



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Especialização em Ciência de Dados



Otimização do processo de abastecimento de madeira em uma fábrica de celulose

Walquíria Márcia Queiroz Rodrigues

Belo Oriente, MG
2024

Walquíria Márcia Queiroz Rodrigues

Otimização do processo de abastecimento de madeira em uma fábrica de celulose

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Ciência de Dados do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Especialista em Ciência de Dados.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Xavier Martins

Coorientador: Prof. Dr. Paganini Barcellos de Oliveira

Belo Oriente, MG

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R696o Rodrigues, Walquiria Marcia Queiroz.
Otimização do processo de abastecimento de madeira em uma
fábrica de celulose. [manuscrito] / Walquiria Marcia Queiroz Rodrigues. -
2024.
25 f.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Xavier Martins.
Coorientador: Prof. Dr. Paganini Barcellos de Oliveira.
Produção Científica (Especialização). Universidade Federal de Ouro
Preto. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Madeira - Qualidade. 2. Modelos matemáticos. 3. Otimização
matemática. 4. Programação (Matemática). 5. Programação heurística. 6.
Programação linear. I. Martins, Alexandre Xavier. II. Oliveira, Paganini
Barcellos de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 519.8

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Walquíria Márcia Queiroz Rodrigues

Otimização do Processo de Abastecimento de Madeira em Uma Fábrica de Celulose

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Especialização em Ciência de Dados da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Ciência de Dados

Aprovada em 26 de junho de 2024

Membros da banca

Dr. Alexandre Xavier Martins - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Thiago Augusto de Oliveira Silva - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Leandro Coelho Dalvi - Aperam South America

Alexandre Xavier Martins, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/11/2024



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Xavier Martins, CHEFE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, em 23/01/2025, às 12:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0813768** e o código CRC **3EB4874B**.

Agradeço a Deus e dedico esse trabalho a todos os meus familiares, especialmente à minha mãe Geilma, minha filha Alice, meu esposo Rodolfo e à memória do meu pai, Jesus Vidal.

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos às pessoas e instituições que contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento deste trabalho.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família pelo apoio incondicional ao longo deste período de estudo e pesquisa. Seu amor, compreensão e encorajamento foram fundamentais para minha motivação e determinação em alcançar meus objetivos acadêmicos e profissionais.

Aos meus gestores e à minha equipe de colegas de trabalho, expresso minha gratidão pelo ambiente colaborativo e inspirador que compartilhamos.

Por fim, gostaria de agradecer à empresa e a Universidade Federal de Ouro Preto pela oportunidade de aprendizado proporcionada.

Expresso minha profunda gratidão a todos que de alguma forma contribuíram para tornar esta jornada acadêmica e profissional uma experiência enriquecedora e gratificante.

“Inteligência é a capacidade de absorver informação em tempo real. De fazer perguntas que façam sentido. É ter boa memória. É traçar pontes entre assuntos que não parecem estar relacionados e inovar ao fazer essas conexões.” (Bill Gates)

Resumo

Este estudo propõe um modelo de programação matemática capaz de otimizar a destinação da madeira transportada para mesas receptoras de toras ou pilhas de estoque, buscando manter a homogeneidade. A modelagem matemática do problema, baseada em Programação Linear Inteira, visa maximizar a quantidade direcionada às mesas, garantindo que as características permaneçam dentro das metas preestabelecidas. A complexidade do problema decorre da necessidade de considerar diversas características qualitativas e quantitativas da madeira que impactam diretamente na produtividade e qualidade do produto final. O estudo foi dividido em três fases: levantamento operacional, aplicação do modelo matemático e a utilização de uma heurística para refinamento da solução, permitindo ajustes práticos. A metodologia empregou dados de uma programação de transporte interna da empresa e foi validada em três instâncias semanais. O modelo integrou restrições como capacidade das mesas, porcentagens ideais de madeira para mesas e pilhas e parâmetros relacionados à variáveis como densidade básica, TPC (tempo pós-corte) e idade. Os resultados principais deste estudo indicaram uma melhoria na eficiência de utilização das mesas receptoras de madeira, com 100% de atendimento às restrições de idade, TPC e cv (coeficiente de variação) da densidade básica da madeira, enquanto no método atual de alocação para as instância apuradas os resultados fora de 64%, 88% e 79% respectivamente. O modelo mostrou ser suficiente e a ferramenta satisfatória para o propósito que foi criada.

Palavras-chaves: Modelagem matemática, Programação linear inteira, Qualidade da madeira.

Abstract

This study proposes a mathematical programming model capable of optimizing the destination of wood transported to log receiving tables or stock piles, seeking to maintain homogeneity. The mathematical modeling of the problem, based on Integer Linear Programming, aims to maximize the quantity directed to the tables, ensuring that the characteristics remain within the pre-established goals. The complexity of the problem arises from the need to consider several qualitative and quantitative characteristics of wood that directly impact the productivity and quality of the final product. The study was divided into three phases: operational survey, application of the mathematical model and the use of a heuristic to refine the solution, allowing practical adjustments. The methodology used data from the company's internal transport schedule and was validated in three weekly instances. The model integrated restrictions such as table capacity, ideal percentages of wood for tables and stacks and parameters related to variables such as basic density, TPC (post-cutting time) and age. The main results of this study indicated an improvement in the efficiency of using wooden receiving tables, with 100% compliance with age restrictions, TPC and cv (coefficient of variation) of the basic density of wood, while in the current allocation method for the verified instances the results out of 64%, 88% and 79% respectively. The model proved to be sufficient and the tool satisfactory for the purpose for which it was created.

Keywords: Mathematical modeling, Integer linear programming, Wood quality.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Visão do <i>software</i> GAPATIO	3
Figura 2 – Pátio de estocagem de madeira na fábrica	4
Figura 3 – Fluxo operacional simplificado da destinação da madeira	11
Figura 4 – Distribuição da madeira entre mesas receptoras e pilhas de estoque	17
Figura 5 – Distribuição real da madeira entre mesas receptoras e pilhas de estoque	17
Figura 6 – Modelo PLI: Percentual do cv da densidade - Linha I	20
Figura 7 – Modelo PLI: Percentual do cv da densidade - Linha II	21
Figura 8 – Valores reais da operação: Percentual do cv da densidade - Linha I	21
Figura 9 – Valores reais da operação: Percentual do cv da densidade - Linha II	21

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo da Programação de Transporte da Madeira	12
Tabela 2 – Percentual (%) de atingimento da capacidade por mesa receptora de toras . .	19
Tabela 3 – Percentual (%) da entrada de material com a classe de idade fora dos parâmetros	19
Tabela 4 – Percentual (%) da entrada de material com TPC_i extremos por linha	20
Tabela 5 – Coeficiente de variação da densidade básica da madeira	22

Lista de quadros

Quadro 1 – Relação entre material, mesas receptoras e linhas de picagem	12
Quadro 2 – Análise de distribuição por material (m ³)	18

Lista de Algoritmos

1	Heurística para adequação do cv da densidade básica da madeira	16
---	--	----

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo geral	4
1.1.1	Objetivos específicos	4
1.2	Organização do Trabalho	5
2	REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1	Logística da madeira na indústria de celulose	6
2.2	Qualidade da madeira	7
2.3	Modelos matemáticos utilizados na indústria	7
3	METODOLOGIA	9
3.1	Processo de destinação da madeira	10
3.2	Apresentação formal do problema	11
3.3	Conjuntos, parâmetros e variáveis	12
3.4	Formulação linear	13
3.5	Cálculo do coeficiente de variação da densidade básica da madeira	15
4	RESULTADOS	17
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
	REFERÊNCIAS	24

1 Introdução

No Brasil, as indústrias de celulose e papel desempenham um papel significativo na economia e no progresso tecnológico do setor florestal, contribuindo com aproximadamente 67% da receita tributária federal, conforme relatado pelo segmento de florestas cultivadas [Durigan et al. \(2022\)](#).

A madeira possui diversas características qualitativas e quantitativas, variando por tipo de muda plantada (clone), local, tempo de secagem entre outros. Essas características, assim como sua variabilidade, devem ser observadas, pois estão diretamente ligadas à produtividade e qualidade do produto. Conforme [Dias e Simonelli \(2013\)](#), na produção de celulose e papel, a qualidade apresenta forte dependência dos aspectos físicos, químicos e anatômicos da matéria-prima.

No geral, quanto maior for a homogeneidade da madeira, melhor é o processo de produção da celulose. Conforme [Olivetti Neto \(2002\)](#), além do interesse por madeira com melhores aspectos de qualidade, é muito importante que a variabilidade nesta qualidade seja mínima para que sejam evitados distúrbios no processo e para que possam ser garantidos padrões homogêneos no produto final.

Segundo [Olivetti Neto \(2002\)](#), a estabilidade no fornecimento tanto de madeira como de cavacos baseado numa densidade básica média homogênea, um dos índices mais importantes para avaliação da qualidade, de forma que as condições principalmente de cozimento possam permanecer inalteradas ou com variações mínimas para manter o processo e qualidade da polpa estáveis tem sido constantemente buscado pelas empresas.

Por exemplo, se a densidade de lotes de madeira for significativamente distinta, haverá maior demanda por correções químicas que, por sua vez, implica em maiores custos e perda de produção. Conforme [Shimoyama e Barrichelo \(1989\)](#) as características e composição da madeira estão ligadas às características do produto final como rendimento em celulose, resistências físico-mecânicas do papel, produção e qualidade de carvão, entre outros.

Efetivamente, a homogeneidade da matéria-prima bem como as características selecionadas para a madeira resultará em maior qualidade e produtividade e, o não atendimento aos parâmetros segundo [Demuner \(2011\)](#) resultarão na variabilidade e elevação do consumo específico de madeira, instabilidade do processo operacional e também da qualidade do produto, elevando os custos.

Diante dessas dificuldades, a preocupação em organizar a matéria-prima a ser consumida vem desde antes do transporte. Demuner (2011) ressalta a importância para a indústria de celulose do controle constante da qualidade da madeira e necessidade de alinhamento estratégico do abastecimento em função do mapeamento de suas características principais, servindo de base para mensurar os custos. O desafio, portanto, é destinar a madeira de modo a reduzir a variabilidade de suas características contribuindo para uma eficiência operacional.

O controle da madeira nas viagens é feito a partir de Notas de Transporte de Madeira (NTM). Tais notas são documentos legais que descrevem as características da madeira quando estas saem do campo em direção à fábrica. Nesse sentido, um grande desafio é melhorar a alocação da madeira, levando em consideração diversas características da madeira, entre elas a densidade básica da madeira (Db), tempo pós corte (TPC) e idade, além de restrições e especificações do processo.

Segundo Leite (2021) análises mais confiáveis do custo de produção da madeira podem ser possíveis quando agregadas informações de Db, uma vez que essa variável é determinante na estimativa da real produtividade de fibras e pode impactar o custo de transporte da madeira. Ainda no raciocínio de Leite (2021) uma estratégia adotada é baseada na segregação da madeira, atendendo a um limite de especificação do coeficiente de variação diário (cv) da Db.

Para o caso específico da empresa na qual está sendo realizado este trabalho, a madeira é obtida a partir de oito principais regiões: Cocais, Piracicaba, Santa Bárbara, Belo Oriente, Ipaba, Pompéu, Virgíópolis e Sabinópolis. Cada ponto de suprimento de madeira possui características específicas e, portanto, são realizados estudos para seleção de clones específicos para cada região. O resultado são florestas com boa qualidade e produtividade, embora seja importante ressaltar que as madeiras produzidas nessas diversas regiões não são iguais. É normal apresentar características diferentes por diversos fatores e esses são estudados para se determinar os melhores padrões na organização da matéria-prima de forma a atender as demandas da fábrica.

A madeira ao chegar na fábrica é recebida e todas as suas características são imputadas no sistema a partir das NTM. No momento do recebimento os motoristas são direcionados ao local de descarga do material, onde, atualmente há um *software* chamado “GAPATIO”, que possui as informações principais auxiliando na visão macro dos pátios, contemplando 25 pátios com 695 pilhas de estoque, podendo ser observado na Figura 1.

Figura 2 – Pátio de estocagem de madeira na fábrica



Fonte: Captura de imagem da empresa.

Os processos necessitam de agilidade e precisão na manipulação dos dados objetivando a melhor utilização de ferramentas e recursos no fluxo produtivo. Como as características da matéria-prima têm impacto na produção de celulose a pesquisa se torna relevante pois com a otimização das variáveis será possível adotar uma abordagem proativa e orientada a dados criando decisões estratégicas para uma destinação otimizada do carregamento de madeira para as mesas receptoras, reduzindo custos e elevando a qualidade do produto.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo de programação matemática, que juntamente com uma heurística construtiva, seja capaz de otimizar a destinação das NTM para as mesas receptoras de toras de uma empresa produtora de celulose, de forma a assegurar que o coeficiente de variação da Db da madeira direcionada para as linhas de produção permaneça dentro da meta de 7% e a variação do TPC e idade sejam inferior a 10%.

1.1.1 Objetivos específicos

Para cumprimento do objetivo geral é necessário atender aos seguintes objetivos específicos:

- Identificar as variáveis que representam as decisões a serem tomadas no processo;
- Identificar as restrições que limitam as decisões que podem ser tomadas;
- Construir um modelo de programação matemática capaz de representar as características lineares propostas;
- Propor uma heurística capaz de ajustar as soluções do modelo matemático e torná-las viáveis para o contexto do problema real.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 refere-se a introdução onde é apresentada a descrição do problema estudado e o objetivo do trabalho. O Capítulo 2 é composto pela revisão contendo assuntos relacionados à logística e transporte de madeira na indústria de celulose, qualidade da madeira e exemplos de modelos matemáticos existentes na indústria.

No Capítulo 3 de metodologia, há a descrição do processo de destinação da madeira, a apresentação formal do problema e o modelo matemático. O Capítulo 4 destina-se à análise dos resultados computacionais e no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão da Literatura

2.1 Logística da madeira na indústria de celulose

A empresa estudada produz celulose a partir de fibras curtas de Eucalipto pelo processo *Kraft*, que, segundo Olivetti Neto (2002), é caracterizado pelo uso de licor de cozimento composto principalmente de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S).

Devido a grande área de atuação e variações de relevo e clima é a espécie ideal pois conforme Olivetti Neto (2002), o *Eucalyptus*, do grupo das folhosas, é a espécie comumente utilizada para obtenção de celulose por sua adaptabilidade às condições climáticas e regionais. Além disso, a madeira de folhosas deslignifica-se mais rapidamente e possui menor quantidade de lignina.

A logística desempenha um papel importante na produção de celulose, sendo a ponte essencial entre o processo florestal e fabril. Segundo Berger *et al.* (2003) esse complexo sistema apresenta grande número de variáveis, tais como condições climáticas, distâncias entre a floresta e a unidade de processamento da madeira, custos de manutenção, combustível, lubrificantes, pneus, tarifas, entre outros.

Dado que o setor florestal no Brasil tem uma significativa importância nos aspectos econômicos, sociais e ambientais, a busca por formas de diminuir despesas se torna um aspecto crucial para as empresas e isso as impulsiona constantemente a procurarem por métodos que as tornem mais eficientes (DINIZ *et al.*, 2020).

Berger *et al.* (2003) destacam que o transporte de madeira é uma das atividades que mais oneram dentro de uma empresa florestal. Portanto, precisa ser meticulosamente coordenado para garantir a operacionalidade eficiente, controle de custos e atendimento às demandas quantitativas da fábrica, sem comprometer a qualidade da matéria-prima fornecida.

No Brasil, a maioria do transporte de produtos florestais ocorre através de estradas, principalmente devido à vasta rede viária, disponibilidade de uma variedade de veículos e custos de instalação relativamente baixos em comparação com outros meios de transporte disponíveis (MACHADO; LOPES; BIRRO, 2009). Na empresa estudada o modal rodoviário representa aproximadamente 70% do escoamento, enquanto 30% utiliza o modal ferroviário. Este cenário destaca desafios significativos, como a infraestrutura de estradas sujeitas a limitações, condições climáticas imprevisíveis e o relevo acidentado, afetando diretamente a fluidez do processo logístico.

A manipulação da matéria-prima é uma tarefa crucial. Os itens precisam ser recebidos, movimentados, separados e agrupados de maneira a satisfazer as demandas da fábrica. Tanto a mão de obra quanto o investimento em equipamentos são elementos significativos dos gastos envolvidos na logística (BOWERSOX; CLOSS, 2004). Para Durigan *et al.* (2022) o pátio de madeira é a fase inicial da atividade industrial abrangendo desde o recebimento e armazenamento das toras colhidas até a transformação da biomassa em cavacos, que são então processados na etapa de polpação.

Conforme Gonçalves *et al.* (2016) o setor de celulose e papel vem passando por grandes inovações e avanços tecnológicos, esta gigantesca transformação faz com que sejam intensificados trabalhos de pesquisas e controles da matéria-prima para fabricação, sendo fundamental um controle rigoroso da matéria-prima durante o transporte, armazenamento e sortimento da madeira previamente ao processo de cozimento.

2.2 Qualidade da madeira

Os principais parâmetros estudados relacionados a qualidade da madeira foram a densidade básica da madeira (Db), o tempo pós Corte (TPC) e a idade da madeira. A densidade por definição segundo Leite (2021) é a massa seca de determinado volume de madeira dividido pelo seu volume saturado. Esse parâmetro pode ser influenciado pelo material genético, idade do plantio (aumenta com a idade do povoamento) e o ambiente de cultivo (locais com menor estresse hídrico, térmico e nutricional apresentam menor densidade).

O TPC pode ser retratado como o período que a árvore leva para ser consumida após o abate (STEIN, 2010). Esse indicador é contabilizado separado por classes, as classes mais sensíveis são às de 0 à 30 dias de TPC e acima de 150 dias.

A idade da madeira refere-se a diferença da data de corte da madeira e a data de plantio. Conforme Stein (2010) uma árvore apresenta variação das características físico-químicas dependendo da idade no momento do corte. A idade considerada ideal pelos padrões da empresa é de sete anos e idades inferiores a 5,99 anos devem entrar de forma diluída no sistema para não gerar perdas no processo.

2.3 Modelos matemáticos utilizados na indústria

Na literatura são encontradas diversas aplicações de otimização de processos florestais. Ferreira *et al.* (2019) com o objetivo de identificar as melhores regiões para alocação de fomentos florestais e sistemas de transporte mais eficientes, desenvolveram um modelo matemático para determinar a quantidade de área em cada região de atuação, reduzindo o custo da produção e considerando os níveis alvo de produção de madeira a partir de um planejamento de 6 anos.

Mendonça *et al.* (2022) apresentou um problema onde a formulação é o escalonamento de tarefas silviculturais com restrições de recursos e múltiplos modos de execução. Foram comparadas duas estratégias, a Programação Linear Inteira e *Simulated Annealing*.

Berger *et al.* (2003) pesquisou sobre o planejamento do transporte florestal de madeira utilizando programação linear para determinação das melhores rotas a serem seguidas por caminhões, onde, em uma situação de diversas origens e um único destino, seja analisado o número ideal de viagens, carga ótima por veículo, menor custo por unidade de volume e quilometragem máxima mensal.

Da Silva *et al.* (2018) desenvolveram modelos de programação linear inteira (PLI) para melhoria do processo de planejamento de manejo florestal sustentável na Amazônia. A função objetivo focava na minimização da distância entre as árvores exploradas e os pátios de estocagem de madeira.

Dentre os trabalhos revisados, destaca-se também outros processos industriais como de Fernandes *et al.* (2013) que apresentou um modelo de otimização-simulação aplicado no setor de cilindros para laminação de uma siderúrgica. O modelo PLI considerou apenas fatores essenciais do problema, enquanto os detalhes foram incluídos no modelo de simulação.

Hamad e Gualda (2014) trabalhou uma abordagem para localização de instalações em redes logísticas globais, com foco especial no tratamento dos estoques e impostos, aplicada em grandes empresas transnacionais do segmento agrícola operando no Brasil. O modelo desenvolvido supõe uma empresa contribuinte do ICMS, sem o direito de usos alternativos dos créditos de ICMS, sendo o objetivo a minimização de custos.

3 Metodologia

Esta pesquisa adota uma abordagem quantitativa. Segundo [Marconi e Lakatos \(2017\)](#) o aspecto quantitativo permite um tratamento objetivo, matemático e estatístico. A parte subjetiva, qualitativa, é focada na análise operacional, verificando a viabilidade da segregação em um cenário real. Sob o ponto de vista dos objetivos, esta pesquisa pode ser classificada como empírico-normativa. [Barbetta \(2012\)](#) ressalta que nesse tipo de pesquisa as hipóteses formuladas são testadas, pois estas, quando comprovadas estatisticamente, passam a servir de suporte para outras pesquisas.

Em se tratando dos procedimentos metodológicos, pode-se dizer que a pesquisa foi dividida em três etapas principais. A primeira etapa envolveu o levantamento do processo e dos parâmetros operacionais, a segunda etapa consistiu na elaboração de um modelo matemático para maximizar a quantidade de madeira destinada às mesas receptoras de toras, enquanto a terceira foi a aplicação de uma heurística que a partir do resultado da PLI, buscou nova solução para atender os parâmetros referentes ao coeficiente de variação da densidade básica da madeira.

Para garantir a mensurabilidade dos dados, foram adotadas medidas como a definição clara das variáveis, a identificação das variáveis dependentes e independentes, a padronização dos procedimentos de coleta de dados e o estabelecimento de indicadores de desempenho alinhados aos objetivos da pesquisa. Para [Gil \(2002\)](#), diante de um problema de pesquisa, é fundamental apresentar uma solução viável, uma hipótese que seja testável e que possa potencialmente resolver o problema. Portanto, foi examinado como a otimização afetou diretamente as características relacionadas à qualidade da madeira direcionada para as linhas de produção.

A coleta de dados baseou-se na Programação Semanal de Transporte, um documento gerado pela empresa que seleciona o transporte para a fábrica, proveniente de várias origens (sejam elas do campo ou pátios intermediários), levando em consideração as melhores características da madeira para consumo.

A avaliação dos resultados desempenha um papel fundamental na otimização de estratégias propostas. Para [Marconi e Lakatos \(2017\)](#) trata-se da interpretação dos dados para confirmar ou refutar as hipóteses estabelecidas. Para isso, é necessário analisar as variáveis de decisão para compreender o comportamento do sistema, a função objetivo para determinar se o objetivo do problema foi alcançado e verificar se todas as restrições foram satisfeitas na solução ótima.

Para validar o modelo, foram geradas três instâncias, cada qual representando uma semana de transporte, dos períodos de 15/02/24 a 21/02/24, 11/01/24 a 17/01/24 e 28/12/23 a 03/01/24. Inicialmente, as considerações foram feitas sem as restrições relacionadas ao coeficiente de variação da densidade básica da madeira devido à sua complexidade.

A ferramenta utilizada, Google Colab (versão 3), é um *software* de aplicação em nuvem disponibilizado em versão gratuita com memória RAM do sistema de 12.7 GB. Com a introdução de muitas variáveis pode eventualmente gerar problemas de memória. Devido à limitação, os cenários foram reduzidos a 57 talhões de origens. O processo foi conduzido em linguagem Python junto ao resolvidor comercial Gurobi.

Para verificar os resultados operacionais, foi utilizado o sistema de planejamento empregado na empresa, SAP S/4 HANA (versão 1909), sendo, uma transação referente ao consumo das linhas de picagem e o relatório do módulo GPF (Gestão de Processo Florestal), “Relatório de Densidade e RPV”.

3.1 Processo de destinação da madeira

No processo florestal da produção de celulose, que se inicia no campo e vai até a chegada dessa madeira na fábrica, há planejamento, produção das mudas, cultivo no campo, corte e baldeio. Nesse fluxo está englobado o Manejo Florestal, que são o conjunto de atividades relacionadas desde o preparo do solo até o corte do eucalipto. Conforme [Leite \(2021\)](#) durante a seleção de clones, a utilização de índices de produtividade que agreguem os valores de Db e também outras variáveis, como rendimento depurado e consumo de reagentes no branqueamento são mais eficientes do que a simples utilização do crescimento volumétrico como critério de seleção.

Ressalta-se que toda a madeira da empresa tem rastreabilidade de suas características, desde a colheita do eucalipto até a entrega da celulose, também conhecido como Cadeia de Custódia.

A etapa subsequente ao baldeio é o transporte da madeira. Seu planejamento segue o orçamento florestal anual elaborado a partir do plano de sequência de corte e sequenciamento de transporte. A partir deste orçamento, são analisados os estoques e questões pontuais (dimensionamento de frota, impossibilidade de transporte de algum projeto por dificuldades de acesso, condições climáticas, entre outros) para a realização de uma programação de transporte mensal. Posteriormente são realizadas as programações semanais quando são verificados especificamente os parâmetros previamente estudados da qualidade da madeira. Essas programações são acordadas com monitores e supervisores de campo objetivando a menor variabilidade com as melhores características possíveis.

Os caminhões de madeira vêm de diversas origens para descarga, ao ingressar na empresa é realizada e registrada a pesagem do veículo carregado na balança rodoviária na empresa. Na sequência é realizada a atividade de desamarração de cargas e posteriormente o motorista se direciona para o Recebimento de Madeira, onde os dados das Notas de Transporte de Madeira (NTM) são verificados.

A madeira então é recebida e todas as suas características são imputadas no sistema a partir das NTM. Com base nas informações presentes na nota e consultas ao *software* GAPATIO, que apresenta as informações principais auxiliando na visão macro dos pátios e características como densidade, idade e TPC, o motorista é orientado para o destino da descarga, que pode ser para consumo direto em uma das mesas dos picadores ou para estoque em um dos pátios.

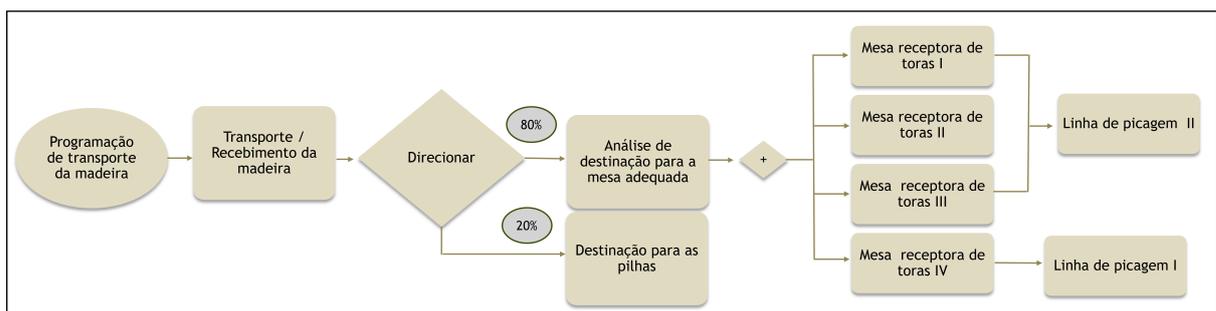
Após o recebimento, o motorista realiza uma análise visual das condições da carga e segue para a medição no *Logmeter*, que é um sistema de medição de madeira integrado, composto por sensores laser scanner 3D e um *software* de aplicação. Logo depois, o motorista dirige-se para a área de descarga.

O setor de descarga dos caminhões normalmente opera com oito guias, sendo uma reserva. Após finalizada essa atividade caso tenha sido realizada em uma das mesas a madeira inicia o processo de fabricação, onde o primeiro resultado serão os cavacos. Conforme Olivetti Neto (2002) as facas do picador penetram como cunhas na madeira, cortando as fibras no sentido transversal, fatiando as toras, esse é o processo de redução das toras em cavacos por picadores de disco.

A próxima etapa a ser seguida pelo caminhão é a limpeza da carroceria. Essa etapa garante a remoção de resíduos no pátio de limpeza de carretas. Logo depois, pode seguir para o abastecimento de combustível ou direto para a pesagem vazia. O veículo então está liberado para nova viagem.

A pesquisa está englobada na etapa do recebimento e destinação da madeira para as linhas de picagem, buscando a otimização da atividade de segregação que atualmente é realizada a partir da análise dos recebedores, o resumo do fluxo de operação é ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxo operacional simplificado da destinação da madeira



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Apresentação formal do problema

O trabalho objetivou maximizar a quantidade de madeira em um conjunto de Linhas de Picagem. As linhas são abastecidas por mesas receptoras, que, por sua vez, são abastecidas com o material vindo de diversas origens.

No problema específico foram consideradas duas linhas de produção, denominadas Linha I e Linha II. As mesas serão designadas por I, II, III, IV. As mesas I e II, recebem madeira CCC (celulose com casca), as III e IV recebem a CSC (celulose descascada), a mesa IV é destinada à Linha I e as mesas I, II, III à Linha II. As relações entre as mesas receptoras e o material atribuído além das linhas de destinação são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Relação entre material, mesas receptoras e linhas de picagem

Mesa	Material	Linha
I	CCC	Linha II
II	CCC	Linha II
III	CSC	Linha II
IV	CSC	Linha I

Em relação à qualidade, a madeira recebida na fábrica deve seguir determinados parâmetros definidos por estudos anteriores na empresa. Sendo o coeficiente de variação (cv) da Db inferior a 7% do total abastecido nas linhas e os percentuais de idade média da classe inferior a 5,99 anos e TPC médio das classes inferior a 30 dias e superior a 150 dias menor que 10%. Além desses parâmetros, por estratégia da empresa, 80% da madeira deve ser direcionada às mesas e 20% seja depositada nas pilhas.

A Programação de Transporte da Madeira, um relatório interno, realizado semanalmente que apresenta diversos dados, serviu de base para determinar a entrada da madeira no modelo, conforme dados resumidos na Tabela 1. O modelo, ao ser resolvido, indica para onde a madeira recebida de cada origem deveria ser direcionada e em que quantidade.

Região	Projeto	Material	Talhão	TPC (dias)	DB (Kg/m ³)	Classe	Idade (Anos)	m ³ (dia 1)	m ³ (dia 2)	m ³ (dia 3)	m ³ (dia 4)	m ³ (dia 5)	m ³ (dia 6)	m ³ (dia 7)
RDIP	Nome I	CCC	RDIPPD00477P16-001	57	472	7 a 7,99		2.000	1.800	0	0	0	0	0
RDIP	Nome I	CCC	RDIPPD00477P16-003	61	477	7 a 7,99		0	200	2.000	1.700	0	0	0
RDIP	Nome I	CCC	RDIPPD00477P16-004	62	493	7 a 7,99		0	0	0	300	1.100	0	0
RDIP	Nome I	CCC	RDIPPD00477P16-008	60	489	7 a 7,99		0	0	0	0	900	2.000	200
RDIP	Nome I	CCC	RDIPPD00477P16-009	57	481	7 a 7,99		0	0	0	0	0	0	1.800
RDBO	Nome II	CSC	RDBOBA00469P17-454	160	552	6,6 a 6,99		2.000	1.000	0	0	0	0	0

Tabela 1 – Resumo da Programação de Transporte da Madeira

3.3 Conjuntos, parâmetros e variáveis

Considerou-se no modelo os seguintes conjuntos, parâmetros e variáveis:

• Conjuntos:

M : Conjunto de mesas receptoras de toras de madeira indexados por m ;

L : Conjunto de linhas de picagem indexados por l , em que $L(l)$ retorna o conjunto de mesas pertencente a Linha l ;

D : Conjunto de dias de entrega da madeira na fábrica indexados por d ;

I : Conjunto de talhão de origem indexados por i .

- Parâmetros de entrada:

CAP_m : Capacidade da mesa m ;

$Q_{i,d}$: Quantidade de madeira disponível para cada talhão de origem i no dia d ;

$Densidade_i$: Densidade da madeira na origem i ;

TPC_i : Tempo pós corte da madeira, para $i = \begin{cases} 1, & \text{se dentro dos parâmetros,} \\ 0, & \text{se fora dos parâmetros;} \end{cases}$

id_i : Idade da madeira, para $i = \begin{cases} 1, & \text{se dentro dos parâmetros,} \\ 0, & \text{se fora dos parâmetros;} \end{cases}$

T_i : Material transportado, para $i = \begin{cases} 1, & \text{se madeira CCC} \\ 2, & \text{se madeira CSC;} \end{cases}$

- Variáveis de decisão:

$x_{i,d,m}$: Quantidade de madeira vinda da origem i no dia d destinado a mesa m ;

$p_{i,d}$: Quantidade de madeira vinda da origem i no dia d para a pilha de estocagem;

3.4 Formulação linear

O modelo matemático (3.1)-(3.12) apresenta a função objetivo em (3.1) e busca maximizar a quantidade de madeira para as mesas receptoras de toras.

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{m \in M} x_{i,d,m} \quad (3.1)$$

$$\text{s.a.:} \quad \sum_{m \in M | m < 3} x_{i,d,m} + p_{i,d} = Q_{i,d} \quad \forall d \in D, i \in I, T_i = 1 \quad (3.2)$$

$$\sum_{m \in M | m < 3} x_{i,d,m} = 0 \quad \forall d \in D, i \in I, T_i = 2 \quad (3.3)$$

$$x_{i,d,3} + x_{i,d,4} + p_{i,d} = Q_{i,d} \quad \forall d \in D, i \in I, T_i = 2 \quad (3.4)$$

$$x_{i,d,3} + x_{i,d,4} = 0 \quad \forall d \in D, i \in I, T_i = 1 \quad (3.5)$$

$$\sum_{m \in M} x_{i,d,m} + p_{i,d} \leq Q_{i,d} \quad \forall d \in D, i \in I \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in I} p_{i,d} \geq 0.2 \sum_{i \in I} Q_{i,d} \quad \forall d \in D \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in I} x_{i,d,m} \leq CAP_m \quad \forall d \in D, m \in M \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in I | TPC_i = 2} x_{i,d,4} \leq 0.1 \times \sum_{i \in I} x_{i,d,4} \quad \forall d \in D \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in I | TPC_i = 2} \left(\sum_{m \in M | m \neq 4} x_{i,d,m} \right) \leq 0.1 \times \sum_{i \in I} \left(\sum_{m \in M | m \neq 4} x_{i,d,m} \right) \quad \forall d \in D \quad (3.10)$$

$$\sum_{i \in I | id_i = 2} x_{i,d,4} \leq 0.1 \times \sum_{i \in I} x_{i,d,4} \quad \forall d \in D \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in I | id_i = 2} \left(\sum_{m \in M | m \neq 4} x_{i,d,m} \right) \leq 0.1 \times \sum_{i \in I} \left(\sum_{m \in M | m \neq 4} x_{i,d,m} \right) \quad \forall d \in D \quad (3.12)$$

As restrições (3.2) garantem que todo material com casca de cada dia e de cada origem, só pode ir para as mesas 1 e 2. Em (3.3) foi determinado que para as mesas 1 e 2, não pode ocorrer a entrada de material sem casca. (3.4) asseguram que o material sem casca ($T_i = 2$) deve ir para as mesas 3 e 4 ou para pilha e (3.5) definem que para as mesas 3 e 4, não entra material com casca.

As equações (3.6) controlam a quantidade de material em cada dia em cada origem, (3.7) objetiva determinar que para cada dia, a pilha deve receber pelo menos 20% do material, (3.8) ditam que em cada dia, a capacidade das mesas deve ser respeitada.

As formulações (3.9), (3.10) buscam manter o percentual da entrada de madeira com TPC_i das classes críticas dentro do limite de 10% por linha de picagem. (3.9) foca na mesa 4, no dia d , pois essa mesa alimenta a linha I, enquanto, a (3.10) é concentrada em todas as outras mesas, exceto a mesa 4, no dia d , pois alimentam a linha II. (3.11) e (3.12) atestam que em cada dia a capacidade das mesas deve ser respeitada. A primeira considerando a mesa 4 para representar a linha I, no dia d e todas as outras mesas representando a linha 2, exceto a mesa 4, no dia d .

3.5 Cálculo do coeficiente de variação da densidade básica da madeira

O cálculo do coeficiente de variação da densidade básica da madeira é feito a partir de equações não-lineares. Portanto, são descritas as variáveis e equações deste cálculo nesta seção.

- Variáveis de decisão:

$dpp_{d,l}$: Desvio Padrão Ponderado no dia d na linha l ;

$mp_{d,l}$: Média Ponderada no dia d na linha l .

As restrições(3.13) garantem que a razão a Db em cada dia em cada linha vai ser respeitada. Para facilitar o entendimento do cálculo iremos apresentar algumas variáveis auxiliares para o cálculo do dpp e da mp . Para calcular a mp iremos usar a variável $v_{i,d,l}$ que é dada em função da origem i , dia d e linha l . Esta variável é calculada pela equação (3.14). Dessa forma a mp é dada pelas Equações (3.15).

$$\frac{dpp_{d,l}}{mp_{d,l}} \leq 0.07 \quad \forall d \in D, l \in L \quad (3.13)$$

$$v_{i,d,l} = \left(\sum_{m \in L(l)} x_{i,d,m} \times Densidade_i \right) / \sum_{m \in L(l)} x_{i,d,m} \quad \forall i \in I, d \in D, l \in L \quad (3.14)$$

$$mp_{d,l} = \sum_{i \in I} v_{i,d,l} \quad \forall d \in D, l \in L \quad (3.15)$$

$$z_{i,d,l} = (Densidade_i - v_{i,d,l})^2 \times \sum_{m \in L(l)} x_{i,d,m} \quad \forall i \in I, d \in D, l \in L \quad (3.16)$$

$$dpp_{d,l} = \sqrt{\frac{\sum_{i \in I} z_{i,d,l}}{\sum_{i \in I} \sum_{m \in L(l)} x_{i,d,m}}} \quad \forall d \in D, l \in L \quad (3.17)$$

Ademais, para o cálculo do $dpp_{d,l}$ é introduzidas a variável $z_{i,d,l}$ dada em função da origem i , dia d e linha l . Estas variáveis são calculadas pelas equações (3.16). Por fim, o $dpp_{d,l}$ é dado por (3.17).

Apesar de alguns *softwares*, como Google Colab, serem eficientes para otimização, resolver equações não-lineares diretamente pode ser desafiador devido à complexidade. Ao gerar o modelo de programação linear inteira foram utilizadas duas ferramentas que não foram capazes de resolver essas equações, logo, os valores relacionados à densidade não foram otimizados, gerando resultados aleatórios. Mediante a importância do atendimento da meta para esse indicador, foi criado um método heurístico objetivando gerar uma solução que atenda à restrição. Ela parte da solução ótima resultante da PLI selecionando os pontos que o cv da Db ultrapassa os limites estipulados (7% de variação).

Entre o material que entrou nas linhas, sendo que $x_{i,d,m}$ representa a quantidade de madeira do tipo i no dia d e na mesa m , foram determinadas a maior e a menor densidade, visto que teoricamente teriam o maior impacto no coeficiente de variação entre todas as variáveis $x_{i,d,m}$.

Posteriormente, foi verificado qual densidade, quando retirada, causava impacto para a melhoria do cv, sendo temporariamente removidas cada densidade $x_{i,d,m}$ e recalculado o cv para verificar qual remoção causaria o maior aumento no cv.

Após determinada a densidade de $x_{i,d,m}$ que causa o maior aumento no cv, essa é atribuída como a densidade a ser retirada, é realizada a remoção e a restrição é atendida. Buscando uma melhoria na solução obtida, visto que há redução do volume abastecido na mesa, tentou-se substituir por um volume correspondente ao retirado utilizando os valores que na PLI foram destinados às pilhas.

Para encontrar os volumes correspondentes de madeira que poderiam substituir, foram respeitados o dia, a mesa, o material, a idade e TPC_i correspondentes a entrada anteriormente retirada. Na seleção foram priorizadas densidades menores para substituir densidades maiores retiradas, e vice-versa. Posteriormente ocorreram as substituições até o volume retirado de madeira. O pseudoalgoritmo da heurística aplicada pode ser visualizado no Algoritmo 1.

Algoritmo 1: Heurística para adequação do cv da densidade básica da madeira

1 função *Heurística_Abastecimento*

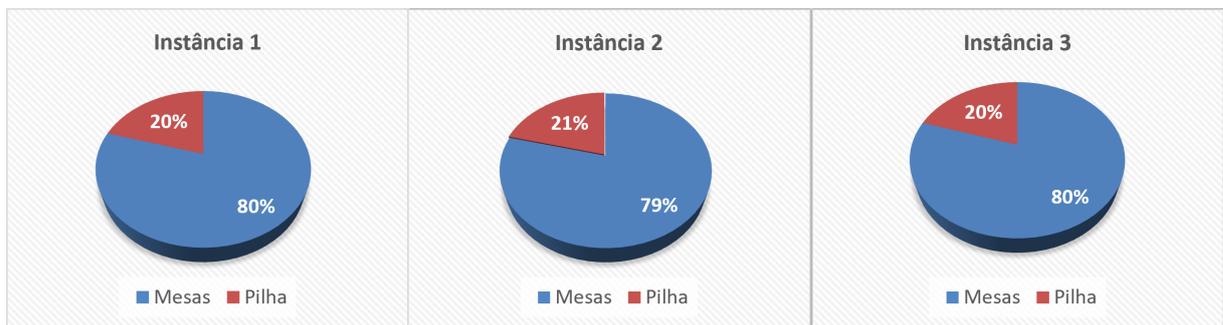
- 2 Determinar a maior e a menor densidade;
 - 3 Verificar qual densidade, quando retirada, causa impacto para a melhoria do coeficiente de variação (cv);
 - 4 Retirar o apontamento correspondente à densidade que causa maior impacto;
 - 5 Utilizar os valores que foram destinados às pilhas e tentar substituir por até no máximo o volume que foi retirado (quando uma densidade maior for retirada, buscar por densidades menores, quando uma densidade menor for retirada, buscar por densidades maiores para a substituição);
 - 6 **retorna** solução atualizada.
-

4 Resultados

Foi realizada a modelagem do problema como programação Linear Inteira, utilizando linguagem de programação Python. Foram gerados três cenários baseados em uma programação de transporte realizada internamente na empresa, e o modelo buscou otimizar a distribuição da madeira transportada entre as mesas e linhas de picagem.

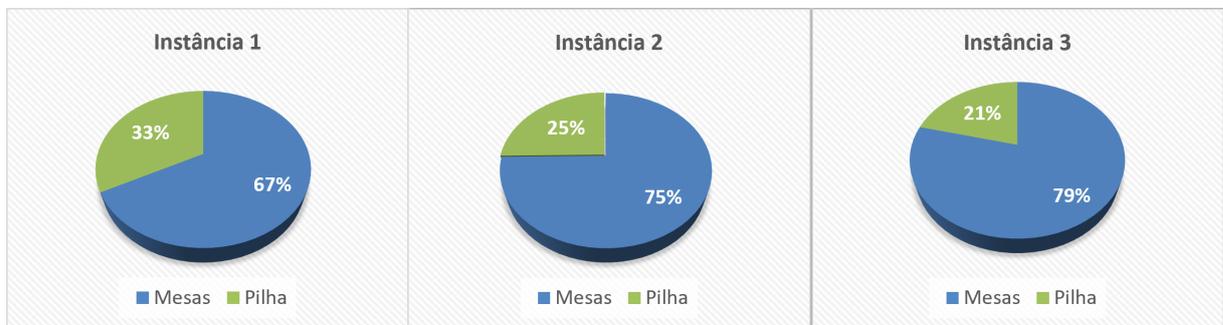
Como resultado do modelo, todo o volume programado para chegar à fábrica foi segregado. A distribuição do material entre as mesas e as pilhas de picagem pode ser analisada na Figura 4, onde, como parâmetro 80% do material é destinado as mesas e os 20% restantes para as pilhas. Os valores reais referentes aos mesmos períodos das instância foi copilado para comparação dos cenários, podendo ser visualizados na Figura 5. Nos resultados do modelo uma instância apresentou variação no parâmetro, enquanto no real em nenhum período foi atingido o balanço ideal.

Figura 4 – Distribuição da madeira entre mesas receptoras e pilhas de estoque



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 5 – Distribuição real da madeira entre mesas receptoras e pilhas de estoque



Fonte: Elaborado pela autora.

O Quadro 2 busca demonstrar que as restrições por material foram respeitadas na modelagem, onde as mesas I e II deveriam utilizar madeira com casca e as mesas III e IV a madeira descascada. São apresentados também os valores reais da operação, onde, já eram esperados que os parâmetros estivessem sendo atendidos, visto que cada mesa só pode receber determinado material.

Quadro 2 – Análise de distribuição por material (m³)

Instância	Mesa	Valores Modelo		Valores Reais	
		Volume CCC	Volume CSC	Volume CCC	Volume CSC
1	1	✓		✓	
1	2	✓		✓	
1	3		✓		✓
1	4		✓		✓
2	1	✓		✓	
2	2	✓		✓	
2	3		✓		✓
2	4		✓		✓
3	1	✓		✓	
3	2	✓		✓	
3	3		✓		✓
3	4		✓		✓

Os resultados do percentual de atingimento da capacidade das mesas modelado e da situação operacional real, podem ser verificados na Tabela 2. Observa-se que a restrição estabelecida para a capacidade foi respeitada, como parâmetro foi utilizado o consumo médio real referente ao ano de 2023 por mesa receptora, não ultrapassando o limite em nenhum dia, já nos resultados do cenário real são ultrapassados. Além disso, é possível observar uma tendência de linearização do abastecimento no modelo quando comparado ao cenário real.

Tabela 2 – Percentual (%) de atingimento da capacidade por mesa receptora de toras

Origem	Instância	Mesa	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Total
Modelo PLI	1	1	66	21	69	100	100	100	100	79
Modelo PLI	1	2	100	100	100	100	100	100	100	100
Modelo PLI	1	3	49	74	44	28	100	100	100	71
Modelo PLI	1	4	100	100	100	100	59	69	67	85
Modelo PLI	2	1	100	100	100	100	26	92	76	85
Modelo PLI	2	2	100	100	100	42	4	100	100	78
Modelo PLI	2	3	92	100	100	100	13	100	100	86
Modelo PLI	2	4	14	10	1	25	100	12	17	26
Modelo PLI	3	1	41	0	51	62	100	77	99	62
Modelo PLI	3	2	69	100	67	74	64	65	50	70
Modelo PLI	3	3	76	74	71	72	77	87	86	77
Modelo PLI	3	4	96	100	97	92	84	84	83	91
Real Operação	1	1	87	50	32	49	87	130	111	78
Real Operação	1	2	30	54	51	43	64	64	12	45
Real Operação	1	3	5	63	146	109	99	84	105	87
Real Operação	1	4	66	63	93	96	69	36	57	68
Real Operação	2	1	140	111	153	87	94	69	85	106
Real Operação	2	2	42	99	52	74	71	84	93	74
Real Operação	2	3	39	64	81	65	63	51	67	62
Real Operação	2	4	85	70	14	19	39	58	57	49
Real Operação	3	1	61	76	47	82	84	106	99	79
Real Operação	3	2	58	89	49	82	73	37	101	70
Real Operação	3	3	22	124	107	131	64	80	53	83
Real Operação	3	4	129	73	62	106	73	51	97	84

Na Tabela 3 é apresentado o percentual de entrada da madeira com a idade fora dos parâmetros. A meta definida para essa restrição foi de até 10% do volume abastecido por linha da classe de até 5,99 anos. O cenário modelado em nenhum dia ultrapassou os limites, superando o operacional.

Tabela 3 – Percentual (%) da entrada de material com a classe de idade fora dos parâmetros

Origem	Instância	Linha	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
Modelo PLI	1	Linha I	0	0	0	0	10	10	0
Modelo PLI	1	Linha II	2	6	4	0	0	0	0
Modelo PLI	2	Linha I	10	10	10	10	0	10	10
Modelo PLI	2	Linha II	0	0	10	10	10	0	0
Modelo PLI	3	Linha I	0	0	0	0	0	0	0
Modelo PLI	3	Linha II	0	0	0	1	0	10	0
Real Operação	1	Linha I	3	8	2	0	5	15	21
Real Operação	1	Linha II	0	0	5	9	8	13	19
Real Operação	2	Linha I	5	1	0	1	4	1	1
Real Operação	2	Linha II	4	8	8	8	5	8	10
Real Operação	3	Linha I	9	3	3	0	8	1	3
Real Operação	3	Linha II	0	11	2	0	2	0	3

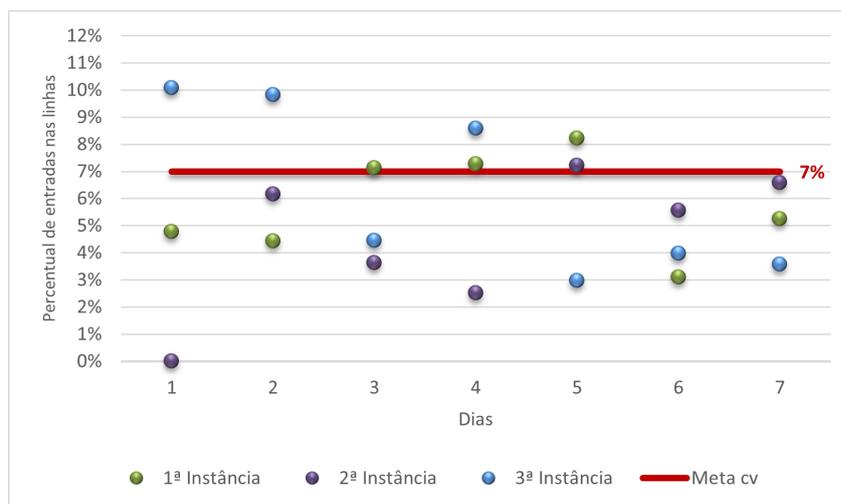
Na Tabela 4 é apresentado o percentual de entrada da madeira com o TPC_i fora dos parâmetros, onde a soma das classes de 0 a 30 dias e acima de 150 dias não devem ultrapassar 10% do abastecimento diário por linha de picagem. Os resultados demonstram que na distribuição do modelo a restrição foi respeitada, na operação real ocorreram valores fora do estipulados.

Tabela 4 – Percentual (%) da entrada de material com TPC_i extremos por linha

Origem	Instância	Linha	Dia						
			1	2	3	4	5	6	7
Modelo PLI	1	Linha I	1	1	2	2	10	10	10
Modelo PLI	1	Linha II	0	10	10	10	1	10	10
Modelo PLI	2	Linha I	10	10	10	9	0	10	10
Modelo PLI	2	Linha II	0	10	10	10	8	0	0
Modelo PLI	3	Linha I	2	2	1	0	0	0	0
Modelo PLI	3	Linha II	2	0	0	0	0	0	0
Real Operação	1	Linha I	28	30	21	46	33	30	35
Real Operação	1	Linha II	8	13	17	19	2	14	9
Real Operação	2	Linha I	0	6	4	2	0	8	0
Real Operação	2	Linha II	5	5	1	0	0	3	5
Real Operação	3	Linha I	5	3	6	0	0	5	1
Real Operação	3	Linha II	16	5	6	25	13	10	11

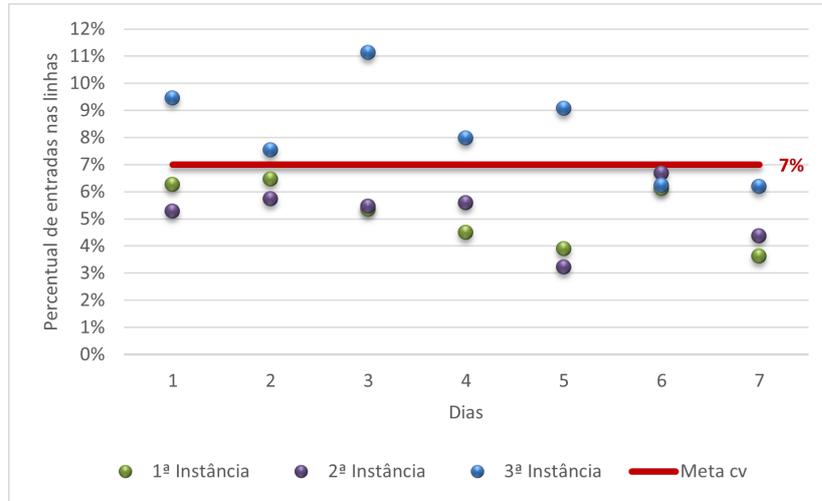
Em relação a densidade básica da madeira os valores foram gerados aleatoriamente na modelagem, portanto, era esperado um comportamento acima do limite estipulado para o cv (7%). Os dados foram contabilizados por linha de produção e os resultados podem ser visualizados nas Figuras 6 e 7. Ressaltado que os valores operacionais reais referentes as instâncias foram contabilizados e também não atenderam à restrição, como apresentados nas figuras 8 e 9.

Figura 6 – Modelo PLI: Percentual do cv da densidade - Linha I



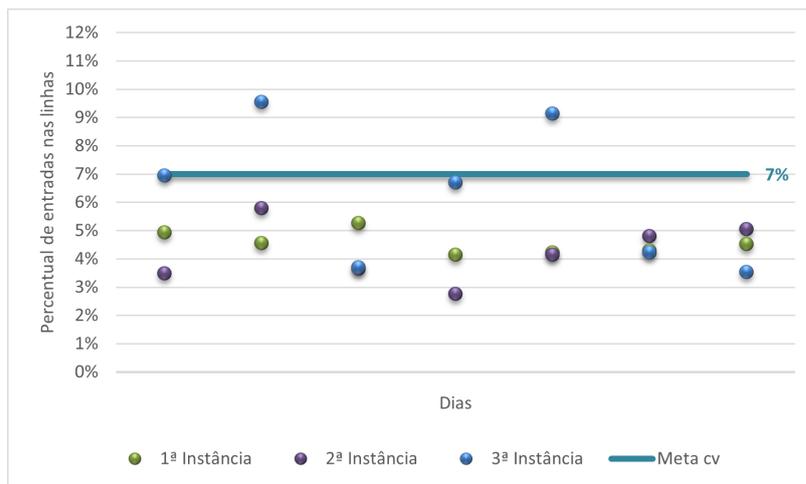
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 7 – Modelo PLI: Percentual do cv da densidade - Linha II



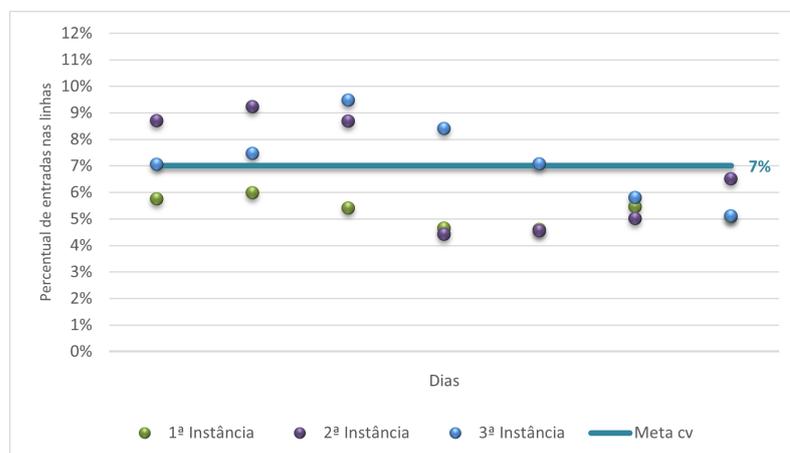
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 8 – Valores reais da operação: Percentual do cv da densidade - Linha I



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 9 – Valores reais da operação: Percentual do cv da densidade - Linha II



Fonte: Elaborado pela autora.

Para refinar a solução obtida na PLI foi aplicada uma heurística. Na Tabela 5 são apresentados os resultados do cv da Db resultante da PLI e após a aplicação da heurística. Todos os resultados foram corrigidos atingindo até o máximo de 7% de cv.

Tabela 5 – Coeficiente de variação da densidade básica da madeira

Instância	Dia	Antes da Heurística		Após heurística	
		Linha I (%)	Linha II (%)	Linha I (%)	Linha II (%)
1	1	5	6	5	6
1	2	4	6	4	6
1	3	7	5	4	5
1	4	7	4	6	4
1	5	8	4	3	4
1	6	3	6	3	6
1	7	5	4	5	4
2	1	0	5	0	5
2	2	6	6	6	6
2	3	4	5	4	5
2	4	3	6	3	6
2	5	7	3	6	3
2	6	6	7	6	7
2	7	7	4	7	4
3	1	10	9	5	7
3	2	10	8	4	6
3	3	4	11	4	3
3	4	9	8	3	5
3	5	3	9	3	6
3	6	4	6	4	6
3	7	4	6	4	6

5 Considerações Finais

Durante esta pesquisa, foi abordado de maneira abrangente o desafio associado à alocação do transporte de madeira em uma fábrica de celulose. A motivação principal para este estudo foi a dificuldade em tomar decisões otimizadas da melhor alocação da matéria-prima diante do grande volume recebido por dia, considerando diversas variáveis cruciais como a densidade básica da madeira, TPC, idade e parâmetros operacionais como percentual ideal de distribuição entre mesas receptoras de toras e pilhas de estoque, material específico, capacidade das mesas, entre outros.

Para abordar esse problema, a pesquisa foi focada no levantamento do processo e dos parâmetros operacionais, elaboração de um modelo matemático para maximizar a quantidade de madeira destinada às mesas receptoras de toras e por fim a aplicação de uma heurística que a partir do resultado da PLI, buscou refinar a solução para atender os parâmetros referentes ao coeficiente de variação da densidade básica da madeira que apresentava operações não suportadas pela modelagem inicial.

É importante destacar que a implementação de soluções automatizadas enfrentam desafios e limitações. A complexidade do processo, a necessidade de lidar com dados dinâmicos do transporte e as possíveis variações nas características da madeira ao longo do tempo podem representar obstáculos. Limitações tecnológicas ou de recursos também podem influenciar a implementação efetiva da solução proposta, visto que, nos testes, as variáveis foram utilizadas de forma reduzida para obter uma solução ótima.

Os principais resultados obtidos foram, 100% de atendimento às restrições de idade, TPC e cv da densidade básica da madeira, além de melhoria na distribuição entre mesas e pilhas com perceptível linearização das entradas às mesas, enquanto no cenário real para as instâncias apuradas os resultados foram de 64%, 88% e 79% respectivamente.

Este estudo sugere como tema para trabalhos futuros, inclusão da variável material genético e nova avaliação das restrições relacionadas à densidade básica da madeira. Uma alternativa para o segundo item seria reformular o problema para evitar a necessidade de cálculos envolvendo variáveis de otimização como a linearização do processo ou utilizando técnicas de otimização para lidar com problemas que envolvem variáveis não lineares, como a Descida de Gradiente, métodos de Programação Não Linear, Busca Aleatória, melhorias na heurística já apresentada, entre outros.

Referências

- BARBETTA, P. A. **Estatística aplicada às ciências sociais**. 8. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2012. 318 p. ISBN 9788532806048. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7652636/mod_resource/content/1/Barbetta%20-%20Estat%3%ADstica%20aplicada%20%20C3%A0s%20ci%3%AAncias%20sociais%20%282010%29.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2024.
- BERGER, R.; TIMOFEICZYK JÚNIOR, R.; CARNIERI, C.; LACOWICZ, P. G.; SAWINSKI JÚNIOR, J.; BRASIL, A. A. Minimização de custo de transporte florestal com a utilização da programação linear. **Floresta**, v. 33, n. 1, p. 53–62, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v33i1.2277>>. Acesso em: 18 jun. 2024.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logística empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2004. 600 p. ISBN 9788522428779.
- DA SILVA, P. H.; GOMIDE, L. R.; FIGUEIREDO, E. O.; DE CARVALHO, L. M. T.; FERRAZ FILHO, A. C. Optimal selective logging regime and log landing location models: a case study in the Amazon forest. **Acta Amazonica**, v. 48, n. 1, p. 18–27, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1809-4392201603113>>. Acesso em: 18 jun. 2024.
- DEMUNER, W. P. **Predição do impacto da madeira em fábrica Kraft de eucalipto**. 24 f. Monografia (Engenharia Florestal) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.
- DIAS, O. A.; SIMONELLI, G. Qualidade da madeira para a produção de celulose e papel. **Enciclopédia Bioesfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 3632–3646, 2013. Disponível em: <<https://www.conhecer.org.br/enciclop/2013b/MULTIDISCIPLINAR/qualidade%20da%20madeira.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2024.
- DINIZ, C. C. C.; VALERIUS, J.; CERQUEIRA, C. L.; TIMOFEICZYK JÚNIOR, R.; DA SILVA, J. C. G. L.; COSTA, M. F. Análise técnica e de custos do transporte de biomassa florestal com carreta piso móvel. **Revista Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos-PB, v. 16, n. 1, p. 34–38, 2020. ISSN 1808-6845. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v16i1.1118>>. Acesso em: 18 jun. 2024.
- DURIGAN, A.; OLIVEIRA, R. S.; SGARBIERO, I. M.; SILVA, A. D. Gestão operacional do pátio de madeira na produção de cavacos para indústria de polpa e papel. **Adv. For. Sci, Cuiabá**, v. 9, n. 3, p. 1799–1809, 2022. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Gest%C3%A3o-operacional-do-p%C3%A1tio-de-madeira-na-produ%C3%A7%C3%A3o-Durigan-Oliveira/adb9f6f005cec25bb3976e92391af667b7d101d7>>. Acesso em: 18 jun. 2024.
- FERNANDES, L. J.; RODRIGUEZ, L. A. O.; CORREIA, A. R.; MARINS, F. A. S. Planejamento e controle da produção de cilindros para laminação: um estudo de caso quantitativo. **Produção**, v. 23, n. 1, p. 120–135, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-65132012005000061>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

FERREIRA, M. A.; JAROCHINSKI E SILVA, C. S.; GOMIDE, L. R.; CONTRERAS, M. A.; LOPES, E. T.; RODRIGUES, R. C.; DE MELLO, J. M.; MENDONÇA, N. de P. Wood supply optimization in Brazilian pulp industry involving forestry outgrower scheme. *Árvore*, v. 43, n. 5, p. e430504, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-90882019000500004>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

GIL, A. C. **Metodologia de pesquisa para ciência da computação**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 124 p. 7ª impressão. ISBN 8522431698.

GONÇALVES, A. F.; CAVALCANTE, E. M.; PIMENTA, L. R.; MATTIAZZO, F. B.; SEGURA, T. E. S. A gestão sistêmica do transporte e estocagem da madeira como fator diferencial na produtividade e qualidade da celulose. *O Papel*, v. 77, n. 10, p. 76 – 87, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/309922474_A_gestao_sistemica_do_transport_e_estocagem_da_madeira_como_fator_diferencial_na_produtividade_e_qualidade_da_celulose>. Acesso em: 18 jun. 2024.

HAMAD, R.; GUALDA, N. D. F. Modelagem de redes logísticas com demandas sazonais: influência do custo de estoque e do crédito de ICMS. *Journal of Transport Literature*, v. 8, n. 2, p. 295—324, 2014. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/jtl/a/M39ckTnSzbnfYhNCrQHq5sy/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

LEITE, F. P. Múltiplas utilidades da densidade da madeira. *Opiniões*, v. 18, n. 65, p. 34–34, 2021. Disponível em: <<https://florestal.revistaopinioes.com.br/pt-br/revista/detalhes/8-multiplas-utilidades-da-densidade-da-madeira/>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. da S.; BIRRO, M. H. B. **Elementos básicos do transporte florestal rodoviário**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2009. 167 p. ISBN 8572690719.

MARCONI, M. d. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017. 333 p. ISBN 9788597010763. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7237618/mod_resource/content/1/Marina%20Marconi%20C%20Eva%20Lakatos_Fundamentos%20de%20metodologia%20cient%20C3%ADfica.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2024.

MENDONÇA, N. d. P.; LEITE E LOPES, I.; GOMES, V. de S.; FERREIRA, M. A.; CRUZ, B. R.; JAROCHINSKI E SILVA, C. S.; GOMIDE, L. R. Silvicultural tasks scheduling optimization: a case study of functions and methods. *Árvore*, v. 46, p. e4602, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-908820220000002>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

OLIVETTI NETO, A. Qualidade de cavacos de eucalipto para obtenção de celulose Kraft. In: Anais do Congresso iberoamericano de investigación en celulosa y papel, 2002, Campinas - SP. **Anais eletrônicos**. Campinas: Unicamp, 2002. p. 18. Disponível em: <https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2002_Qualidade_Cavacos.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2024.

SHIMOYAMA, V. R. d. S.; BARRICHELO, L. Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal. **Série Técnica IPEF, Piracicaba**, v. 6, n. 20, p. 1–22, 1989. Disponível em: <<https://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr20/cap01.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2024.

STEIN, F. d. R. **Modelagem de produção industrial de celulose Kraft com modelos aditivos generalizados e redes neurais**. 109 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/5899>>. Acesso em: 18 jun. 2024.