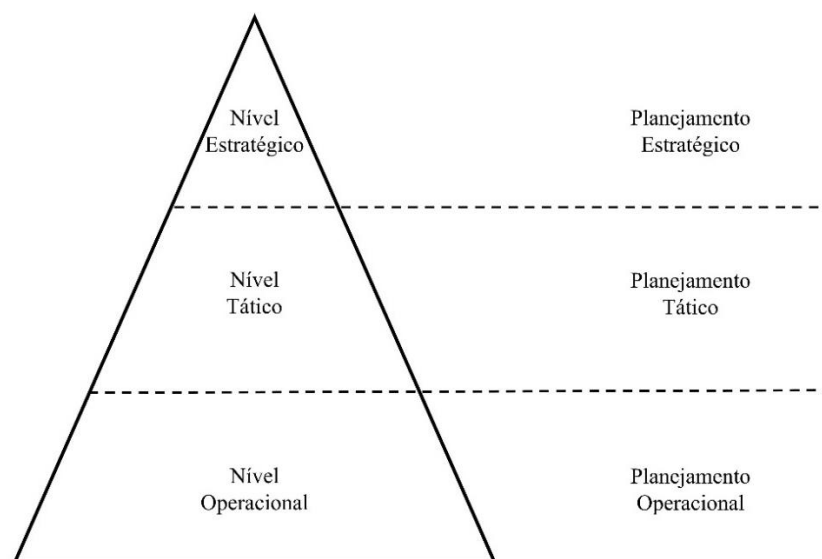
2. REFERÊNCIAL TEORICO

2.1. Planejamento florestal hierárquico

O planejamento florestal é uma subárea do manejo florestal que envolve as descrições específicas de atividades que devem ser realizadas visando atingir os objetivos que o proprietário deseja para sua área. Manejar a floresta sem o planejamento adequado, tomando decisões baseadas apenas em considerações de curto prazo, pode acarretar em consequências indesejáveis ou inesperadas. A partir desta comparação, abordando planejamento florestal são traçadas as estratégias para a execução das atividades, visando alcançar a situação desejada em um determinado período do tempo.

A partir do planejamento, as diferentes atividades dentro de uma empresa são organizadas, visando atingir as metas estratégicas. O planejamento tem como objetivo programar, gerenciar e otimizar as atividades e operações em coerência com o seu tempo de execução. As decisões em todos os níveis, em graus diferentes, podem ser auxiliadas por ferramentas computadorizadas (AUGUSTYNCZIK, 2014). Segundo Andersson (2005), tradicionalmente o planejamento florestal é dividido de forma hierárquica em níveis de planejamento, estratégico, tático e operacional (Figura 1). De acordo com a figura, existe uma cadeia de comando entre os tipos de planejamento. O nível superior delimita regras e metas que devem ser seguidas pelos níveis inferiores. A complexidade dos problemas de planejamento também aumenta quando deslocamos do nível estratégico para o nível operacional devido a aumento significativo de informações e operações.

Figura 1. Planejamento florestal hierárquico



Fonte: adaptado de ALMEIDA (1996)

O nível estratégico é realizado visando obter produção florestal sustentada no longo prazo, sendo o nível de planejamento com menor detalhe. O planejamento estratégico explora os diferentes cenários de produção, especificando o método de implementação dos plantios, políticas silviculturais e a colheita (KANTOLA; HARSTELA, 1994). O objetivo principal é racionar os recursos florestais necessários para viabilizar a produção desejada, as quais abordam grandes investimentos, tais como, aquisição de terras e a implantação de fábricas (WEINTRAUB, 1996). Este nível garante a continuidade de fornecimento de madeira dos plantios para a indústria, podendo maximizar o valor presente líquido obtido da exploração florestal. Essa política gerencial é embasada em informações da produção, bem como as variáveis externas a floresta, por exemplo, avanços tecnológicos e variações de preço.

O planejamento tático busca gerenciar operações que viabilizem a produção florestal, essa classe de planejamento aborda a otimização de construções que favorecem as operações futuras. Atividades como tratamentos silviculturais, construção de estradas e o plano de colheita de madeira são operações sob orientação do planejamento tático. Esse tipo de planejamento determina quais talhões devem ser cortados e como a madeira deve ser distribuída, para as fábricas e consumidores, visando maximizar os lucros. Neste nível são considerados os custos de colheita e transporte de madeira, sazonalidade do mercado e disponibilidade de equipamentos (ANDERSSON, 2005; REBOUÇAS, 2002).

O planejamento operacional visa solucionar e prever situações de estresse nas atividades, buscando estabelecer métodos operacionais alternativos que resultem na

otimização de atividades bem como ao atendimento das metas de produção, anteriormente estabelecidos de acordo com o planejamento hierárquico da empresa. As previsões de adversidades operacionais é uma característica essencial, identificando problemas e minimizando o seu custo e impacto na produção. As correções, desejavelmente são efetuadas a priori, modificando o plano operacional original e buscando a máxima eficiência do maquinário e mão-de-obra utilizados (DUVEMO & LAMAS, 2005). Esse nível, pode ser entendido em duas etapas. A superior, discute estratégias e metas de rendimento, e a inferior que remete ao planejamento das atividades e comando das operações, também conhecida como microplanejamento (OLIVEIRA, 2006; ASSUMPCÃO, 1996; WADOUSKI, 1987).

O aspecto operacional é necessário para agendar a alocação de recursos necessários para cada atividade (BOYLAND, 2003). Isto pode envolver o orçamento diário, semanal ou mensal, ou até projetos específicos de logística. Assim como os planos táticos, os planos operacionais incluem informações espaciais explícitas (BETTINGER *et al.*, 2009), como por exemplo, a sequência dos projetos a serem colhidos para o período. A seleção de projetos a serem orçados (orçamento físico anual) para colheita, transporte e silvicultura, obedecendo a uma sequência de corte que contemple os projetos para o período chuvoso, bem como atender as possíveis demandas de consumo adicionais da fábrica no período, e regular o estoque de madeira pronta para transporte (WERNEBURG, 2015).

A partir do exposto, o planejamento operacional parte de uma visão geral do empreendimento florestal, objetiva salientar todos os aspectos operacionais, definindo uma estratégia de atuação. O detalhamento pode ser a um nível alto de caracterização, descrevendo em estrutura fiel da floresta. Abordando de forma específica os talhões, as áreas declivosas de difícil operação e incluindo vias de transporte de madeira. O detalhamento da operação ainda considera a alocação de equipamento e mão de obra na forma de planos de trabalho e cronogramas (GUIMARÃES, 2004). A grande potencialidade do planejamento operacional tange um maior domínio da produção, evitando adversidades causadoras de falhas na programação do planejamento estratégico e tático (OLIVEIRA, 2006). Atualmente, o transporte de madeira é amplamente abordado em diversos trabalhos que tratam do planejamento operacional, como os de Silva e Caixeta Filho (2015), Coelho *et al.* (2016), SOSA *et al.* (2015) e Atashbar, Labadie e Prins (2016). Demonstrando a crescente importância desta atividade, bem como seu gerenciamento no setor florestal.

2.2. Transporte Florestal

No Brasil, devido à dimensão continental e diversa dos ambientes, o transporte pode ser realizado por diversos meios (ferroviário, fluvial, rodoviário), dando destaque ao rodoviário que representa 85% de todo produto florestal transportado e, ainda, abrangendo 62% de todos os produtos transportados no país (VENCOVSKY, 2005). Mesmo com as condições precárias de trafegabilidade em que se encontram muitas estradas brasileiras, esse é o meio predominantemente usado para interligar as indústrias às suas fontes de abastecimento de madeira (STEIN *et al.*, 2001). No aspecto geral, Tahvanainen e Antila (2011) concluem que os modais ferroviário e fluvial são dependentes do modal rodoviário, em referência a interligação de indústrias e áreas de plantios até o terminal de recarga.

De forma geral, o transporte de madeira é composto por duas etapas básicas. A primeira etapa consiste no deslocamento da madeira dentro dos talhões na floresta até uma área de fácil acesso aos caminhões, essa atividade é responsabilidade da colheita florestal podendo ser denominada baldeio ou remoção. Na segunda etapa, é realizado o transporte da madeira dessas áreas de fácil acesso até as fábricas (SEIXAS; CAMILO, 2008). Na segunda etapa, quando se faz uso do transporte rodoviário, os caminhões são carregados por guias e deslocam até ao pátio ou entreposto para o descarregamento da madeira. Com relação aos custos, segundo Dario (2012), pode-se citar três custos operacionais mais expressivos no transporte rodoviário: manutenção dos veículos, custos com pneus e combustíveis.

Devido às inúmeras variáveis existentes no transporte de madeira, grande parte da roteirização convencional é feita de forma empírica, isso dificulta a obtenção de cenários otimizados, sendo a Pesquisa Operacional uma opção para modelagem matemática destas variáveis. Segundo Karsu e Morton (2015), a pesquisa operacional é bem difundida como técnica de otimização no planejamento de operações, com grande poder de aplicação em problemas práticos e reais, tanto na área pública como privado. No entanto, com a utilização dos métodos propostos pela Programação Linear, é possível realizar um prognóstico que poderá amparar futuras decisões quanto ao melhor trajeto a ser percorrido, melhor tipo de veículo a ser utilizado, melhor dimensionamento de cargas, além das possíveis otimizações de tempo e reduções de custos pertinentes aos processos. Dada à importância da operação de transporte nos custos logísticos e o nível de serviço de uma organização, é relevante estudar a aplicação de técnicas simples e eficazes da pesquisa operacional, a fim de buscar um melhor desempenho operacional e gerar uma vantagem estratégica competitiva, além de se quantificar as operações e dimensionar o impacto financeiro (custo) da mesma (OLIVEIRA *et*

al., 2013). A preocupação com o transporte de produtos é uma parte do processo, sendo formada por uma série de agentes interligados, que compõe a logística. Esse termo é atribuído ao aspecto macro dessa atividade, sendo cada vez mais frequente para quem atua no agronegócio e no segmento florestal. A preocupação maior se dá com a redução dos custos para manter os níveis de logística ideal dentro de cada empresa (FILHO, 2014).

2.3. Pesquisa Operacional

A Pesquisa Operacional somente passou a ser tratada organizadamente como disciplina ou área de conhecimento após a segunda guerra mundial, porém, problemas em sua área de abrangência existiram muito antes de tal fato (RAVINDRAN *et al.*, 1987). De acordo com Silva *et al.* (1998), a pesquisa operacional nasceu quando cientistas das mais diversas áreas realizaram estudos para solucionar problemas militares. Devido ao sucesso desses pesquisadores, as metodologias desenvolvidas foram transferidas para empresas que enfrentavam problemas de planejamento, principalmente alavancado pelo crescimento econômico do período pós-guerra. Nos territórios onde a abordagem prevaleceu, a pesquisa operacional se desenvolveu sob o nome de Ciência da Gestão ou Ciência da Decisão, em que predominou a ênfase nas aplicações na Engenharia Industrial ou Engenharia de Produção (ANDRADE *et al.*, 1998; SIMÃO, 2020). Andrade (2000), afirma que tal ciência despertou o interesse do mundo acadêmico e empresarial sobre a área. Expandindo a procura do uso de técnicas criadas em problemas de administração. Atualmente, a pesquisa operacional é usada praticamente em todas as especialidades. Fato esse reescrito por Moreira (2007), que descreve que problemas que visam à condução e gestão de determinadas operações em uma organização é tratado como pesquisa operacional, e que o seu campo possui ampla aplicabilidade em diversas áreas, como indústria, transportes, telecomunicações, finanças, saúde, serviços públicos, operações militares.

Silva *et al.* (1998) descreve pesquisa operacional como um método de representação de um problema complexo de forma organizada por meio de um modelo matemático. No mesmo raciocínio, Arenales *et al.* (2007) citam a ciência como uma abordagem científica para tomada de decisões, que procura determinar como melhor operar, projetar um sistema usualmente sob condições que requerem alocação de recursos escassos. Programação linear é um modelo baseado em equações lineares e que busca a melhor alocação possível para os recursos escassos, entre as inúmeras tarefas ou atividades para obter um valor ótimo do objetivo desejado que geralmente refere-se à lucratividade ou redução dos custos

(ANDRADE, 2015). Muitos problemas de administração e economia tratam da alocação de recursos limitados tendo em vista maximizar algum índice de desempenho ou minimizar alguma medida de custo. As técnicas matemáticas para planejar tais alocações constituem a programação matemática.

Um modelo de programação linear tem objetivo de maximizar ou minimizar uma função objetivo, atendendo a um conjunto de restrições, sendo elas inequações ou equações. Em que a função objetivo é expressa através de uma função linear na forma aditiva. É necessário também que se definam quais as atividades consomem recursos e em que proporções os mesmos são consumidos. Essas informações são apresentadas em forma de equações e inequações lineares, uma para cada recurso, o conjunto dessas equações e/ou inequações, denomina-se restrições do modelo (LEUSCHNER, 1990). Normalmente, existem inúmeras maneiras de distribuir os recursos escassos entre as diversas atividades em estudo, afim de suprir esses requisitos é necessário que as restrições do modelo sejam coerentes com a realidade do problema. No entanto, o que se busca, num problema programação linear é o valor da função objetivo. A essa solução dá-se o nome de solução ótima. Assim, a programação linear se incumbe de achar a solução ótima de um problema, uma vez definido o modelo linear, ou seja, a função objetivo e as restrições (HILL; COSTA, 2015).

A programação linear tem uma vertente que trabalha apenas com valores inteiros e/ou binários, é a chamada programação linear inteira, contudo essa também apresenta suas variações. Quando todas as variáveis estão sujeitas à condição de integralidade, estamos diante de um problema de programação linear inteira pura, e se apenas algumas o estão, se trata de um problema de programação linear inteira mista (ALVES; DELGADO, 1997). A programação linear inteira surgiu com objetivo de sanar incoerências da programação linear, quando na resolução dos problemas havia a necessidade de uso de variáveis inteiras. O nível de dificuldade para resolução de problemas de programação linear inteira difere à resolução de problemas com o método anterior, porém problemas de programação linear possuem um espaço infinito de soluções e problemas de programação linear inteira possuem um espaço finito de soluções, o que implica na sua maior dificuldade de solução (COLIN, 2007). Segundo Hillier e Lieberman (1988), a ideia mais simples para resolver um problema desse tipo seria enumerar todos esses pontos e escolher a melhor solução entre esses pontos. Entretanto, na realidade o número de pontos é extremamente alto, para qual seria necessário muito tempo para o processamento. Logo, para a resolução de problemas dessa natureza, segue métodos como *branch-and-bound* e relaxação lagrangeana, por exemplo. Entretanto, o

algoritmo *branch-and-bound* é o mais utilizado (GOMIDE, 2009), mas que vem sendo substituído por outros mais eficientes como *branch-and-price*.

O algoritmo *branch-and-bound* é um método de resolução de problemas que garante o ótimo da solução encontrada. Esse método utiliza da geração de uma árvore de nós que representam subproblemas do problema principal (NEMHAUSER *et al.*, 1989). Consiste em uma enumeração sistemática de todos os candidatos a solução, através da qual os subconjuntos de candidatos inviáveis são descartados, utilizando os limites superior e inferior da quantia otimizada, ou seja, otimizar subconjuntos considerando o resultado total ao invés de tratar integralmente do conjunto total de soluções. O método é composto por duas operações básicas, *Branching* e *Bounding*. *Branching* divide o problema principal em subproblemas, eliminando soluções inviáveis. *Bounding* elimina as soluções de baixa qualidade através de comparações com soluções de outros subproblemas e limitantes (limite superior e inferior). Essas operações são dependentes das restrições do modelo e da finalidade do problema, sendo ele de maximização ou minimização, os critérios adjacentes aos processos são estabelecidos previamente.

Inicialmente as heurísticas e metaheurísticas são método de resolução de problemas de otimização combinatória alternativos a programação linear. Este método apresenta vantagens e desvantagens, o principal ponto positivo é usar menor esforço computacional para a resolução de problemas, porém o caráter aproximativo do método não garante a otimalidade da solução (GOLDBARG; LUNA, 2000). Ainda assim, podemos definir heurística como qualquer técnica de resolução desenvolvida para resolver especificamente um problema e, por sua vez, metaheurística pode ser aplicada a vários problemas, dado caráter interdisciplinar baseado no conhecimento específico (VIANA, 1998). De forma geral, metaheurísticas são uma ótima alternativa ao uso de métodos determinísticos quando os problemas possuem alta complexidade e exigem grande esforço computacional.

Existem uma enormidade de algoritmos heurísticos desenvolvidos nos últimos anos, podemos citar o algoritmo genético (HOLLAND, 1975) e *simulated annealing* (SA) (KIRKPATRICK *et al.* 1983), como os mais utilizados na área florestal. Fato esse é fruto da simplicidade do algoritmo bem como sua alta aplicabilidade aos problemas do setor. O algoritmo SA funciona com uma analogia a termodinâmica do recozimento de metais, o processo é iniciado com uma solução completamente aleatória ao problema e inicia-se o processo de refinamento. Um dos principais componentes desse algoritmo é a busca da solução vizinha, função que atua perturbando a solução corrente do problema buscando

encontrar soluções melhores na proximidade do espaço de busca. Quando uma solução candidata possui qualidade superior a solução corrente, o algoritmo descarta a solução corrente e assume a solução candidata como corrente. A cada interação que o algoritmo realiza a temperatura do sistema diminui (resfriamento) e quando a temperatura do sistema chega à temperatura ambiente o processamento é interrompido. Vários trabalhos utilizam temperaturas altas para o sistema buscando aumentar o número de interações que o SA pode executar. Um mecanismo que trabalha com essa configuração corre um alto risco de ficar preso em um ótimo, contudo, o SA possui um mecanismo para evitar esse problema. O critério de metrópoles calcula a probabilidade de uma solução ser promissora, ou seja, gerar uma solução ótima a partir do seu refino. Caso o critério seja favorável, é possível que o algoritmo aceite uma solução candidata com pior qualidade que a corrente. Todavia, o critério de metrópoles é baseado na temperatura atual do sistema e permite uma alta taxa de troca somente quando a temperatura é demasiadamente alta. De forma geral, com a progressão do processamento as trocas viabilizadas pelo critério de metrópoles ficam cada vez mais raras até que a troca de soluções só ocorre quando a candidata possui melhor qualidade que a corrente. Ainda sobre o SA, podemos citar inúmeros trabalhos que atuam com o método para a busca de soluções, a simplicidade e eficiência do método pode ser observada nos trabalhos de Zang (2018) que utiliza o algoritmo para melhorar a eficiência de um sistema híbrido de energia solar, ATTIYA *et al.* (2020) que usa o método para criar cronogramas de operação e definição estratégica para a execução de atividades e Cunha e Marques (2020) apresentam uma versão híbrida do SA aplicado a distribuição de água em grandes centros metropolitanos.

2.4. Roteamento veicular

Dada à importância da operação de transporte nos custos logísticos e o nível de serviço de uma organização, é relevante estudar a aplicação de técnicas de pesquisa operacional, a fim de buscar um melhor desempenho operacional e promover vantagens estratégicas e competitivas, permitindo ainda dimensionar o impacto financeiro e a busca por inovações. A otimização desse tipo de atividade, chamado de problemas de roteamento veicular têm sido amplamente estudadas nos últimos anos (BARBOZA *et al.*, 2015; ALVAREZ; MUNARI, 2016; BRASILEIRO, 2017). Cunha (2000), aponta que o problema de roteamento de veículos consiste na definição de rotas customizadas para cada situação estudada, assegurando-se que cada ponto seja visitado somente uma vez, a demanda da rota não seja maior que a capacidade do veículo transportador, e que ao final da rota o veículo retorne ao local de origem. As decisões estratégicas normalmente possuem impacto sobre todo o sistema e um efeito

duradouro. É interessante ressaltar que decisões estratégicas errôneas produzirão serias dificuldades para futura operação e otimização do sistema.

Um sistema de roteamento pode ser considerado como um conjunto organizado de meios, que objetivam o atendimento de demanda localizada nos arcos ou nos vértices de alguma rede (BODIN *et al.*, 1983). O autor ainda afirma que o objetivo maior da logística é fazer chegar provisões e/ou serviços a pontos de consumo, a partir de pontos de suprimento. Um sistema logístico completo deve incluir cuidados desde a obtenção até a distribuição de produtos sobre a rede demandada. O problema do caixeiro viajante é um dos mais tradicionais e conhecidos problemas de programação matemática (MELAMED, 1990; CAMPELLO, MACULAN, 1994). Esse problema busca percorrer todos os pontos de demanda a partir de um ponto de oferta pelo menor caminho possível. Os problemas de roteamento lidam sua maior parte com deslocamentos entre os pontos de demanda ou oferta. Esses pontos podem ser representados por cidades, postos de trabalho ou atendimento, depósitos etc. A importância atual do problema do caixeiro viajante é devido a sua grande aplicação prática (BELLMORE, NEMHAUSER, 1968; REINELT, 1994). O mesmo apresenta uma enorme relação com outros modelos segundo Cunha (2000). Contudo, um grande esforço computacional é exigido o que dificulta a busca de solução exata (PAPADIMITRIO *et al.*, 1989), devido ao maior tempo de processamento demandado pelo computador.

Originalmente foi proposto por Dantzig e Ramser em 1959, com o nome de *Truck Dispatching Problem*, o problema do caixeiro viajante. Clarke e Wright (1964) encontraram melhores soluções para este problema, baseando-se na troca de conjuntos de rotas em cada ponto de chegada, com a intenção de melhorar o desempenho global, uma vez que admite a minimização da frota e da distância percorrida. Esses resultados confirmaram que o campo de desenvolvimento de algoritmos de resolução para o roteamento veicular estava em expansão. Com o surgimento de cenários mais complexos, há busca por outros métodos de resolução mais eficientes, como nos trabalhos de Stepanov e Smith (2009) e Subramanian *et al.* (2013), cujos autores utilizam algoritmo híbrido e roteamento multiobjectivo para definir as melhores rotas para veículos em uma rede de transporte, evidenciando a necessidade de algoritmos mais robustos para determinadas situações. Segundo Reina (2012), a principal forma de avaliar os métodos de resolução do problema é através da comparação de resultados obtidos, aplicados a uma base de dados comum.

A fila é o fenômeno que ocorre quando determinado serviço que é oferecido não é capaz de atender a demanda momentaneamente, então o requerente ou usuário precisa esperar

até que o serviço seja disponibilizado (PRADO, 2017; CAMELO et al., 2010). Perdoná *et al.* (2017) afirma que a teoria das filas foi inicialmente motivada em sistemas de telefonia, onde existia espera demasiada para que central telefônica atender o usuário e estabelecer a conexão telefônica entre os usuários. A fila é reconhecida como um fenômeno que prejudica o andamento dos sistemas de produção, podendo ser depreciativo na qualidade do tráfego de veículos, atendimento em agências bancárias e supermercado (GROSS et al., 2008).

Inserida no campo da pesquisa operacional, a teoria das filas é um processo analítico que usa técnicas de modelagem e matemática aplicada para fazer inferências sobre a formação e impacto das filas de espera (PERDONÁ et al. 2017). Uma avaliação quantitativa de filas requer a caracterização dos processos que compõe o sistema, de acordo com Gross et al. (2008), a maioria dos sistemas são compostos de seis características básicas: padrão de chegada dos clientes, padrão de atendimento disponível, quantidade de atendimento disponível, capacidade do sistema, tipo de fila e estágios do serviço. Para o transporte de madeira, podemos identificar o padrão de chegada dos clientes como a chegada dos caminhões para as guas de carregamento. O padrão do tipo de atendimento e quantidade disponível remete a como as guas trabalham e se distribuem nos talhões para o carregamento de madeira. A capacidade do sistema seria a quantidade máxima de veículos que podem estar em fila esperando pelo atendimento das guas e o tipo de fila determina como é feita a espera por atendimento. O estágio de serviço não se aplica ao transporte de madeira, visto que as guas somente oferecem o serviço de carregamento e esse fator é configurado quando existe vários serviços prestados.

Uma das principais dificuldades ao otimizar a fila de operação é a determinação da chegada dos clientes, quando esse processo é estocástico ainda é necessário utilizar funções de probabilidade para estimar a frequência que os clientes chegam (GROSS et al., 2008). No transporte de madeira é possível determinar o padrão de chegadas dos veículos com o uso do roteamento veicular, assim como as guas disponíveis, que podem ser determinadas de acordo com a frota da empresa florestal. Uma possibilidade clara para a redução de filas nas atividades de carregamento e descarregamento é a organização temporal das rotas de forma que o caminhão chegue até a grua exatamente quando ela está disponível para o carregamento. Esse tipo de abordagem, remete a um dos conceitos de *Just in time*, onde a produto deve ser finalizado exatamente quando existe uma demanda para o consumo (CARVALHO, 2017; SLACK et al., 2009).

De forma geral, *Just in time* possui uma enormidade de outros conceitos que podem ser aplicados ao transporte florestal. Contudo, usando uma abstração básica, relacionando a disponibilidade da grua com a disponibilidade de um produto ou serviço é possível afirmar que esse conceito isoladamente pode ser usado na otimização do transporte de madeira.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor de florestas plantadas no Brasil é um dos mais competitivos a nível mundial, contribuindo significativamente no cenário socioeconômico do País. Os bens e serviços produzidos agregam valor, tanto na geração de empregos, como nas rendas e tributos, para a promoção do desenvolvimento sustentável. Porém, a manutenção de seu crescimento e sua competitividade, por mais lucrativa que seja, requer a superação de desafios, como o abastecimento contínuo de madeira na fábrica. Diante disso, torna-se importante fortalecer a visão e a ação conjunta do setor, numa perspectiva de curto, médio e longo prazo.

O planejamento florestal é um processo complexo, que necessita de conhecimento pelo planejador das inúmeras variáveis, restrições e premissas no momento do estabelecimento dos planos multianuais. Estes devem ser integrados, devendo obedecer a uma hierarquia em função do nível de abordagem e objetivo, envolvendo maior especificidade e menor tempo à medida que o planejamento caminha do estratégico para o operacional. Este conhecimento engloba desde a formação de floresta, colheita e entrega de madeira, impactos no processo fabril e obtenção do produto celulose. Por isso, faz-se justificável o desenvolvimento de modelos de auxílio à tomada de decisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUNA, M.. **Timber and biomass transport optimization: A review of planning issues, solution techniques and decision support tools**. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, v. 38, n. 2, p. 279-290, 2017.

ALMEIDA, A. R. C.; **Método de custeio baseado em atividades no setor florestal** Curitiba, Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

ALVAREZ, A.; MUNARI, P.; **Metaheuristic approaches for the vehicle routing problem with time windows and multiple deliverymen**. Gest. Prod., São Carlos , 2016. v. 23, n. 2, p. 279-293.

ALVES, R. T., FIEDLER, N. C., SILVA, E. N. D., LOPES, E. D. S., CARMO, F. C. D. A. D.. **Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares.** Revista *Árvore*, v. 37, n. 5, p. 897-904, 2013.

ALVES, R.; DELGADO, C **Programação linear inteira.** Cicada do Porto: Faculdade de Economia da Universidade do Porto, 1997. 19p.

ANDERSSON, D. **Approaches to Integrated Strategic/Tactical Forest Planning.** Licentiate thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Umea, 2005. 14 p.

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional.** Rio de Janeiro: LTC, 1998.

ANDRADE, E. L. **Introdução a pesquisa operacional: Métodos e modelos para análise de decisões.** 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

ANDRADE, E. L. **Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para a Análise de Decisão – 2ª edição –** Rio de Janeiro: LTC, 2000. 130 – 149 p.

ANDRADE, E. L. **Introdução à Pesquisa Operacional: métodos e modelos para análise de decisões.** 3ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

ANDRADE, J. H. **Planejamento e Controle da Produção na pequena empresa: Estudo de Caso de fatores intervenientes no desempenho de um empreendimento metalúrgico da cidade de São Carlos-SP.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos/São Paulo, 2007.

ANDRADE, W. J.; ROCHA, L. M. **Planejamento, implantação e manutenção de trilhas.** In: Congresso Florestal Brasileiro. 1990. p. 786-794.

ARENALES, M. ARMETANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2007 19 p.

ARENALES, M. ARMETANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia.** Elsevier Brasil, 2015.

ASSUMPÇÃO, J. F. P.; **Gerenciamento de empreendimentos da construção civil: modelo para planejamento estratégico da produção de edifícios.** São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1996. 207 p. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil).

ATASHBAR, N. Z.; LABADIE, N.; PRINS, C. **Modeling and optimization of biomass supply chains: A review and a critical look.** IFAC-PapersOnLine, v. 49, n. 12, p. 604-615, 2016.

ATTIYA, I.; ABD ELAZIZ, M.; XIONG, S.. **Job scheduling in cloud computing using a modified harris hawks optimization and simulated annealing algorithm.** Computational intelligence and neuroscience, v. 2020, 2020.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; **Planejamento florestal otimizado considerando áreas mínimas e máximas operacionais de colheita.** 2014. 104 p.

BARBOZA, F. L. M.; FURLAN, A. A.; DE ANDRADE MOURA, D. **Análise e modelagem matemática aplicada ao roteamento veicular em atividade turística na cidade de São Paulo.** Exacta, v. 13, n. 3, p. 403-416, 2015.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

BELLMORE, M.; NEMHAUSER G. L. **The traveling salesman problem:** a survey; Operations Research; 1968; 538-558 p.

BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest Management and Planning.** Academic Press, 2009, 342 p.

BODIN, L., GOLDEN, B., ASSAD, A. and BALL, M. **Routing and Scheduling of vehicle sandcrews:** the state of the art. England: Pergamon Press, vol. 10. n. 2, 1983 24 p. (Special Issue).

BOYLAND, M.; **Hierarchy Planning in Forestry.** ATLAS/SIMFOR Project. Technical Report, 2003. 7 p.

BRASILEIRO, Í.; SOARES, A.; JÚNIOR, J. V.; **Algoritmo de roteamento com balanceamento de carga adaptado a redes ópticas elásticas.** Revista Brasileira de Computação Aplicada, 2017. v. 9, n. 1, p. 97-106.

CAMELO, G. R., COELHO, A. S., BORGES, R. M., & DE SOUZA, R. M.. **Teoria das filas e da simulação aplicada ao embarque de minério de ferro e manganês no terminal marítimo de ponta da madeira.** Cadernos do IME-Série Estatística, 29(2), 1, 2010.

CAMELO, G. R., COELHO, A. S., BORGES, R. M., SOUZA, R. M. **Teoria das filas e da simulação aplicada ao embarque de minério de ferro e manganês no terminal marítimo de ponta da madeira.** Cadernos do IME – Série Estatística . (2010)., 29, 01-16.

CAMPELLO, R. E; MACULAN, N. **Algoritmos e Heurísticas** - Desenvolvimento e avaliação de performace. Niterói, RJ: Editora da Universidade Federal Fluminense, 1994. 23 p.

CARVALHO, André Simplício. **A técnica logística no toyotismo: uma aproximação geográfica do just-in-time**. GEOUSP Espaço e Tempo (Online), v. 21, n. 1, p. 32-47, 2017.

CECATTO, C.; BELFIORE, P. **O uso de métodos de previsão de demanda nas indústrias alimentícias brasileiras**. Revista Gestão da Produção, São Carlos, v. 22, n. 2, p. 404-418, 2015.

CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. **Scheduling of vehicle from a central depot to a number of delivery points**. Operations Research, Cotonsville, 1964. v.12, 568-581 p.

COELHO, R. M. **Avaliação econômica do uso da madeira de eucalipto para diferentes finalidades, na região do Alto Jequitinhonha, MG**. FLORESTA, v. 46, n. 2, p. 155-164, 2016.

COLIN, E. **Pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 256 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Boletim Estatístico - CNT - Julho 2015**. CNT: SEST: SENAT. Brasília, DF.

CUNHA, C.B. **Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais**; Revista Transportes da ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2000. v.8, n.2, 51-74 p.

CUNHA, M.; MARQUES, J. **A new multiobjective simulated annealing algorithm—MOSA-GR: Application to the optimal design of water distribution networks**. **Water Resources Research**, v. 56, n. 3, p. e2019WR025852, 2020.

DANTZIG, G. B; RAMSER, J. H. **The truck dispatching problem**. Management Science, New York, v.6, n.1, pp. 80-91, 1959.

DARIO, M. **Práticas, indicadores e custos na gestão de pneus: estudo em uma empresa de transportes**. Dissertação de Mestrado Profissional em Administração, Faculdade de Gestão e Negócios, Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, 2012. p. 02.

DOKEROGLU, T.,. **A survey on new generation metaheuristic algorithms**. **Computers & Industrial Engineering**, v. 137, p. 106040, 2019.

- DUVEMO, K.; LAMAS. T.; **The influence of forest data quality on planning processes in forestry**. Scandinavian Journal of Forest Research 2005, 21:4, 327-339 p.
- EPSTEIN, R.; RONNQVIST, M.; WEINTRAUB, A.; Forest transportation (Chapter 20). Editor(s): WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJORNDAL, T.; EPSTEIN, R.; MIRANDA, J. **Handbook of operations research in nature resourcers**. Springer, 2007. 1 ed, 611 p.
- FILHO, J. V. C., Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, **Sessão Temática sobre Logística Florestal do ABTCP**, 2014. 2 p.
- FRANÇOIS, J. et al. **A tactical planning model for collaborative timber transport**. IFAC-PapersOnLine, v. 50, n. 1, p. 11713-11718, 2017.
- GOLDBARG, M.C.; LUNA, H.P. **Otimização combinatorial e programação linear: modelos e algoritmos - 7ª edição** – Rio de Janeiro: Elsevier, 2000. 29 p.
- GOMIDE, L.R. **Planejamento Espacial Florestal**. Curitiba, Brasil, 2009. 104 p. (Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná)
- GROBA, C.; SARTAL, A.; VÁZQUEZ, X. H. **Integrating forecasting in metaheuristic methods to solve dynamic routing problems**: Evidence from the logistic processes of tuna vessels. Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 76, p. 55-66, 2018.
- GROSS, D. SHORTLE, J. F. THOMPSON, J. M. HARRIS, C. M. Fundamentals of Queueing Theory. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- GUIMARÃES, H. S. **A logística como fator decisivo das operações de colheita e transporte florestal**. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 13, 2004. Curitiba: UFPR, 2004.
- HILL, M. M.; COSTA M. M. S. B.; **Investigação Operacional**; Vol. 1; Programação Linear; 3ª Edição; Lisboa, 2015. 27 p.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J.; **Introdução à Pesquisa Operacional**; Ed. Campus e Ed. da Universidade de São Paulo. São Paulo, 3ª Edição; 1988. 97 p.
- Holland, J. H. (1975). **Adaptation in natural and artificial systems**. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press
- KAMPICHLER, C.; PLATEN, R.. **Ground beetle occurrence and moor degradation: modelling a bioindication system by automated decision-tree induction and fuzzy logic**. Ecological Indicators, v. 4, n. 2, p. 99-109, 2004.

KANTOLA, M.; HARSTELA, P.; **Manual de tecnologia apropriadas as operações florestais em países em desenvolvimento** – Parte 2. Programa de Treinamento Florestal Publicação N° 9 Direção Nacional de Educação Vocacional do Governo da Finlândia. Helsinki, 1994, 202 p.

KARSU, Ö.; MORTON, A. **Inequity averse optimisation in operational research.** European Journal of Operational Research. 2015.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. **Optimization by simulated annealing.** science, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 1983.

LEUSCHNER, W. **Forest Regulation, Harvest Scheduling, and Planning Techniques.** New York. Wiley Interscience, 1990. p.204.

MELAMED, I. I., S. I. SEERGEV.; **The traveling Salesman problem.** Plenum Publishing Corporation, 1990. 97 p.

MOAYEDI, Hossein et al. **Fuzzy-metaheuristic ensembles for spatial assessment of forest fire susceptibility.** Journal of environmental management, v. 260, p. 109867, 2020.

MOREIRA, D. A. **Pesquisa operacional:** curso introdutório. São Paulo: Thomson Learning, 2007, 356 p.

NEMHAUSER, G.L.; RINNOY KAN, A.H.G.; TODD, M.J.; **Handbook in Operations Research and Management Science.** North-Holland, 1989. Vol. 1, 498-506 p.

OLIINYK, A. **Combinatorial optimization problems solving based on evolutionary approach.** In: 2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM). IEEE, 2019. p. 41-45.

OLIVEIRA, D.P.R. de.; **Planejamento estratégico:** conceitos, metodologia e práticas. 22. Ed. São Paulo: Atlas, 2006. 267p.

OLIVEIRA, I. H. I.; FAVA, F. L. M.; CASTORANI, R. R.; RODRIGUES, L. L. F.; FERNANDES, M. E.; **Utilização da pesquisa operacional para otimização de rotas de um motorista autonomo na região de São Paulo.** Guarulhos: FATEC Guarulhos, XII SEGeT, 2013. 13 p.

OZTEKIN, Asil et al. **A decision analytic approach to predicting quality of life for lung transplant recipients:** A hybrid genetic algorithms-based methodology. European Journal of Operational Research, v. 266, n. 2, p. 639-651, 2018.

PAPADIMITRIO, CHISTIOPS H., STEIGHT , KENNETH; **Combination optimization algorithms and complexity**, Prentice hall, inc 1982. 23 p.

PERDONÁ, I. I.; NUNES, R. V.; DAS NEVES, R. M., NAIMER, S. C.; GODOY, L. P. **Sistema de manufatura: otimização de processos em uma unidade fabril de cimento através da teoria das filas**. *Exacta*, v. 15, n. 4, p. 13-25, 2017.

PRADO, D. . Falconi Editora, 2017.

RAVINDRAM, A., PHILLIPS, D.T. & SOLDBERG, J.J.; **Operations Research, Principles and Practice**, 2nd Ed., 1987, New York: John Wiley. 74 p.

REBOUÇAS, D. P. O.; **Planejamento estratégico – conceitos, metodologia e práticas**. 18. Ed. São Paulo: Atlas, 2002. 62 p.

REINA, C. D. **Roteirização de veículos com janelas de tempo utilizando algoritmo genético**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2012. 63 p.

REINELT, G.; **The traveling Salesman: Computational Solutions for TSP Applications**, volume 840 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Verlag, Berlin, Germany 1994. 199 p.

SEIXAS. F.; CAMILO. D. **Colheita e Transporte Florestal – ESALQ – USP – Piracicaba**, 2008.

SILVA, E. M.; SILVA, E. M.; GONÇALVES, V.; MUROLO, A. C. **Pesquisa Operacional: programação linear**. 3 Ed. São Paulo: Atlas, 1998. 13 p.

SIMÃO, Valdemar Ambrósio. **O uso da Pesquisa Operacional como instrumento fundamental para maximização do rendimento financeiro**. *Revista Internacional de Ciências, Tecnologia e Sociedade*, v. 3, n. 2, p. 97-113, 2020.

SLACK, N. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas, 2009.

SOSA, A. **Managing the moisture content of wood biomass for the optimisation of Ireland's transport supply strategy to bioenergy markets and competing industries**. *Energy*, v. 86, p. 354-368, 2015.

SOUSA JUNIOR, E. A.; FERREIRA, E. J. D.; PAULA, P. P.; OLIVEIRA, P. N. R.; SOUZA, S. G. P. **Aplicação da técnica de programação linear na busca da solução ótima de produção em uma pizzaria**. In: Anais do XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de

Produção: Contribuições da Engenharia de Produção para Melhores Práticas de Gestão e Modernização do Brasil. Anais... João Pessoa (PB): Outubro, 2016.

STEIN, F. R.; RODRIGUES, L. A.; SCHETTINO, S. **Sistema de transporte rodoviário da Celulose Nipo Brasileira – CENIBRA**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 2001, Porto Seguro. Anais Viçosa, MG: Sociedade de Investigação Florestal, 109-121 p.

STEPANOV, A.; SMITH, J. M. **Mult-objective evacuation routing in transportation network**. European Journal of Operations Research, Kidlington, v. 198, p. 435-449, 2009.

SUBRAMANIAN, A. P. H. V.; PENNA, L. S.; OCHI, & M. J. F. SOUZA, **Um algoritmo heurístico baseado em *Iterated Local Search* para problemas de roteamento de veículos**. Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional. Eds. Curitiba, PR: Omnipax, 2013, ch. 11, 165–180 p.

TAHVANAINEM, T.; ANTILA, P. **Supply chain cost analysis of long-distance transportation of energy wood in Finland**. Biomass and Bioenergy, 2011. v.35, p. 3360-3375.

TUBINO, D. F. **Planejamento e Controle da produção: Teoria e Prática**. São Paulo: Atlas, 2007.

VENCOVSKY, V. P.; **Sistema ferroviário e o uso do território brasileiro: uma análise do movimento de produtos agrícolas**. Campinas - SP.: [s.n.], 2006. 26 p.

WADOUSKI, L. H. **O planejamento operacional na exploração de florestas**. In: Simposio Sobre Exploração, Transporte, Ergonomia e Segurança em Reflorestamentos. FUPEF. 1987. p. 28-39.

WEINTRAUB, A.; BARE, B.; **New issues in forest land management from an operations research perspective**. Interfaces 26: 9-25 1996.

WERNEBURG, M. A. P.; **Planejamento em grandes empresas florestais no Brasil**. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2015. 92 p. Dissertação (Mestrado)

WU, Chao-Sheng; CHU, Ching-Wu; HSU, Hsiu-Li. **A heuristic algorithm of vehicle routing problem with time windows and less-than-truckload carrier selection**. Journal of Marine Science and Technology, v. 25, n. 2, p. 129-141, 2017.

ZHANG, **Optimization with a simulated annealing algorithm of a hybrid system for renewable energy including battery and hydrogen storage.** Energy, v. 163, p. 191-207, 2018.

SEGUNDA PARTE
AN HEURISTIC SYSTEM FOR SPATIAL-TEMPORAL SCHEDULING OF WOOD
TRANSPORTATION PROBLEM

Elaborado de acordo com a NBR 6022 (ABNT, 2018)

ABSTRACT

The logistics of any service presents classic management challenges such as sizing the fleet and generating the service order, reducing queues, and increasing vehicle efficiency. Vehicle jam in loading/unloading wood is a major problem, as waiting times increase the cost of the project and reduce the efficiency of the service provider or equipment. Seeking to improve the planning and scheduling of activities of the forestry logistics, we have developed a system of forest optimization for the planning and control of wood transport. The system solves a set of forest operational problems to maximize the performance of these tasks under heuristic methods. In essence, these problems are associated with the sequence of transport, reduction of the size fleet, costs, and queues for loading/unloading. The proposed system can optimize downtime and reduce operating costs via vehicle routing with a reliable solution. The results of the developed system reach the global optimum established by mathematical models in all tested scenarios and subproblems. After processing, the system provides a detailed activity execution schedule, addressing spatial and temporal issues without compromising the factory supply. Complementary analyzes indicate that cranes are the equipment that causes the most consumption of resources and emission of greenhouse gases. We conclude that the proposed system is concise to solve transport problems and presents consistent solutions.

Keywords: Forest Transport, Heuristics, Forest Planning, Routing of vehicles.

1. INTRODUCTION

Nowadays, forest companies have been seeking maximum returns, and performance. They have a focus on better management procedures and decision strategies to reduce the risks of production. This process has a large cluster of information that relies on big data for further analysis. Beyond the supply chain, there are plenty of tasks and goals within a complex network associated with time and demands (BAG *et al.*, 2020). Supplying any industry of wood is not a trivial operation, they have to conciliate a biological growth function, wood quality, tree size, and uses for making inferences about when, where, and how to harvest them. For instance, wood transportation depends on forest road activities and harvest planning (GUMUS *et al.*, 2008). Wood transportation is a complex set of activities within the forest operation. Here, the challenges are related to the optimal allocation of resources to meet load demands over time (MOKHIREV *et al.*, 2019). Another interesting piece of information is the need to reduce costs by optimizing the operation, with this motivation some authors who used computational methods to improve aspects of wood transport, which we can cite Acuna (2017), François *et al.* (2017), and WU *et al.* (2017). This subject is usually associated with the optimization problem and most of them rely on vehicle routing problems (WANG, SHEU, 2019) or some special algorithm to be solved.

The algorithm routing problem is a complex problem that seeks to improve vehicle traffic by minimizing operating costs or maximizing profit. As a sub-problem, we can add queue minimization, which certainly increases the complexity of finding viable solutions. Frequently, these problems reduce the operational efficiency (DAGANZO, 1998), wasting the vehicle's time for loading/unloading wood in the industry. Alves *et al.* (2013) measured the waiting time for a load of wood transportation reaching 7.1% of the total. The idle time of trucks and cranes may influence their life cycle, costs, wood delivery service, workers fatigue, and under certain critical circumstances, the accident risks (EPSTEIN *et al.*, 2007). The waiting time also contributes to the greenhouse gas emission and noise impact on humans and wildlife. Conversely, optimum vehicle scheduling is a challenging task due to the number of decision variables within a mathematical model (KESKIN; LAPORTE; ÇATAY, 2019).

Find an optimum solution may have more operational details for the right execution and final control. These models demand extra computational effort than other classical problems in forest science. The operational research methods associated with information technology enable the use of computational modeling systems, these complex optimization problems have been solved by heuristic and metaheuristic algorithms (DESALE *et al.*, 2015).

For instance, OZTEKIN *et al.* (2018) applied the genetic algorithm to evaluate human organ transplantation; or MOAYEDI *et al.* (2020) predicting the fire susceptibility of forest areas using fuzzy systems. Usually, the metaheuristic algorithms reduce the computational effort and less processing time with high solution performance (DOKEROGLU *et al.*, 2019). It has been applied to logistical problems with similar responses (GROBA; SARTAL; VÁZQUEZ, 2018). We have designed a forest log framework to assess wood transportation planning. The system solves a set of operational forest problems to maximize the performance of these tasks under heuristics methods. In essence, these problems are associated with the transport vehicle sequence, reduction of fleet number, costs, and queues for loading/unloading. The proposal system may solve the idle time and vehicle routing with a reliable solution.

2. METHODOLOGY

2.1. Problem description and mathematical models

In this topic, we describe the problem scope and the mathematical programming models applied to solve them. There are three optimization problem classes or subproblems (sp): Sp 1 - Spatial Optimization; Sp 2 - Financial Optimization; and Sp 3 - Temporal Optimization. Besides, the variables and coefficients of the models are also enumerated in Table 1. The solving sequence of them is essential to complete all proposed work instead of using only a single model. Nevertheless, the output/input is shared between subproblems. The divide-and-conquest strategy for solving large problems is desirable to shrinkage the complexity (KOC *et al.*, 2020). The initial problem (Sp1) figures out the visiting sequence of wood piles that will be transported on a given day within the planning horizon. This strategy optimizes the machinery displacement avoiding inefficient vehicle transits. Previously, these visiting points are spread located over the stand border by experts. Although the fleet size and truck capacity influence the transportation costs, we understand that the visiting sequence of wood piles is another economic factor. It is normally assumed the spatial criteria for forestry problems as described in similar works (JAMNICK; WALTERS1993; WALTERS *et al.*, 2001). The next subproblem (Sp2) has focused on minimal transportation resources for maximal timber efficiency flow takes into account trucks and cranes costs (fixed and variable). The proposed model is formulated to achieve the wood supply goals daily with fleet, time, and vehicle routes constrained. Besides, the available vehicle must execute an optimal route with a minimal overall cost of the service. The last subproblem (Sp3) deals with the time-lapse vehicle allocation at the given day and work shift. This model summarized the

previous outputs (Sp1 and Sp2) into the high detailed execution guide. The main objective is to minimize the occurrence of queues in the transportation system.

Table 1. Notations and descriptions of indices and variables are used in all subproblems.

Notation	Description
Subproblem 1 - Spatial Optimization	
a	Sets of possible wood piles location $\{1, 2, 3, \dots, A\}$.
b	Sets of possible wood piles location $\{1, 2, 3, \dots, B\}$.
m	Interval of days $\{1, 2, 3, \dots, M\}$.
z_{abm}^1	Binary decision variable $\{0, 1\}$ for the two wood piles a and b transported at day m .
x_{am}^1	Binary decision variable $\{0, 1\}$ for the wood pile transported at day m .
y_{am}^1	The amount of wood (ton) transported from the wood pile a day m .
d_{ab}	Euclidean distance (m) between wood piles a and b
D_m	The industry's demand (ton) for wood at day m
V_a	The total of wood (ton) in pile a
Subproblem 2 - Financial Optimization	
i	Sets of existing wood piles, when $i=0$ this index represents a factory $\{1, 2, 3, \dots, I\}$
j	Sets of existing wood piles, when $j=0$ this index represents a factory $\{1, 2, 3, \dots, J\}$
k	Sets of available trucks $\{1, 2, 3, \dots, K\}$
l	Represent the number of the trip by the truck $\{1, 2, 3, \dots, L\}$
m	Day in the horizon plan $\{1, 2, 3, \dots, M\}$
g	Sets of existing cranes $\{1, 2, 3, \dots, G\}$
x_{ijklm}^2	Binary decision variable, with value 1, represents the displacement of truck k starting at i and ending at j on trip l on day k
y_{iklm}^2	Float variable, its value determines the amount of wood taken from the pile i on day m by the truck k (ton)
Q_k	The transport capacity of the truck k (ton)
V_i	Wood available in log pile i (ton)
d_{ij}	Distance from i to j (Km)
W_k	Truck speed k (Km/hr)
RG	crane performance (ton/hr)
EP	Working hours (hr)
z_{igm}^2	Amount of wood the crane g loads from pile i on day m (ton)
T_{km}	binary decision variable that accounts for the use of truck k on day m
R_1	The general cost of vehicles
CF_k	Fixed cost of vehicle k
CV_k	Cost of the kilometer traveled k
R_2	The general cost of cranes for loading wood
CF_g	Fixed cost of crane g
CV_g	cost of the loaded/unloaded ton of the g crane
R_3	The general cost of wood unloading
S	a sufficiently large number
C_{gm}	Binary decision variable that counts the use of the g crane on the day m
P_{gm}	Binary decision variable that counts the use of the unloading crane g on day m

Subproblem 3 - Temporal Optimization	
t	Sets of existing time window $\{1, 2, 3, \dots, T\}$
c	Set of activities that the truck can perform $\{d1 = \text{factory-pile displacement, } c = \text{load, } d2 = \text{pile-factory displacement, } u = \text{discharge, } o = \text{idleness, } q = \text{queue}\}$
k	Sets of available trucks $\{1, 2, 3, \dots, K\}$
e	Set of temporal possibilities that the truck has to perform the activity $\{1, 2, 3, \dots, E\}$
f	Set of cranes for loading $\{1, 2, 3, \dots, F\}$
p	set of cranes for unloading $\{1, 2, 3, \dots, P\}$
x_{tckefp}^3	Binary decision variable, with value 1, represents the execution of activity c by truck k in time window t in which to be unloaded by crane p and loaded by crane f $\{0,1\}$
y_{ke}^3	Represents that truck k will execute the work plan represented by possibility e $\{0,1\}$
JT	The maximum number of time windows available for work is calculated by the length of the work hours and the breadth of the time window

Fonte: do Autor (2021).

Regarding the mathematical model, the objective function of Sp1 minimizes the euclidean distance between the visiting points (wood piles) within the same work shift (z_{abm}^1) (Equation 1). Equations 2 and 3 attempts the industry demand and the maximum volume limits of the wood piles, respectively. Note that a given wood pile may be visited for more than a single day at least. Equation 4a denotes the junction of variables types (x and y) to active the cluster Z of two visiting points at the neighborhood set. Equations 4b and 4c describe the type of decision variables.

$$FO_1 : \min \sum_a^A \sum_b^B \sum_m^M z_{abm}^1 d_{ab} ; \quad \forall a \neq b \quad (1)$$

$$\sum_a^A y_{am}^1 = D_m; \quad \forall m \quad (2)$$

$$\sum_m^M y_{am}^1 = V_a; \quad \forall a \quad (3)$$

$$\frac{1}{2}(x_{am}^1 + x_{bm}^1) - z_{abm}^1 \geq 0; \quad \forall a, \forall b, \forall m, \forall a \neq b \quad (4a)$$

$$x_{am}^1, z_{abm}^1 = \{0,1\} \quad (4b)$$

$$y_{am}^1 \in R^+ \quad (4c)$$

At the end of Sp1 processing, it is necessary to establish a connection to Sp2. For this, only wood piles j corresponding to x_{am}^1 variables activated from Sp1 will be allowed for Sp2.

A mixed-integer linear programming model was designed to reach the Sp2 formulation. Equation 5 is the objective function to describe the transportation costs (fixed and variable) of the activities (load/unload, and traveling). Equation 6 is the fraction costs related to the enabled vehicles, and Equations 7-8 for those associated with crane operation (unload/load). There are a set of constraints to integrate and control the transport activities. Equations 9-10 are classical constraints of vehicle routes that take into account the traveling of two location points (wood pile/industry destination) and vehicle k with capacity q . In the forest transportation problem, the wood pile has superior volume than the truck capacity and multiple travels have to be done for a given vehicle a day. Normally, the wood pile is empty for economic reasons, and all timber is dispatch to the customer. Equation 11 validates this assumption considering the supply V of each wood pile j . The traveling service time of each vehicle is a set of tasks (travel, load, and unload) within the working time (Equation 12). The model considered the cranes sequencing for the task execution and multiple combinations of cranes, wood piles, and days were also possible in our model. Equation 13 reaches the g cranes allocation to attempt the vehicle k with loading demands at day m . The working time limit of each crane is defined by Equation 14. Finally, the set of equations 15-17 are mathematical devices of load/unload service by the cranes. Equation 15 deals with only the unloading service by cranes g in industry, and Equations 16-17 are responsible for the fixed cost of trucks and cranes. The nature of the decision variables is Equation 18-9.

$$FO_2: \min R_1 + R_2 + R_3 \quad (5)$$

$$R_1 = \sum_m^M \sum_k^K (T_{km} CF_k) + \sum_m^M \sum_l^L \sum_k^K \sum_j^J \sum_i^I (x_{ijklm}^2 d_{ij} CV_k) \quad (6)$$

$$R_2 = \sum_m^M \sum_g^G (C_{gm} CF_g) + \sum_i^I \sum_g^G \sum_m^M (z_{igm}^2 CV_g) \quad (7)$$

$$R_3 = \sum_m^M \sum_g^G (P_{gm} CF_g) + \sum_i^I (V_i CV_g) \quad (8)$$

$$x_{0jklm}^2 - x_{i0klm}^2 = 0; \forall i, \forall j, \forall k, \forall l, \forall m \quad (9)$$

$$Q_k x_{ijklm}^2 - y_{iklm}^2 \geq 0; \forall i, \forall j \neq 0, \forall k, \forall l, \forall m \quad (10)$$

$$\sum_j^J y_{iklm}^2 = V_j; \forall j \neq 0, \forall k, \forall l, \forall m \quad (11)$$

$$\sum_i^I \sum_j^J \sum_l^L \frac{(x_{ijklm}^2 d_{ij})}{W_k} + \sum_i^I \sum_j^J \sum_l^L \frac{(x_{jiklm}^2 d_{ji})}{W_k} + 2 \sum_i^I \sum_l^L \frac{y_{iklm}^2}{RG} \leq EP; \forall k, \forall m \quad (12)$$

$$\sum_k^K \sum_l^L y_{iklm}^2 \leq \sum_g^G z_{igm}^2, \forall i, \forall m \quad (13)$$

$$\sum_i^I z_{igm}^2 \leq EP RG; , \forall g, \forall m \quad (14)$$

$$\sum_i^I \sum_k^K \sum_l^L y_{iklm}^2 \leq EP RG \sum_g^G P_{gm}; \forall m \quad (15)$$

$$\frac{1}{S} * \sum_i^I z_{igm}^2 \leq C_{gm}; , \forall g, \forall m \quad (16)$$

$$\frac{1}{S} * \sum_i^I \sum_j^J \sum_l^L x_{ijklm}^2 \leq T_{km}; , \forall k, \forall m \quad (17)$$

$$x_{ijklm}^2, T_{km}, C_{gm}, P_{gm} = \{0,1\} \quad (18)$$

$$z_{igm}^2, y_{iklm}^2 \in R^+ \quad (19)$$

Finally, the last subproblem (Sp3) refers to the time-windows problem and we had to split the optimum solution (Sp2) for high detail. The problem denotes an assertive time controller for mapping trucks and crane usage daily. The problem statement addressed the time unit to define the combinatorial relation of vehicle, routes, load/unload, and queue possibilities. Moreover, we have chosen 5 minutes of the time unit for computational-operational execution balance. The number of decision variables may incur an unsolved problem (minute-to-minute) or less precision using an (hour-to-hour) unit. Previously, a range of tests and analyses help us to define this time-length unit. We may skip from the computational world under a practical approach. Let show an example, the vehicle v performs almost six tasks with the time-constrained resource: a) Displacement1 (vd1) – traveling forward course between industry and wood pile, b) Loading (vc) - vehicle v is loading at the

wood pile, b) Displacement2 (vd2) – traveling backward course between wood pile and industry, and later c) Unloading (vu) – vehicle v is unloading at the industry. Parallel, there are two “new” tasks to identify vehicle Idleness (vo) and Queue (vq). These activities are sensible under overworking demands for cranes at any visiting points in the networks. In such cases, the load/unload service is while interrupting for a moment. Unfortunately, the problem formulation requests a set of all possible combinations for each vehicle, and we have also integrated them within an entire transportation system of constraints including the available cranes. Due to the need for a connection between Sp2 and Sp3, only the possibilities that the trucks perform the activities established in the previous sub-problem are used. The mathematical model runs to minimize the number of time windows that vehicles are in q activity for each day independently (Equation 20). Naturally, the side effect of the queue occurrence is inverse of the objective function with positive performance. Hence, the binary variable (vehicle) is only activated for necessary uses. Equations 21-22 define the use of machinery at a single place and task. Besides, each truck has only permission to active a single work combination (Equation 23). This constraint defines also a vehicle route and all tasks at least. Equations 24-25 rely on the crane task for the load (m) and unload (n) operations for single-vehicle covering the time window.

$$FO_3: \min \sum_t \sum_k \sum_e \sum_f \sum_p x_{tckefp}^3; \forall c = q \quad (20)$$

$$\sum_c \sum_f \sum_p x_{tckefp}^3 = 1; \forall k, \forall t, \forall e \quad (21)$$

$$\frac{1}{\sum_t} * \sum_t \sum_c \sum_f \sum_p x_{tckefp}^3 = y_{ke}^3; \forall k, \forall e \quad (22)$$

$$\sum_e y_{ke}^3 = 1; \forall k \quad (23)$$

$$\sum_p \sum_e \sum_k x_{tckefp}^3 \leq 1; \forall t, \forall f, \forall c = l \quad (24)$$

$$\sum_f \sum_e \sum_k x_{tckefp}^3 \leq 1; \forall t, \forall p, \forall c = u \quad (25)$$

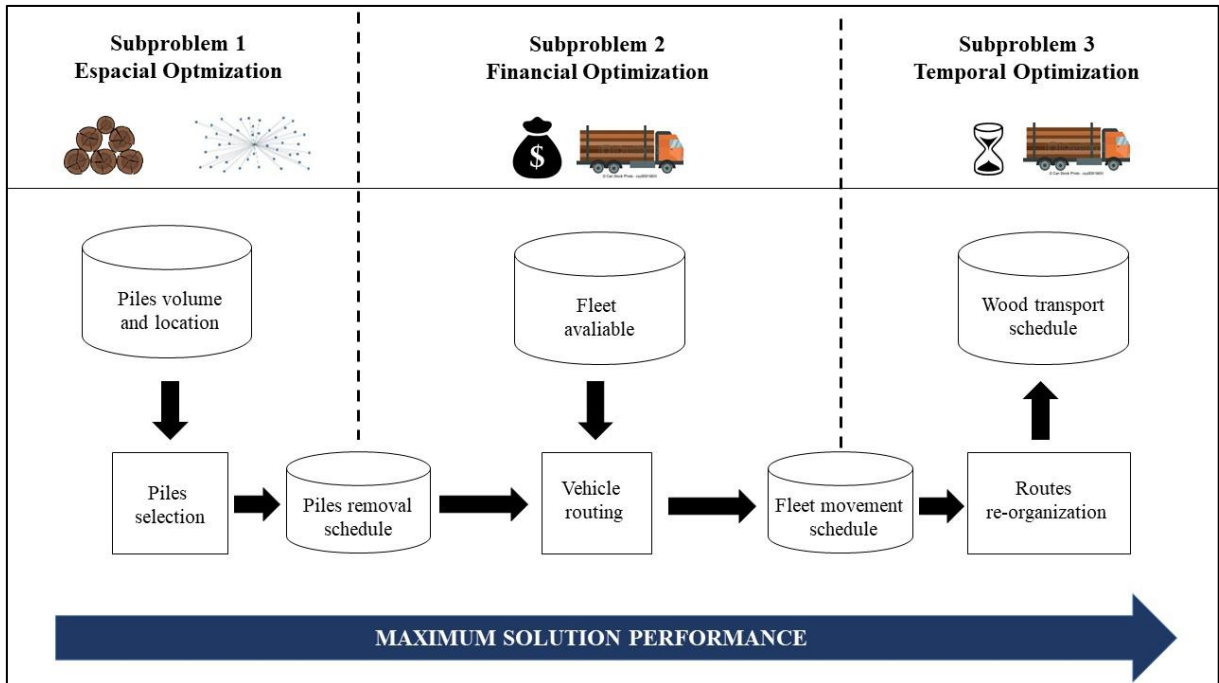
$$x_{tckefp}^3, y_{ke}^3 = \{0,1\} \quad (26)$$

2.2. The Forest logistic optimization system - FLoS

The FLoS system has been inspired to optimize forest transportation at the operational level. The input/output details are rich information to control this hard task of supplying the industry, and the facilities are requested to assist the multi-algorithm system to define the planning process. Hence, the System has three phases according to the subproblems (Figure 1) and their operational connection. These problems have a large number of binary variables, which exceed the run-time of using exact methods. In such cases, the approximate algorithms are useful for NP-Hard problems (BITTEL; KLIESCH; 2021; DIVEEV; BOBR, 2017). We have the choice of the metaheuristic simulated annealing as a solver procedure for all state problems. This metaheuristic has a high point for finding optimal solutions with methods that prioritize the global optimum over the local optimum, other positive aspects are related to the applicability of the method and processing speed (DONG *et al.*, 2020; ATTIYA *et al.*, 2020). The parameters used for SA were acquired by previous tests and all subproblems use an initial temperature of 40,000 and cooling of 1% per iteration. However, the disturbance rate of subproblems 1 and 2 is 3%, in subproblem 3 this parameter does not apply because the disturbance is made in the alternative of carrying out the operation of a random truck.

The subproblems of the FLoS are connected in such a way that the information obtained in the previous subproblems supplies the subsequent stages. The first subproblem selects the piles from the spatial point of view and in such a way that the selected volume of wood supplies the factory properly. The second subproblem optimizes the operation from a financial point of view via vehicle routing. In this subproblem, we simulate the removal of wood from instance addressing the costs of loading, unloading, empty displacement, and loaded displacement in addition to the allocation of available equipment. The last subproblem organizes the operation from a temporal point of view, changing the order of the trips as well as the moment they start seeking to avoid the occurrence of queues in loading and unloading activities.

Figure 1. Flowchart of the framework system for solving the optimization problems.



Fonte: do Autor (2021)

The initial solution of subproblem 1 is generated by the randomization of the call order of the piles. Then, the solution construction process begins, in which, sequentially, each pile has its total volume destined for the day. If the quantity of wood exceeds the daily goal of the factory, this pile is divided and only the amount needed to meet the target is used for the day in question, the rest is used for the next day of the planning horizon. It is still necessary to evaluate the quality of the solution, so the algorithm computes the total sum of the Euclidean distance of the piles destined for each day. Obtaining the solution via metaheuristic, at the end of this phase we obtain a schedule for removing the wood from the piles. The valuable information generated by this phase is the amount of wood to be transported and the specific day that the removal must occur in the planning horizon.

The initial solution to subproblem 2 is generated by randomizing the order in which cranes and trucks will be used. The solution's construction algorithm follows each exhaust vehicle service availability via launching routes and cranes by unloading and loading wood. When there is no activity that the machinery in question can perform completely, the algorithm uses the next machinery established in the order of initial execution. This process is only completed when the wood in the piles is completely depleted. Seeking to generate uniquely viable solutions, the algorithm has a mechanism for inserting new trucks and cranes if the machinery offered by the company is not able to transport what is required by the factory's daily goal. The disturbance of the initial solution continues as an exchange of the order of use of cranes and vehicles. With this new solution, a candidate solution is generated

to replace the initial solution. The evaluation of the solution has the same criterion as the objective function of the vehicle routing model, calculating the overall cost of the operation by adding the variable and fixed costs. The initial solution of subproblem 3 is generated by choosing a possibility for a truck. In possession of this possibility, the algorithm filters possibilities from other trucks and chooses them randomly. That done, we have a feasible solution that is then evaluated according to the number of times windows are activated with a queue. The candidate solution is formed by exchanging possibilities in a truck. Then refiltering and a new choice of possibilities per truck are made. That way, the algorithm always returns feasible solutions.

2.3. Business cases

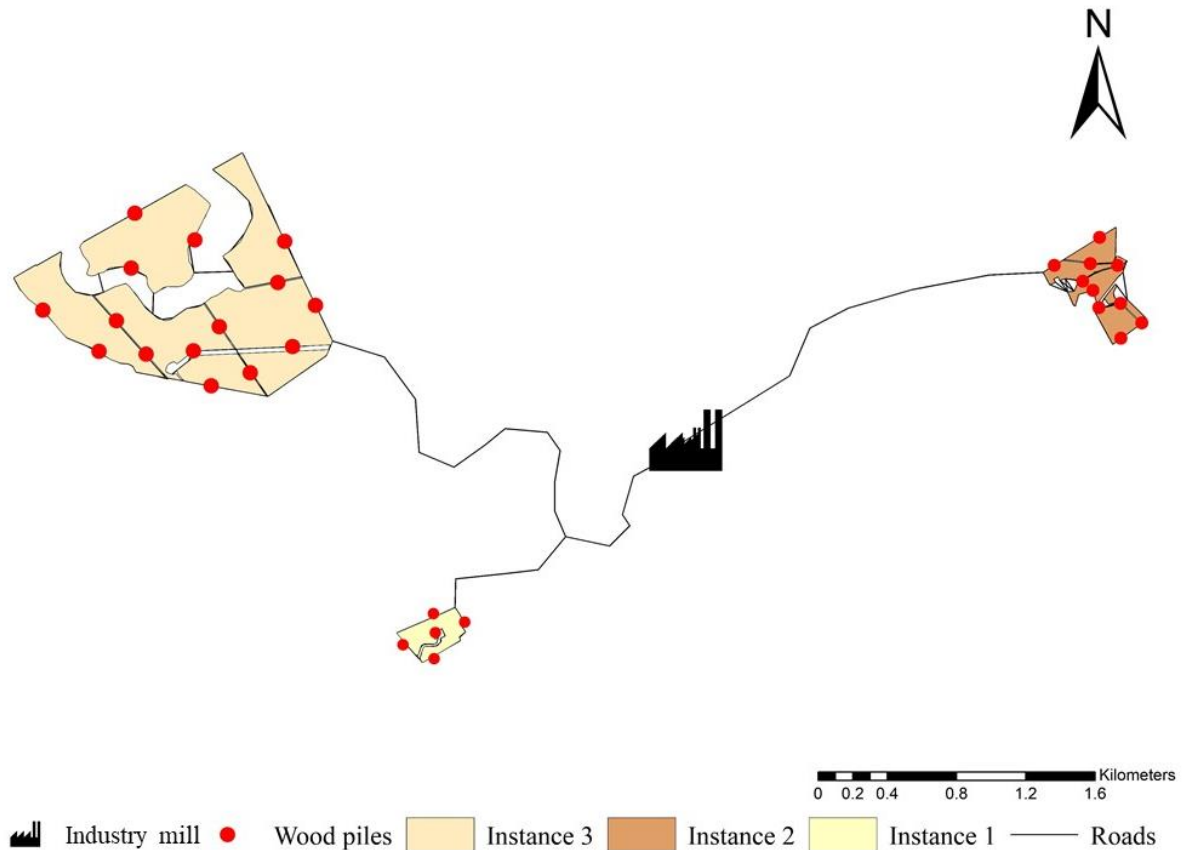
We simulated a business case to show off the system performance for solving a set of transportation problems (Table 2). The dataset was applied for both exact and approximate methods and three instances size defined for our tests (Figure 2). The size problem is essential to validate the proposed framework which denotes three complexity classes (low, medium, high) according to the number of stands, visiting points, and wood demands. In addition, we adopt two vehicles type: Truck 1 (T1) - a two semi-trailers with load capacity (37 tons), a fixed cost (280.24 US\$.day⁻¹) and fuel consume (0.26 US\$.km⁻¹); and Truck 2 (T2) – a three semi-trailers with load capacity (54 tons), a fixed cost (299.5 US\$.day⁻¹) and fuel consume (1.16 US\$.km⁻¹). Both vehicles have a speed limit of 40 km.h⁻¹, the load/unload tasks were configured for a crane with a forest claw for handling the wood logs. The reach capacity is 1.0 m² of area and 9 m of length with load/unload performance (72.53 ton.h⁻¹), fuel consume (0.25 US\$.ton⁻¹), and fixed cost (490.29 US\$.day⁻¹).

Table 2. Data set description

Instances	Demand (ton/day)	Stands	Wood piles	Volume (ton)		
				Total	Mean	SD
1	471.46	1	5	942.92	188.58	43.19
2	1061.98	5	10	2,123.97	212.39	101.14
3	6861.68	6	15	13,723.36	914.89	371.10

SD - Standard deviation. Fonte: do Autor (2021).

Figure 2. The simulated business case instances to solve the wood supply problem.



Fonte: do Autor (2021)

2.4. Solution assessment

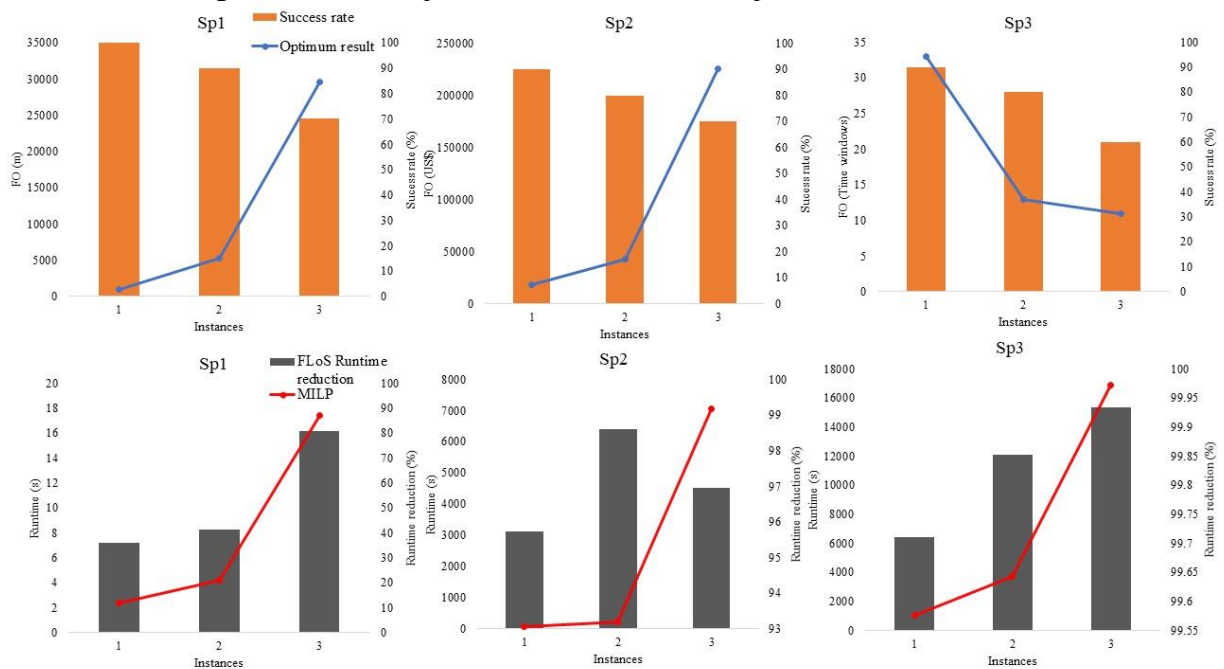
The model processes and problems solution were performed with Intel i5 2.41GHz 4GB HD 1TB using Gurobi 9.0 solver in API for R software. The R language (R SOFTWARE TEAM, 2020) was used for the FLoS framework design and algorithms tests. Previous tests confirm the high performance of the FLoS algorithms and we run 10 times the system to validate our findings. The local optimum is often a problem for the approximate methods to commit the wrong conclusion (DENG *et al.*, 2019). Besides, we calculate the greenhouse gas emission using the bottom-up method (LI *et al.*, 2021) covering only vehicles and cranes active in the solution. The CO₂ quantification consists of applying the factor (3,140g of CO₂.km⁻¹) directly into the weight of CO₂ for the atmosphere. Conversely, the trucks' gas emissions are calculated by the factor (770g of CO₂.km⁻¹). The overall CO₂ is the sum of these values for each machinery in operation. The efficiency of the vehicles was calculated according to the operating time about the available time (Equation 27).

$$\text{Efficiency (\%)} = 100 * \frac{\text{Operating time (time windows)}}{\text{Available time (time windows)}} \quad (27)$$

3. RESULTS

The optimum solution is a complex task for most of the combinatorial problems in operational research. Hence, global science is moving toward new mathematical techniques with high solution performance. For instance, our modeling efforts are desirable to report a detailed information level as expected for transportation problems. The first solved problem (Sp1) is a simple challenge with no solution differences between the optimal and our proposed system only for the first instance size (Figure 3). The success rate optimally decreases 80-70% for the next two instances. Hence, the computational consumption time follows the same order, and our heuristic has a superior performance by reducing 5.18 times on average. Conversely, the financial resource allocation has significant differences according to the instance sizes from US\$ 3,403.91 (instance 1) to US\$ 42,902.03 (instance 3). Due to this problem complexity, our system reaches roughly 70% of cases at the optimal solution with 94.3% less processing time than the exact method in Sp2. A similar tendency of solution quality (70% optimum) and time reduction (99.9%) for Sp1 problem in all instances. Still, in figure 3, it is possible to identify that the variation between the solutions generated by each repetition in the instances is relatively small, this fact demonstrates the ability of the SA algorithm to find optimal solutions stably with a high success rate. Due to the success of FLoS to find the optimal solutions to the problem, based on the results of the mathematical model, in future analyzes, we will use the optimal solutions found by the heuristic system.

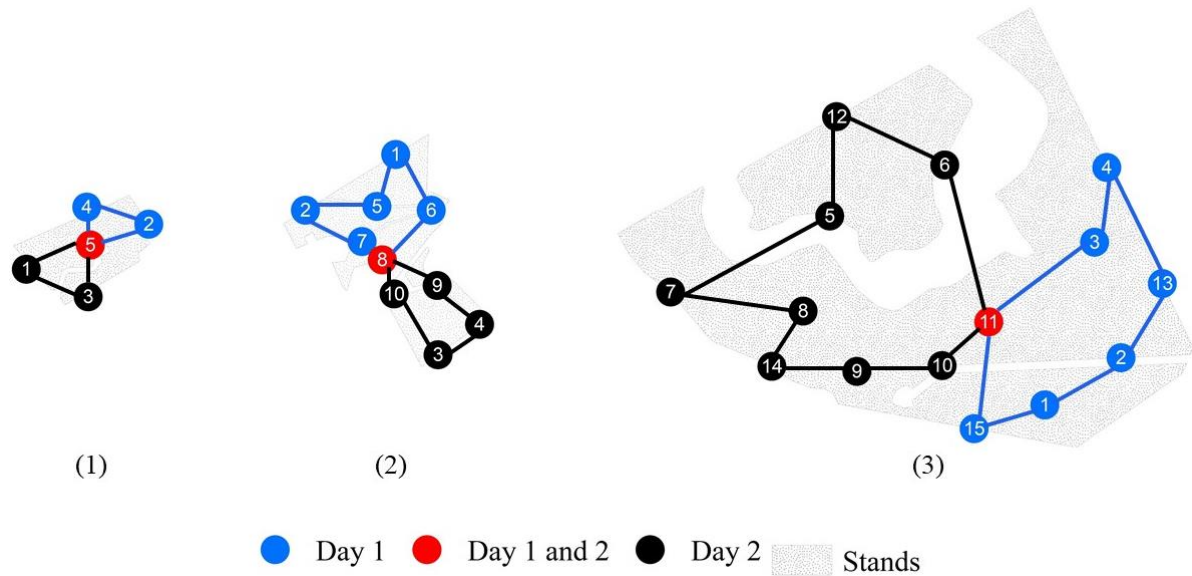
Figure 3. Chart of optimization results from subproblems and instances.



Fonte: do Autor (2021)

The right spatial distribution and visiting sequence of woodpiles define the scheduling access to the raw material. Therefore, a cascade effect of inevitable events may reduce supply chain efficiency. The input/output of the models is strongly linked with transportation activities. Aligned to maintain the supply of the factory, the wood contained in the piles meets the daily demand optimally. Figure 4 highlights the cluster sequence of visiting points as an optimal configuration structure. This operational sequence is straightly related to the daily industry demands and cluster distance. Face to the combination problem, the optimal solution has split some of the woodpiles into two days of visiting. For instance, woodpile 5 has visited twice (1st day - 23.23, and 2nd day - 178.475) in instance 1. The largest instance divides pile 11 into 488.76 and 410.64 ton on consecutive days. It is important to note that the available volume is sufficiently large to supply the industry demands. The algorithm has internal rules to guarantee this wood consumption fluxes (offers \times demands) for technical proposes.

Figure 4. A complete graph solution designed to schedule the visiting point sequence in subproblem 1.



Fonte: do Autor (2021)

In subproblem 2, the number of vehicles used for transportation also showed results consistent with the scope of the instance. In instance 1 we have the use of 3 vehicles of which only 1 is of the T1 configuration, instance 2 uses 6 vehicles per day, on the first day 4 trucks are used, but on day 2 one of these vehicles is replaced by a T2. In instance 3, 32 vehicles are used on day 1, of which 18 are of the T2 configuration, from day 2 it is necessary to include a vehicle T1 in the fleet to complete the service. The use of cranes in the instance was constant during the working days, a direct reflection of the uniformity of the amount of wood in piles obtained by subproblem 1. The radius distance of industry and cost has been higher on the second day at any instance size. As shown in Table 3, during the transportation of wood, the displacement of the vehicles presented was 111.8, 314.2, and 2940.6 kilometers for instance 1, 2, and 3. In addition, the fleet efficiency was assessed according to the unit cost (Figure 5A). The results suggest a relationship between these two metrics, it is possible to identify that efficiency follows an inverse behavior to the cost per ton. We can then clarify that the lower the cost allocated per ton of wood, the greater the efficiency of the operation.

According to the nature of the problem addressed, it is clear that the transportation of wood, loading, and unloading operations consumes a high amount of time. Logically, the time used to move trucks varies depending on the distance from the woodpiles to the storage yard. Another notable fact is the occurrence of vehicle inactivity, in this regard, smaller instances have a higher occurrence of this type of phenomenon. The queue itself occurs in a clear relationship between the amount of machinery intended for loading and unloading wood, so where there is less of this equipment, the queue has a greater contribution to the inefficiency

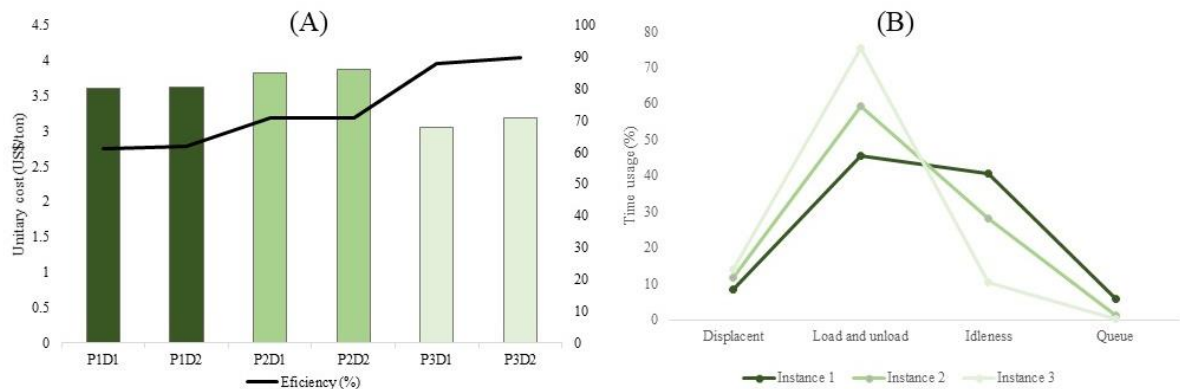
of the activity (Figure 5b). When comparing the share in the total cost of operating trucks and cranes, he noted a greater contribution by cranes to the operation's monetary allocation. Except for instance 1, where the cost of cranes and vehicles is balanced, instances 2 and 3 accounts for 53.05% and 54.45% of the allocated resource consumed by loading and unloading cranes.

Table 3. Summary of the transportation system for Sp2.

Instances	Day	D	Travels	Trucks (%)		Cranes	Cost (US\$)			T (ton)
				T1	T2		Variable	Fixed	Total	
1	1	51.7	3	67	33	2	361.9	1,335.6	1,697.5	471.5
	2	60.1	3	67	33	2	370.7	1,335.6	1,706.3	471.5
2	1	150.9	6	67	33	6	849.4	3,204.5	4,054.0	1062.0
	2	163.3	6	50	50	6	867.9	3,252.0	4,119.9	1062.0
3	1	1,702.4	32	50	50	26	5,148.9	15,838.8	20,987.8	6861.7
	2	1,238.2	33	54	46	26	5,385.2	16,528.9	21,914.2	6861.7

D – traveling mean distance of vehicles (Km); T – total weight of transported wood. Fonte: do Autor (2021).

Figure 5. The operational efficiency and transport cost (a) and time windows of trucks (b).



5A: P1D1 - Day 1 operation of instance 1; P1D2 - Day 2 operation of instance 1; P2D1 - Day 1 operation of instance 2; P1D2 - Day 2 operation of instance 1; P3D1 - Day 1 operation of instance 3; P3D2 - Day 2 operation of instance 3 - Fonte: do Autor (2021).

The overall CO₂ emission is an environmental issue problem for our society, and fossil consumption is still the main fuel resource for most of the forest industry. We have noted that cranes have a significant contribution to emissions. On average, this machinery has up to 86% of participation at least. The maximum usage capacity of cranes (76.58%) figures out a high crane dependency that may limit the working service and makespan. Conversely, the trucks' emission is only related to the traveling course and non-emission at a stationary position. In addition, the ratio of the weight of CO₂ emission and wood transportation is an important environmental metric for plans of carbon reduction programs. This relation is rough of a unit for all tested problems (Table 4).

Table 4. Greenhouse gas emissions from all problems, instances, and machinery activities.

Instances	Distance (Km)	Wood (t)	Fuel (l)	CO ₂ emission (Kg)			Efficiency ¹ (CO ₂ /ton)
				Truck	Crane	Total	
1	111.8	942.9	323.2	86.0	862.8	948.9	1.00
2	314.2	2124.0	728.2	241.9	1,943.6	2,185.5	1.02
3	2,940.6	13,723.4	4,705.1	2,264.2	12,558.1	14,822.3	1.08

¹ ratio of wood transported and CO₂ emissions. Fonte: do Autor (2021)

4. DISCUSSION

This study has present new insights models for solving forest transport problems into a framework. The final integrated solution provides unparalleled, timely insight into the vehicle routing plan and wood supply-demand balance. Besides, the mathematical models of the system covering a detailed guide for forest transport operation and control. The solution has a rich value of resources with similar precision as an exact within less time-run consumption. Our findings suggest a high complexity for finding an optimal solution considering the tested problems. Therefore, the large-scale problem may affect the feasible solution success under certain time limit constraints for decision-making. Generally, these problems are better suit applying approximate algorithms under hard task conditions (JIN *et al.* 2016, BABAPOUR *et al.* 2019). On the other hand, our designed system may reduce the daily manager's efforts to reach the fleet schedule.

The FLoS system integrates the main three models of forest transportation take into account visiting points, sequence, wood daily supply, and the queue of vehicle routing. Currently, several models have been tested for similar proposes to take into account the spatial grouping of demands (NIEMEYER *et al.* 2020; DONG *et al.* 2020), vehicle route problems (YU *et al.* 2019; BAGAYOKO *et al.* 2016; MONTI *et al.* 2020). Unforntely, most of them have no queue support and should be infeasible for maximum efficiency of wood supply challenges. New technologies of telemetry (MARQUES *et al.* 2019; BASTILLE-ROUSSEAU *et al.* 2018), real-time monitoring (DING *et al.* 2018; SINESI *et al.* 2017), and control towers (TRZUSKAWSKA-GRZESIŃSKA *et al.* 2018; AZANI *et al.* 2020) has been tested with positive returns, and integrated with FLoS can improve operation management through fleet monitoring. The information collected by telemetry, control tower, and real-time monitoring can update the initial processing condition. In case of delays and unforeseen circumstances, the reprocessing of the system with the current conditions of the operation will certainly bring benefits to the planning and reality of the simulated operation.

In Forest Science, the geographic location of objects is often applied within all planning levels. This special case denotes a high model performance to keep the initial scope prescriptions for many reasons. Moreover, the spatial interaction may increase the number of decision variables and constraints of the problem (NOUMONVI *et al.* 2017; GROOM *et al.* 2017). Mathematically, the main highlight of this subproblem is the division of the woodpile into two work shifts. Numerous mathematical planning models available in the literature have difficulties in implementing float characteristics with binary variables (SHI, ZHAO 2016; TRENTIN, SEBASTIANI, 2019), nevertheless, the developed algorithm manages to obtain viable solutions by aborting binary variables (activation of the woodpile) and float variables (wood removed from the pile). Dealing with a model with the objective function composed of binary variables, the mathematical devices used to provide a floating aspect regarding the amount of wood transported per day.

The financial aspect is another optimized factor that affects the vehicle routing plan and operation. Using trucks and cranes with minimal costs may not reach the daily wood goals. There is an equilibrium of investment and revenues to execute the forest tasks. The control of supply-demand balance into the mathematical constraints guarantees the log fluxes between stands-industry. Besides, this issue also relies on a minimum facilities level to compliance the service. The system precision is strictly dependent on the task scheduling from the optimal view (NIU *et al.* 2018; SHEN *et al.* 2018). Fortunately, the FloS system integrates three forest transportation models that take into account visiting points, sequence, wood daily supply, and the queue of vehicle routing. It is worth noting that the crane allocation has been theoretically proven a limited resource of the forest system. The resources allocated to carry out the activity are mostly used to keep the cranes running. This evidence lays on a better logistic plan to conciliate the management efforts and resources. As expected, the transport cost is inversely proportional to the operation efficiency. Based on the present work, we recommend the use of the mix of truck types, different capacities promote increased options for loading and can combine to transport a load that is not suitable for a single type of truck.

The time windows problem organizes the traveling sequence of trucks for solving idleness. The synchronism of load/unload, queues, trucks, and cranes may reduce the optimization benefits reach the previous problems. The serious problem causes a range of negative impacts on the wood supply chain, we can highlight delays (ODED, HIJNER, 2021) and high cost (JIN *et al.*, 2018). Although the queuing problem is relatively new, there are

gaps in real business applications and solver methods. Poonthalir and Nadarajan (2018) model the waiting time measuring the idleness cost as a negative factor of operational efficiency. The electric vehicle routing model was designed to reduce the queue in charging stations (KESKIN, LAPORTE, 2019). Several studies have similar principles to our model and our findings may help other applications. It seems logical to increase the number of cranes which is the bottleneck of the transportation system. Multiple stations of cranes may accelerate the rate of load/unloading operation with operational advances. Therefore, overcrowding the crane operation is certainly not viable due to the economic limits (Sp2). Our model has a preferential order for economic aspects their operational efficiency. The solution indicates the demand for cranes with higher loading/unloading efficiency, for obvious reasons.

Recent researches have also focused on current environmental issues and solutions to reduce the negative impact of industrial sources (MARCHI *et al.*, 2018; HENS *et al.*, 2018). The greenhouse gas emission heats the atmosphere with the amount of a particular gas in the air. It also includes direct emissions from fossil-fuel combustion for the transportation system. Our findings suggest that the crane has a significant contribution to gas emissions, and the minimization of the second objective function (Sp2) indirectly reduces these overall emissions. We may affirm that the optimized system benefits humans and wild fauna as a compensatory behavior. According to Zhang *et al.* (2015), the CO₂ emissions are drastically reduced under most of the vehicle routing problems. These positive side effects of optimum routes are often reached at the lower fuel consumption and forest machinery allocation. Lack of clean energy accelerates the environmental problems and the carbon footprint may help reduce and offset the industry emissions for business proposals. Furthermore, the use of electric/hybrid vehicles is substantially important for the industry 4.0 revolution (LI; SOLEIMANI; ZOHAL, 2019; POONTHALIR; NADARAJAN, 2018). The use of electrical equipment in the field is a controversial operation due to the difficulty of supply in areas that do not have a distribution network. However, the unloading of wood is done in an operational plant that has these available resources, this fact can enable the use of electric cranes for the unloading of wood in the yard, minimizing the emission of greenhouse gases. It goes beyond the operational cost and production through the environmental goals. We have designed a forest log framework to assess wood transportation planning. The system solves a set of operational forest problems to maximize the performance of these tasks under heuristics methods. In essence, these problems are associated with the transport vehicle sequence, reduction of fleet

number, costs, and queues for loading/unloading. The proposal system may solve the idle time and vehicle routing with a reliable solution.

5. CONCLUSION

The forest transportation system has a set of challenges to guide the operational execution and control. Nowadays, these details are the key point of the system instead of the general assumptions. In general, mathematical programming models have several limitations that rely on non-linearity, formulation complexity, and infeasible solution at least. Our findings have highlighted the input/output integration of subproblems and the mathematical strategy of divide-and-conquest for complex problems. This mandatory integration has a significant impact on scheduling details, technical prescriptions, and overall costs. Global science has been searching for algorithms with high performance, and we may suggest the Simulated Annealing after our tests. The proposal system is concise for solving the transportation problems according to the optimal gap and consistent solutions. Finally, the balance of optimum solution and computer run-time is still a paradigm.

REFERENCES

- ACUNA, M.. **Timber and biomass transport optimization: A review of planning issues, solution techniques and decision support tools.** Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, v. 38, n. 2, p. 279-290, 2017.
- ALVES, R. T., FIEDLER, N. C., SILVA, E. N. D., LOPES, E. D. S., CARMO, F. C. D. A. D.. **Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares.** Revista Árvore, v. 37, n. 5, p. 897-904, 2013.
- ATTIYA, I.; ABD ELAZIZ, M.; XIONG, S.. **Job scheduling in cloud computing using a modified harris hawks optimization and simulated annealing algorithm.** Computational intelligence and neuroscience, v. 2020, 2020.
- AZANI, M.. **Supply Chain Control Tower Reference Architecture for Exception Monitoring and Real-Time Incident Management** (Master's thesis, University of Twente) 2020.

- BABAPOUR, R., NAGHDI, R., GHAJAR, I., & MORTAZAVI, Z. (2018). **Forest road profile optimization using meta-heuristic techniques**. *Applied Soft Computing*, 64, 126-137.
- BAG, S.,. **Big data analytics as an operational excellence approach to enhance sustainable supply chain performance**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 153, p. 104559, 2020.
- BAGAYOKO, M., DAO, T. M., & ATEME-NGUEMA, B. (2016). **Multi-objective forest vehicle routing using savings-insertion and reactive tabu with a variable threshold**. press in *International Journal of Modern Engineering Research*.
- BASTILLE-ROUSSEAU, G., WALL, J., DOUGLAS-HAMILTON, I., & WITTEMYER, G. (2018). **Optimizing the positioning of wildlife crossing structures using GPS telemetry**. *Journal of Applied Ecology*, 55(4), 2055-2063.
- BITTEL, L.; KLIESCH, M. **Training variational quantum algorithms is NP-hard--even for logarithmically many qubits and free fermionic systems**. arXiv preprint arXiv:2101.07267, 2021.
- DAGANZO, C. F. **Queue spillovers in transportation networks with a route choice**. *Transportation Science*, 32(1), 3-11, 1998.
- DENG, W.; XU, J.; ZHAO, H. **An improved ant colony optimization algorithm based on hybrid strategies for scheduling problem**. *IEEE access*, v. 7, p. 20281-20292, 2019.
- DESALE, S., RASOOL, A., ANDHALE, S., & RANE, P. **Heuristic and meta-heuristic algorithms and their relevance to the real world: a survey**. *Int. J. Comput. Eng. Res. Trends*, 351(5), 2349-7084, 2015.
- DING, K., JIANG, P., & SU, S.. **RFID-enabled social manufacturing system for inter-enterprise monitoring and dispatching of integrated production and transportation tasks**. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 120-133 2018.
- DIVEEV, A. I.; BOBR, O. V. **Variational genetic algorithm for np-hard scheduling problem solution**. *Procedia Computer Science*, v. 103, p. 52-58, 2017.
- DOKEROGLU, T.,. **A survey on new generation metaheuristic algorithms**. *Computers & Industrial Engineering*, v. 137, p. 106040, 2019.

DONG, L., TIAN, D., LU, W., & LIU, Z. (2020). **Estimating the Efficient Parameter Values of Different Neighborhood Search Techniques of Simulated Annealing in Forest Spatial Planning Problems**. *IEEE Access*, 8, 115905-115921.

EPSTEIN, R.; RONNQVIST, M.; WEINTRAUB, A.; Forest transportation (Chapter 20). Editor(s): WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJORNDAL, T.; EPSTEIN, R.; MIRANDA, J. **Handbook of operations research in nature resourcers**. Springer, 2007. 1 ed, 611 p.

FRANÇOIS, J. et al. **A tactical planning model for collaborative timber transport**. *IFAC-PapersOnLine*, v. 50, n. 1, p. 11713-11718, 2017.

GROBA, C.; SARTAL, A.; VÁZQUEZ, X. H. **Integrating forecasting in metaheuristic methods to solve dynamic routing problems: Evidence from the logistic processes of tuna vessels**. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 76, p. 55-66, 2018.

GROOM, J. D., JOHNSON, S. L., SEEDS, J. D., & ICE, G. G. (2017). **Evaluating links between forest harvest and stream temperature threshold exceedances: The value of spatial and temporal data**. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53(4), 761-773.

GUMUS, S., ACAR, H. H., & TOKSOY, D. **Functional forest road network planning by consideration of environmental impact assessment for wood harvesting**. *Environmental monitoring and assessment*, 142(1), 109-116., 2018.

HENS, L., BLOCK, C., CABELLO-ERAS, J. J., SAGASTUME-GUTIEREZ, A., Garcia-Lorenzo, D., CHAMORRO, C., ... & VANDECASTEELE, C. **On the evolution of “Cleaner Production” as a concept and a practice**. *Journal of cleaner production*, 172, 3323-3333, 2018.

JAMNICK, M. S.; WALTERS, K. R. **Spatial and temporal allocation of stratum-based harvest schedules**. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 23, n. 3, p. 402-413, 1993.

Ji, Min et al. **Logistics scheduling to minimize the sum of total weighted inventory cost and transport cost**. *Computers & industrial engineering*, v. 120, p. 206-215, 2018.

JIN, X., PUKKALA, T., & LI, F. **Fine-tuning heuristic methods for combinatorial optimization in forest planning**. *European Journal of Forest Research*, 135(4), 765-779, 2016.

KESKIN, M; ÇATAY, B; LAPORTE, G. **A simulation-based heuristic for the electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations.** Computers & Operations Research, v. 125, p. 105060, 2020.

KOC, I; CAY, T; BABAOGLU, I. **Approaches to automated land subdivision using binary search algorithm in zoning applications.** In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer. Thomas Telford Ltd, 2020. p. 1-13.

LI, J., TIAN, Y., DENG, Y., ZHANG, Y., & XIE, K. **Improving the estimation of greenhouse gas emissions from the Chinese coal-to-electricity chain by a bottom-up approach.** Resources, Conservation and Recycling, 167, 105237, 2019.

LI, Yongbo; SOLEIMANI, Hamed; ZOHAL, Mostafa. **An improved ant colony optimization algorithm for the multi-depot green vehicle routing problem with multiple objectives.** Journal of cleaner production, v. 227, p. 1161-1172, 2019.

MARCHI, E., CHUNG, W., VISSER, R., ABBAS, D., NORDFJELL, T., MEDERSKI, P. S., ... & LASCHI, A. **Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate.** Science of the Total Environment, 634, 1385-1397, 2018.

MARQUES, J. A., LUIZELLI, M. C., DA COSTA FILHO, R. I. T., & GASPARY, L. P. **An optimization-based approach for efficient network monitoring using in-band network telemetry.** Journal of Internet Services and Applications, 10(1), 12, 2019.

MOAYEDI, Hossein et al. **Fuzzy-metaheuristic ensembles for spatial assessment of forest fire susceptibility.** Journal of environmental management, v. 260, p. 109867, 2020.

MOKHIREV, A., GERASIMOVA, M., & POZDNYAKOVA, M. **Finding the optimal route of wood transportation.** In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 226, No. 1, p. 012053). IOP Publishing; 2019.

MONTI, CASSIO A.U.; GOMIDE, LUCAS R.; OLIVEIRA, RAFAEL M. and FRANCA, LUCIANO C.J.. **Optimization of Wood Supply: The Forestry Routing Optimization Model.** An. Acad. Bras. Ciênc. [online]. 2020, vol.92, n.3

NIEMEYER, J., BARROS, F. S., SILVA, D. S., CROUZEILLES, R., & VALE, M. M. **Planning forest restoration within private land holdings with conservation co-benefits at the landscape scale.** Science of The Total Environment, 717, 135262, 2020.

NIU, Y., YANG, Z., CHEN, P., & XIAO, J. Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost. *Journal of cleaner production*, 171, 962-971, 2018.

NOUMONVI, K. D., MOUNIR, F., & BELGHAZI, B. **Spatial Multi-Criteria Based Analysis to Assess Dynamics and Vulnerability of Forest Ecosystems to Global Changes: Case of Maamora Forest-Morocco.** *Open Access Library Journal*, 4(9), 1-16, 2017.

ODED, C. A. T. S.; HIJNER, Anne Mijntje. **Quantifying the cascading effects of passenger delays.** *Reliability Engineering & System Safety*, p. 107629, 2021.

OZTEKIN, Asil et al. **A decision analytic approach to predicting quality of life for lung transplant recipients: A hybrid genetic algorithms-based methodology.** *European Journal of Operational Research*, v. 266, n. 2, p. 639-651, 2018.

POONTHALIR, Ganesan; NADARAJAN, Rethnaswamy. **A fuel efficient green vehicle routing problem with varying speed constraint (F-GVRP).** *Expert Systems with Applications*, v. 100, p. 131-144, 2018.

SHEN, L., TAO, F., & WANG, S. **Multi-depot open vehicle routing problem with time windows based on carbon trading.** *International journal of environmental research and public health*, 15(9), 2018.

SHI, Q., & ZHAO, R. **Floating Point Optimization Based on Binary Translation System QEMU.** In 2016 2nd Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA-16). Atlantis Press, 2016.

SINESI, S., ALTIERI, M. G., MARINELLI, M., & DELL'ORCO, M.. **A multivariate logic decision support system for optimization of the maritime routes.** In 2017 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS) (pp. 75-79). IEEE, 2017.

TRENTIN, P., & SEBASTIANI, R. **Optimization Modulo the Theory of Floating-Point Numbers.** In International Conference on Automated Deduction (pp. 550-567). Springer, Cham.

TRZUSKAWSKA-GRZESIŃSKA, A. (2017). **Control towers in supply chain management—past and future.** *Journal of Economics & Management*, 27, 114-133.

WALTERS, K. R., COX, E. S., 2001. **An empirical evaluation of spatial restrictions in industrial harvest scheduling: the SFI planning problem.** Southern Journal of Applied Forestry, 25(2): 60-68. DOI: 10.1093/sjaf/25.2.60

WANG, Z.; SHEU, J.. **Vehicle routing problem with drones.** Transportation research part B: methodological, v. 122, p. 350-364, 2019.

WU, C.-S.; CHU, C.; HSU, H.. **A heuristic algorithm of vehicle routing problem with time windows and less-than-truckload carrier selection.** Journal of Marine Science and Technology, v. 25, n. 2, p. 129-141, 2017.

YU, M., JIN, X., ZHANG, Z., QIN, H., & LAI, Q. **The split-delivery mixed capacitated arc-routing problem:** Applications and a forest-based tabu search approach. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 132, 141-162, 2019.

ZHANG, Jianghua et al. **Vehicle routing problem with fuel consumption and carbon emission.** International Journal of Production Economics, v. 170, p. 234-242, 2015.