

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

BRUNO GERALDO DA SILVA
RAFAEL FIGUEROA

CONSTRUÇÃO DE UM MODELO PARA SEQUENCIAMENTO DO
TRANSPORTE DE MÁQUINAS UTILIZANDO UM ALGORITMO
EVOLUTIVO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

BRUNO GERALDO DA SILVA
RAFAEL FIGUEROA

**CONSTRUÇÃO DE UM MODELO PARA SEQUENCIAMENTO DO
TRANSPORTE DE MÁQUINAS UTILIZANDO UM ALGORITMO
EVOLUTIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, do Departamento de Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fábio José Ceron Branco

PONTA GROSSA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

**CONSTRUÇÃO DE UM MODELO PARA SEQUENCIAMENTO DO
TRANSPORTE DE MÁQUINAS UTILIZANDO UM ALGORITMO EVOLUTIVO**

Por
BRUNO GERALDO DA SILVA
RAFAEL FIGUEROA

Monografia apresentada no dia 29 de novembro de 2019 ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____ (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Prof. Dr. Shih Yung Chin (UTFPR)

Prof. Dr. Juan Carlos Claros
Garcia (UTFPR)

Prof. Dr. Fabio Jose Ceron
Branco (UTFPR)
Orientador

Prof. Dra. Daiane Maria De Genaro Chiroli
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia de
Produção

*A verdadeira viagem do descobrimento não consiste em procurar novas paisagens,
mas em ter novos olhos.*

Marcel Proust

RESUMO

FIGUEROA, Rafael; SILVA, Bruno Geraldo. **Construção de um modelo para sequenciamento do transporte de máquinas utilizando um algoritmo evolutivo.** 2019. 43 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

O presente trabalho caracteriza-se pelo desenvolvimento de um modelo de otimização com um algoritmo evolutivo para minimização da distância percorrida por caminhões pranchas no sequenciamento do transporte de máquinas na unidade florestal de uma indústria de papel e celulose. Visto que um dos principais custos da produção do papel é a madeira, e na composição dos custos dessa matéria prima, o principal é o transporte, é necessário sempre buscar a excelência nesse tipo de operação. Após a construção do modelo, é utilizado um banco de dados da empresa com todos os tempos e dados necessários para testar sua funcionalidade. Para a identificação do melhor sequenciamento do transporte de máquinas, o algoritmo foi construído em linguagem *Visual Basic Application* no Excel 2013. A utilização do algoritmo permitiu um aumento de 4,5% na aderência às programações dos transportes nos horários agendados e ganhos qualitativos no processo.

Palavras-chave: Otimização. Algoritmo Evolutivo. Sequenciamento de transporte de máquinas.

ABSTRACT

FIGUEROA, Rafael; SILVA, Bruno Geraldo. **Construction of a model for machine transport sequencing using evolutionary algorithm.** 2019. 43 pages. Work of Conclusion Course (Graduation in Industrial Engineering) – Federal Technology University – Paraná. Ponta Grossa, 2019.

This paper is characterized by the development of an optimization model with evolutionary algorithm to minimize the distance traveled in the sequencing of machine transport in the forest business unit of a pulp and paper company. One of the main costs of paper production is the wood, and in the composition costs this raw material, the main one is transportation, it is always necessary to seek for excellence in this type operation. After the construction model, a company database is used with all the times and data necessary for test modeling. To identify the best machine transport sequencing, the algorithm it build in *Visual Basic Application* in Excel 2013. The use of algorithm allowed an increase 4,5% in adherence to transport schedules and gains qualitatives in the process.

Keywords: Optimization. Evolutionary Algorithm. Machine transport sequencing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do PCP	10
Figura 2 - Programação da produção e horizontes de planejamento	11
Figura 3 - Fluxograma de funcionamento de um AE	16
Figura 4 - Máquinas florestais	18
Figura 5 - Produtividade e rotação média.....	20
Figura 6 - Código Fonte VBA	24
Figura 7 - Quantidade de variáveis para o modelo	26
Figura 8 - Caminhão prancha transportando um processador.....	27
Figura 9 - Tipos de Equipamentos	27
Figura 10 - Matriz de carregamento	28
Figura 11 - Distribuição de região, bloco e talhão	29
Figura 12 - Cadastro de equipamentos a serem transportados.....	29
Figura 13 - Matriz de agendamento	30
Figura 14 - Exemplo da matriz de agendamento.....	30
Figura 15 - Exemplo de rota de um caminhão prancha	31
Figura 16 - Gantt dos transportes de cada prancha	32
Figura 17 - Planilha Pranchas	33
Figura 18 – Interface.....	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
1.1. PROBLEMA	6
1.2. JUSTIFICATIVA	6
1.3. OBJETIVO GERAL	7
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.5. DELIMITAÇÃO DO TEMA	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1. PLANEJAMENTO E CONTROLE DE PRODUÇÃO (PCP)	9
2.2. PESQUISA OPERACIONAL	11
2.2.1. PROGRAMAÇÃO LINEAR (PL)	13
2.2.2. PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA (PLI) E MISTA (PLIM).....	14
2.2.3. ALGORITMOS EVOLUTIVOS.....	16
2.3. LOGÍSTICA.....	17
2.3.1. LOGÍSTICA FLORESTAL	18
2.4. CENÁRIO FLORESTAL	19
3. METODOLOGIA	22
3.1. CLASSIFICAÇÃO	22
3.2. ESTUDO DE CASO	22
3.3. LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE DADOS	24
4. DESENVOLVIMENTO	26
4.1. VARIÁVEIS UTILIZADAS.....	26
4.2. FUNCIONAMENTO DO MODELO	29
4.3. FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO	32
5. RESULTADOS	34
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
REFERÊNCIAS	37
APÊNDICE	42

1. INTRODUÇÃO

É parte fundamental nas empresas a melhoria dos processos para conseqüente redução de custos. A partir desse ponto, o planejamento e controle de produção se tornou peça chave para isso, e trouxe consigo ferramentas cada vez mais robustas para programação e sequenciamento de produção, o que acabou por desenvolver a utilização dessas ferramentas de otimização em outras áreas que não a de produção.

A pesquisa operacional então passou a ser uma disciplina fundamental para melhoria de processos. Esta pode ser aplicada de muitas maneiras, sendo a programação linear, segundo Hein e Loesh (2009), a mais utilizada para buscar uma solução de modelos cujos problemas podem abordar maximização ou minimização de algum objetivo, que deve limitar as variáveis a restrições estipuladas.

Dentro da programação linear há divisões que dependem do tipo de variáveis a serem utilizadas, uma dessas classes trata de problemas com variáveis inteiras. Historicamente, o método mais utilizado para resolução de problemas de programação inteira, tem sido o *branch and bound*. Criado por Land e Dong em 1960, o algoritmo se baseia em dividir o problema em vários subproblemas e analisar sua eficiência em modelos lineares (CORNUJOLS e TÜCÜNTÜ, 2005).

Quando o problema analisado utiliza não somente variáveis inteiras, mas também variáveis contínuas ou binárias, se utiliza a programação linear inteira mista. Bastante utilizada quando é necessário estabelecer escolhas sobre em qual máquina tal peça deve passar, qual rota utilizar, qual o investimento trará maior retorno e outros problemas que precisam definir uma opção em detrimento das demais, normalmente fazendo uso de variáveis binárias para essas decisões.

Há casos, porém, onde se escolhe utilizar heurísticas devido a algumas características do problema. Esse tipo de trabalho busca o resultado ótimo em um conjunto de soluções possíveis.

Dentro do contexto da utilização da pesquisa operacional como ferramenta para otimização de processos e decisões, o setor florestal das indústrias de papel e celulose tem feito grande uso das suas diversas vertentes para redução de custo. De Session (1987), que minimizou o custo do transporte de madeira com um algoritmo utilizando heurística, a Malinovski (2010), que fez uso para otimizar os custos

operacionais do transporte com base na qualidade das estradas florestais, a pesquisa operacional vem auxiliando o setor.

Portanto a pesquisa operacional pode ajudar a otimizar os resultados dessa pesquisa, estudando como deve ser realizado o sequenciamento do transporte de máquinas por caminhões pranchas na área florestal de uma empresa do setor de papel e celulose.

1.1. PROBLEMA

Diante do cenário florestal trabalhado e as ferramentas disponíveis para a construção do algoritmo, tem-se a seguinte problemática: Qual é o sequenciamento ideal dos transportes de máquinas florestais a serem transportadas em um intervalo de tempo?

1.2. JUSTIFICATIVA

Uma das principais parcelas na composição do custo de fabricação de papel e celulose é justamente o da madeira posta na fábrica, e qualquer redução ou otimização no transporte de máquinas nas florestas impacta diretamente no preço da madeira entregue nas fábricas, pois reduz seu custo de silvicultura, de colheita e de frete.

As operações florestais são complexas e dinâmicas, o que exige do planejamento de curto prazo certa flexibilidade. As áreas de colheita, carregamento de madeira e silvicultura trabalham em uma sequência determinada com relação de dependência de término uma da outra.

Após o término da colheita de um talhão entra o carregamento e transporte para escoar a madeira até as fábricas, quando acaba a madeira do local entra a silvicultura para preparar o solo para serem plantadas novas árvores naquele talhão. Em certos casos, as áreas de biomassa, baldeio e pesquisa, também podem usar esse local.

Todos esses setores interessados utilizam máquinas de pequeno a grande porte para realizarem suas atividades, de tratores de baixa potência a grandes

harvesters de colheita de madeira. É parte da rotina florestal transportar várias dessas máquinas diariamente em caminhões prancha de um talhão para outro local, seja por necessidade mecânica, condição meteorológica, produção, nível de estoque, tipo de madeira, entre outros fatores.

O sucesso da indústria brasileira florestal é resultado da alta produtividade das árvores plantadas. Em 2014, o Brasil foi líder no ranking mundial de produtividade florestal. Dado que o principal fator dessa alta produtividade são os ganhos de melhoramento genético trazidos ao longo de décadas de desenvolvimento, há ainda uma janela de ganho logístico, pois apesar da alta produtividade, o custo das florestas plantadas no Brasil vem crescendo ano a ano (IBÁ, 2015).

Do ponto de vista da literatura, problemas de transporte desse gênero são bastante estudados, tanto com programação linear, quanto com heurística e meta-heurística, porém o objeto de aplicação é o diferencial desse trabalho. Há poucos relatos de estudos com esse foco, o de transporte de máquinas. Um dos motivos é a especificidade da área florestal abordada no estudo de caso, que é grande e complexa, e possibilita abranger inúmeras variáveis e restrições no modelo a ser construído.

Todos esses fatores corroboram a importância desse trabalho que poderá auxiliar na redução de custos, na melhoria da performance em campo e no escoamento da madeira para as fábricas em um menor tempo.

1.3. OBJETIVO GERAL

Desenvolver e implementar um modelo de otimização utilizando uma ferramenta computacional (*Visual Basic Applications* em *Excel* 2013) para minimização da utilização dos caminhões pranchas com a máxima alocação dos equipamentos florestais.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir variáveis operacionais do modelo;
- Definir uma ferramenta para implementação do modelo;

- Definir o melhor método para encontrar a distância entre os pontos de carga e descarga do transporte;
- Aumentar a aderência à programação de transporte.

1.5. DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho abrange como tema de pesquisa a área de pesquisa operacional, buscando o melhor sequenciamento do transporte de máquinas florestais, que conta com 15 caminhões pranchas para essas movimentações. A pesquisa foi desenvolvida por meio de estudo de caso realizado em uma empresa de papel e celulose localizada no estado do Paraná.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial tem por objetivo trazer a teoria necessária para se alcançar o objetivo desse trabalho, para tanto, essa seção foi dividida em quatro grupos: Planejamento e Controle de Produção (PCP), Pesquisa Operacional (PO), logística e cenário florestal.

2.1. PLANEJAMENTO E CONTROLE DE PRODUÇÃO (PCP)

Slack et al. (1993, p.230), definem como planejamento e controle de produção a forma que se produza ou preste um serviço no tempo esperado pelo cliente e na quantidade necessária. Com o crescente aumento na produção desde o início do século anterior, as indústrias foram desafiadas a aperfeiçoarem seus processos produtivos, desde a chegada de matéria prima até o produto ou serviço final.

A administração dos recursos produtivos é parte indispensável para que a competitividade e o crescimento sustentado e estratégico sejam alcançados. O PCP deve projetar e controlar todos os sistemas de utilização das matérias primas, recursos humanos, equipamentos e instalações para o desenvolvimento de um produto ou serviço (CHASE et al., 2006).

Esse constante crescimento da demanda fez com que se observasse um marco decisivo de competição entre as empresas. Com isso, o PCP se tornou um fator determinante para que os problemas futuros tenham melhores tomadas de decisão pelos gestores e que se consigam vantagens competitivas (RUSSOMANO, 2000).

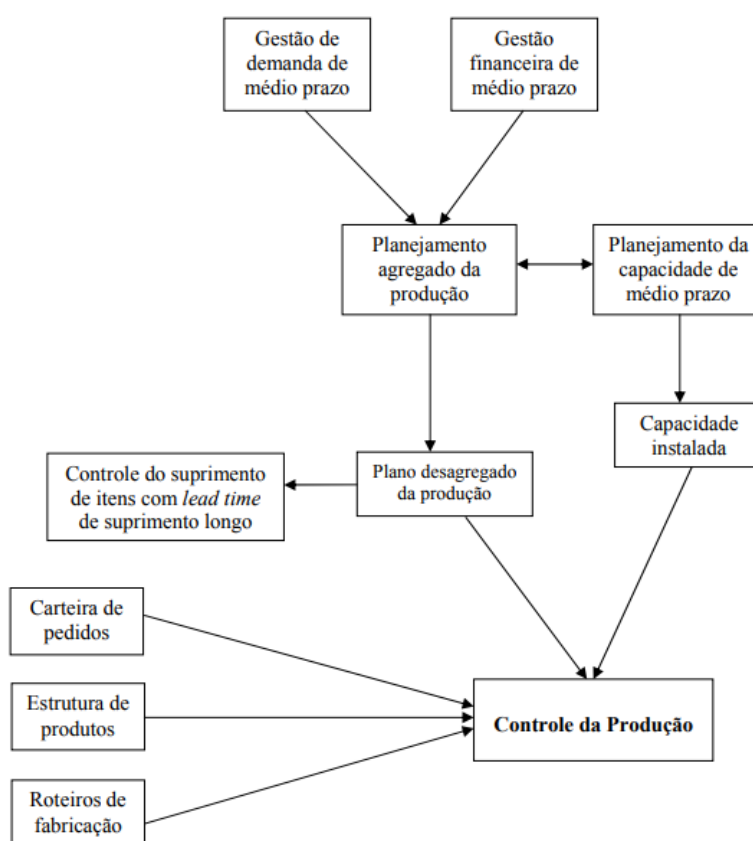
Essas prioridades competitivas, segundo Slack (1993), são as seguintes:

- a) Qualidade: fazer os produtos de acordo com o que é especificado no projeto, sem cometer erros;
- b) Rapidez: Todo o processo produtivo, desde a matéria prima até a entrega do produto final deve ser menor que dos concorrentes;
- c) Credibilidade/confiabilidade: Cumprir prazos.
- d) Flexibilidade: Se adaptar as mudanças quando assim forem requeridas pelos clientes de modo que se mude a sua operação.
- e) Custo: Buscar sempre o menor preço final em relação aos concorrentes.

É função do PCP fazer com que os recursos do processo estejam sempre disponíveis em sua quantidade desejada, no tempo correto e com a qualidade desejada. Isso garante que os planos estratégico, tático e operacional sejam cumpridos (MARTINS; LAUGENI, 2005; TUBINO, 2007).

As decisões que o PCP deve tomar acompanham a estrutura hierárquica apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura do PCP



Fonte: Adaptado de Ferreira (2012)

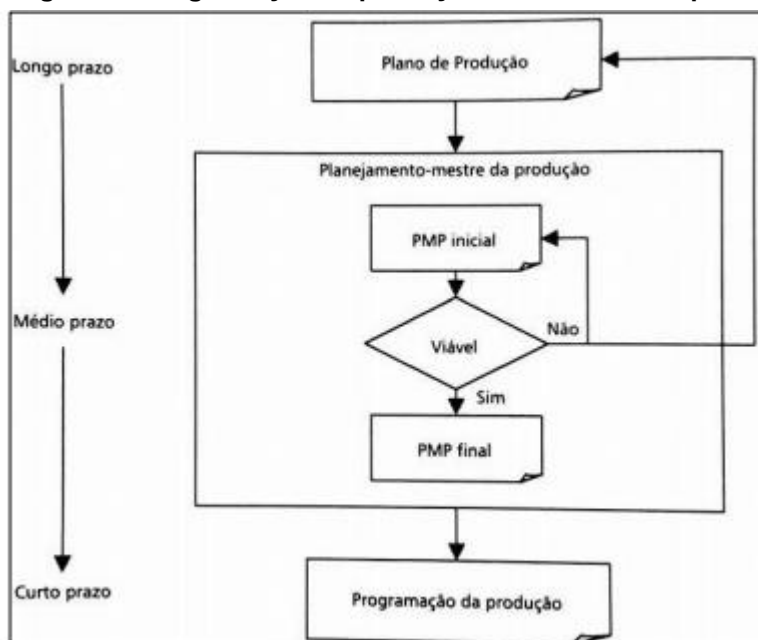
Segundo Ferreira (2012), o planejamento da produção se inicia nas gestões de médio prazo, as quais necessitam de previsões para identificar sua demanda, num período de três a 18 meses. Essas seriam as bases para o planejamento agregado da produção. Outro tópico também importante é o planejamento de capacidade, pois interage diretamente com o planejamento agregado.

Para Tubino (2009), após o planejamento da produção, o caminho seguinte é o Planejamento Mestre da Produção (PMP), o qual tem a função de conectar o Plano de Produção com a programação final da produção. A forma com que o PMP contribui

para o sistema produtivo é a de analisar e validar a capacidade de médio prazo do processo e controlar a quantidade de produtos acabados.

O PMP pode ser melhor visualizado de acordo com a Figura 2.

Figura 2 - Programação da produção e horizontes de planejamento



Fonte: Tubino (2009)

Nesse ponto começa a integração entre o PCP e a pesquisa operacional, que fornece modelos de otimização para construção da programação da produção. Essa construção pode se dar a partir dos estudos de *scheduling*, que começaram de forma simples, com a lista de quando o trabalho deveria começar e terminar. Mais atualmente, as linhas de trabalho do *scheduling* preocupam-se em distribuir de maneira otimizada os recursos escassos de uma operação. Portanto, é um processo de tomada de decisão usado em muitas organizações, que aloca os recursos às tarefas de acordo com tempos determinados, otimizando indicadores de produção (LEUNG, 2004; PINEDO, 2008).

2.2. PESQUISA OPERACIONAL

A Pesquisa Operacional (PO) se originou de forma mais organizada como disciplina ou área de conhecimento após a Segunda Guerra Mundial, quando um

grupo de cientistas britânicos adotou bases científicas para melhorar a gestão de seus recursos militares. Esse raciocínio fez com que propostas científicas fossem adaptadas no setor civil para ganho de produtividade e eficiência (TAHA, 2008).

Após o seu desenvolvimento com a assistência de computadores, a pesquisa operacional passa a utilizar modelos matemáticos mais complexos, e tem sido vastamente aplicada na resolução de problemas, inclusive os empresariais. Sua função de encontrar soluções ótimas tem uso nas mais diversas atividades, inclusive na de alocação de recursos, sejam eles financeiros, materiais, patrimoniais, humanos ou tecnológicos (LACHTERMACHER, 2006).

O uso de técnicas da pesquisa operacional para a redução de custos e ganho de efetividade, traz a solução de problemas das mais diversas áreas, dentre elas: indústria, hospitais, serviços, transportes, entre outros (MOREIRA, 2010).

Segundo Taha (2008), a técnica mais utilizada é a programação linear, que é aplicada a modelos com problemas lineares. Outras técnicas conhecidas são: programação inteira (assumem variáveis inteiras), programação dinâmica (quando o problema pode ser dividido em vários subproblemas), otimização em redes (problema tratado como uma rede) e a programação não linear (para funções não lineares).

Segundo Goldbarg e Luna (2005), na solução de problemas via PO, as fases descritas a seguir são as mais importantes:

- Definição do problema: são definidos os objetivos, as alternativas de decisão, os limites e as restrições das variáveis;
- Construção do modelo: são apresentadas as características mais importantes do problema abordado. O conhecimento obtido é representado por meio de imagens intelectuais sobre o que é mais relevante da porção da realidade em análise;
- Solução do modelo: o método apresenta as saídas ótimas para as entradas de informações do modelo em questão;
- Validação do modelo: o modelo é válido se tiver soluções de previsão apropriadas para a realidade estudada e se forem úteis para a tomada de decisão;
- Implementação da solução: nesse momento são transferidos para a realidade os resultados provenientes das simulações ou das otimizações, e;

- Avaliação final: observação dos resultados práticos do que foi sugerido na solução através dos modelos.

Taha (2008) define que para um modelo matemático, existem três conjuntos de dados para a sua solução. São eles:

- Função objetivo: é a função que engloba as variáveis de decisão e que trará a solução final.
- Variáveis de decisão e parâmetros: variáveis de decisão são as incógnitas do problema matemático. Parâmetros são os dados do problema;
- Restrições: são os limites que o problema propõe a fim de serem obedecidos para a solução final do modelo.

Visto a sua importância, e a quantidade de temas que a PO pode ser envolvida, as suas disciplinas vêm sendo utilizadas para a resolução de diversos tipos de otimização.

2.2.1. Programação Linear (PL)

A PO pode ser aplicada de muitas maneiras, sendo a programação linear, segundo Hein e Loesh (2009), utilizada para buscar uma solução de modelos cujos problemas podem abordar maximização ou minimização de algum objetivo, que deve limitar as variáveis as restrições estipuladas.

O primeiro método prático para determinar a solução ótima dos modelos de programação linear, o algoritmo simplex, foi apresentado, em 1947, por George B. Dantzig. Outras variações do método simplex, como o método dual simplex, foram propostas para reduzir o número de iterações e o custo computacional na programação linear (SOUZA, 2004).

A PL procura encontrar o melhor resultado possível para um modelo matemático que esteja em expressões lineares. Sua praticidade faz com que seja muito utilizada devido à flexibilidade do modelo (MARINS, 2011). Os elementos necessários para os modelos de PL devem conter essas três ordens: variáveis de decisão, função objetivo e restrições do problema (ANDRADE, 2002).

De maneira formal, a PL tem a função de determinar o valor da solução para as variáveis (x_1, x_2, \dots, x_n) que maximize a função objetivo dada por (BARBOZA et al., 2015):

$$\begin{aligned} z &= \sum_{j \in N} c_j x_j, N = \{1, \dots, n\} \\ &\text{sujeito a} \\ \sum_{j \in N} a_{ij} x_j &(\leq, = \text{ ou } \geq) b_i, i \in M = \{1, 2, \dots, m\} \\ x_j &\geq 0, j \in N \end{aligned} \quad (1)$$

c_j, a_{ij} e b_i são constantes conhecidas para todo i e j ; x_j são variáveis não negativas.

Após a aplicação da Equação 1 para a função objetivo z , é possível obter valores para as variáveis procuradas respeitando as suas restrições e condições de existência. A primeira somatória é a função objetivo (maximize ou minimize), e a segunda somatória engloba as restrições do problema.

2.2.2. Programação Linear Inteira (PLI) e Mista (PLIM)

A PLI é um caso específico da programação linear que propõe resultados ótimos com todas as variáveis do modelo sendo inteiras ou discretas. Essas variáveis são usadas para problemas em que não se pode atribuir como solução variáveis contínuas, como por exemplo, construir 2,31 aviões ou contratar 4,4 pessoas. Variáveis binárias também são utilizadas nessa classe de problemas para decisões de sim ou não, como investir ou não em determinado ativo, abrir ou não uma nova fábrica, alocar ou não uma peça em determinada máquina. Tais problemas são comuns em nosso cotidiano (WOLSEY, 1998).

Segundo Junger et al. (2010), a PLI conquistou bastante espaço no ambiente acadêmico e nas companhias. Anualmente são publicados cada vez mais artigos, e conquista espaços em conferências internacionais e *softwares* cada vez mais eficazes para resolução de problemas de programação inteira.

O modelo matemático formal da PLI pode ser descrito como a Equação 2 (NOGUEIRA, 2010):

$$\begin{aligned} &\text{Max (ou Min)} \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ &\text{Sujeito a:} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \leq b_i \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, m$$

$$X_j \in \mathbb{Z} \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, p (\leq n)$$

$$X_j \geq 0 \quad \text{para } j = p + 1, \dots, n$$

Por outro lado, é comum modelos que buscam otimizar problemas de programação inteira, envolverem variáveis discretas e também contínuas. Para esses problemas, o uso da programação linear inteira mista é eficiente para resolver uma série de problemas (MORO, 2000).

Chinneck (2004) define como programação linear inteira mista, problemas que abordem variáveis com valores inteiros, valores reais, positivos ou nulos. O termo misto se enquadra nessa mistura de termos. Essa técnica é eficaz não somente para problemas mistos, assim como para problemas que exigem somente modelos de programação inteira, como também para problemas binários e para combinações de variáveis reais, inteiras e binárias.

Os métodos para resolver os problemas de programação linear inteira podem ser classificados em três categorias: algoritmos de corte, métodos enumerativos (*branch-and-bound* e enumeração implícita) e algoritmos construtivos (ZIONTS, 1974). A sua resolução pode ser difícil devido à característica combinatorial, isso porque o espaço de soluções inteiras é formado por finitos pontos. No caso misto o mesmo acontece, pois o espaço de busca é controlado prioritariamente pelas variáveis inteiras. Os métodos de enumeração que resolvem esses problemas analisam todos os pontos, sendo chamado de busca exaustiva. A busca exaustiva se torna mais eficiente quando enumera uma parte das soluções possíveis e descarta pontos não promissores para a resolução (BARBOZA et al., 2015).

Para Chandra et al. (2013), historicamente o método mais utilizado para resolução de problemas de programação inteira, tem sido o *branch-and-bound*. Criado por Land e Dong em 1960, o algoritmo se baseia em dividir o problema em vários subproblemas e analisar sua eficiência em modelos lineares, sendo capaz de descartar os pontos não promissores para a solução ótima (CORNUEJOLS e TUCÜNTÜ, 2005).

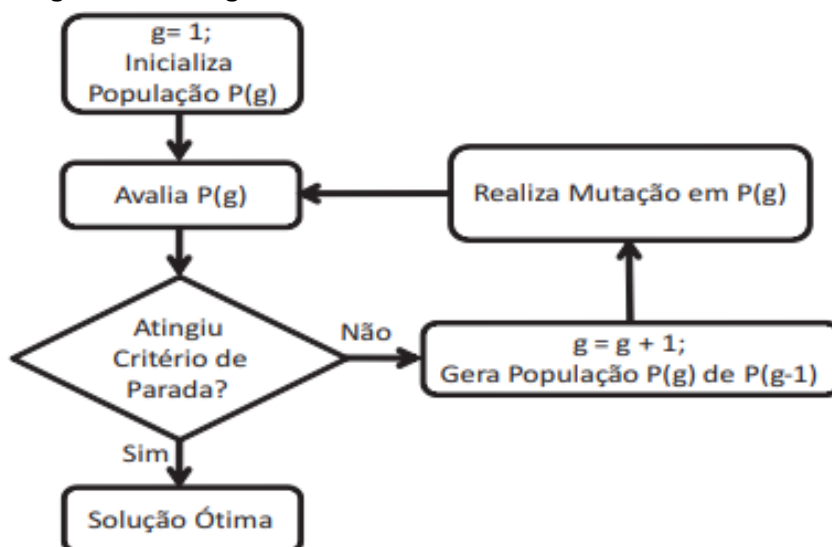
2.2.3. Algoritmos Evolutivos

Os algoritmos evolutivos têm uma abordagem muito atrativa quando se trata da busca de soluções sub-ótimas de problemas reais de otimização, partindo de algumas escolhas aleatórias em relação às variáveis do problema, para buscar novos pontos de solução (BASGALUPP, 2010).

Seus conceitos básicos foram desenvolvidos por Holland em 1975, e postos a prova como metodologia para resolução de problemas com otimizações complexas por De Jong em 1975 e Goldberg em 1989, sendo que até hoje passam por aprimoramento com novas versões (Dullaert et al., 2005).

O algoritmo testa algumas populações de soluções até chegar à melhor opção. Existem vários tipos de AEs, sendo que o mais conhecido deles é o Algoritmo Genético (AG). A forma básica do funcionamento desses algoritmos pode ser descrita conforme a Figura 3 (FREITAS, 2008).

Figura 3 - Fluxograma de funcionamento de um AE



Fonte: Adaptado de Freitas (2008)

Os AEs foram inspirados nos mecanismos de seleção natural da biologia, onde os indivíduos que sobrevivem e evoluem são os mais aptos. Nesse método cada indivíduo, ou população, corresponde a uma possível solução do problema. A cada iteração novos indivíduos são gerados, podendo realizar trocas entre si, como os fenômenos de *crossover* e mutação na natureza. O processo cessa quando um critério

de parada é atingido, o que pode ser um determinado número de iterações ou uma solução satisfatória (BASGALUPP, 2010).

2.3. LOGÍSTICA

O transporte e a logística acompanham a história da humanidade, mas são fatos mais recentes que marcaram alguns saltos logísticos. A ferrovia no início do século XIX, o avião em 1903 e o transporte via contêiner a partir de 1956 impactaram muito os transportes e a rede de comércio mundial. Mais recentemente, a logística assumiu um papel fundamental como cadeia de suprimentos, e destina matéria prima ou produtos onde e quando necessário, na quantidade devida, além de também assumir um papel fundamental no transporte de pessoas (SPERANZA, 2016).

A logística utiliza-se da PO como método para a solução problemas desde a Segunda Guerra Mundial. Os estudos criados para o ambiente militar ultrapassaram essa fronteira e começou a ser usada na comunidade acadêmica e empresarial no ramo da administração, sendo que atualmente essa disciplina é uma das que mais se utiliza dos avanços trazidos pela pesquisa operacional (ANDRADE, 1998).

Os avanços na logística acompanharam a revolução da informação, a partir dos anos 70 com as primeiras linguagens de programação, que desenvolveram ainda mais os computadores e trouxeram possibilidades de modelos matemáticos de PO mais complexos. A logística tratou de acompanhar o movimento e começar a roteirizar via programação suas frotas, destinos de produção e a entender as necessidades dos clientes nos dias de hoje em tempo real via internet (SPERANZA, 2016).

O uso da infraestrutura de transporte cada vez maior e o impacto dos congestionamentos nas grandes cidades são questões do planejamento urbano, e as novas ferramentas de otimização de entregas com janelas de tempo, cálculos de rota com aplicativos sociais, são tendências que tendem a diminuir os impactos negativos do trânsito, na esfera social, econômica e ambiental, sempre se valendo dos avanços da PO (MONTERO, 2017).

2.3.1. Logística Florestal

Segundo Malinovski e Malinovski (1998), a colheita e o transporte da madeira correspondem em média de 60 a 70% do custo da madeira colocada no pátio das fábricas, esse custo da madeira chega a representar de 30 a 40% do custo final do produto de uma fábrica de celulose.

Toda a cadeia logística florestal é influenciada por diversos fatores, e por isso ela se torna muito dinâmica, sendo necessário movimentar muitos maquinários todos os dias dentro das florestas. A logística florestal é formada basicamente pelas áreas de carregamento de madeira, transporte e estradas florestais.

As áreas florestais comportam vários tipos de máquinas que precisam ser transportadas algumas vezes ao ano em função do planejamento de colheita e transporte, e vários outros tipos de veículos de transporte para a logística no campo: carros, caminhonetes, caminhões bitrem, tritrem, tratores, guas de carregamento, máquinas florestais, como *harvester*, *feller buncher*, cabeçotes processadores, *skidder* e outros implementos necessários às atividades em campo, como mostrados na Figura 4.

Figura 4 - Máquinas florestais



Fonte: John Deere (2017)

Os métodos de PO tem sido aplicado no setor agrícola de maneira geral há mais de cinco décadas. Um dos primeiros artigos de revisão com aplicação de ferramentas para tomada de decisão no campo foi feito por Glen em 1987, até mais recentemente em estudo realizado por Ahumada e Villalobos em 2009, com contribuições na área de suprimentos de produtos agrícolas (JENA, 2013).

Dentro da área florestal o cenário não é diferente. A pesquisa operacional é bastante utilizada para a tomada de decisão, principalmente nas indústrias de papel e celulose, pois a complexidade dos problemas impostos nessa área pode levar os gestores a tomar decisões questionáveis do ponto de vista econômico e técnico (SOUZA, 2004).

Pode-se citar os estudos no Brasil, de Souza (2004), sobre a utilização de algoritmos genéticos para se realizar o planejamento de colheita e transporte de madeira quando há mais de um centro recebedor. Lacowicz et al. (2002) estudaram a minimização dos custos do transporte rodoviário de madeira. Já Lopes et al. (2003) verificaram a aplicabilidade de um programa para apoio no transporte e planejamento da colheita tomando como base as condições das florestas brasileiras. Ainda, Costa (2012) utilizou meta-heurísticas no escalonamento dos motoristas do transporte de madeira.

Malinovski (2010) desenvolveu um modelo matemático em programação linear inteira para otimizar os custos do transporte de madeira baseado na qualidade das estradas florestais, entre tantos outros estudos.

2.4. CENÁRIO FLORESTAL

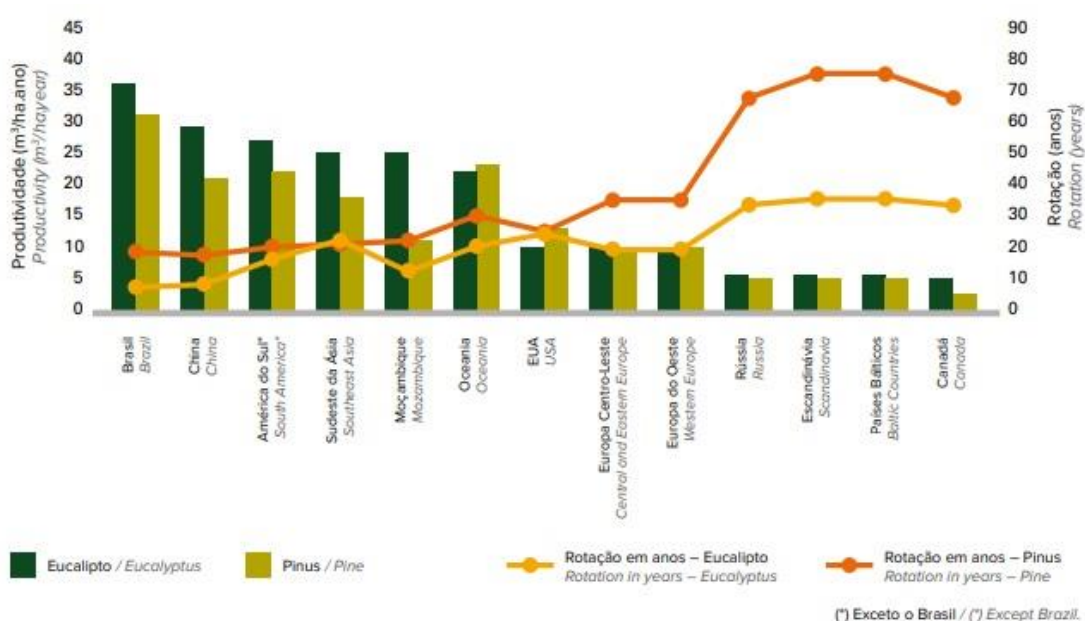
As florestas plantadas brasileiras, de eucalipto e pinus, são reconhecidas mundialmente por serem referência em produtividade e custos. Essas espécies são o principal insumo das indústrias de papel e celulose, de madeira serrada, de pisos laminados, de painéis reconstituídos, de móveis e de siderurgia (MALINOVSKI, 2010).

Segundo o anuário da Indústria Brasileira de Árvores (2019), a área de árvores plantadas para fins industriais no Brasil totalizou 7,83 milhões de hectares em 2018, desse total, 72% é formado por plantios de eucalipto. O pinus tem um total de 1,57 milhões de hectares, concentrado nos estados do Paraná e Santa Catarina. Do total

de árvores plantadas no Brasil, 36% pertencem a empresas do segmento de celulose e papel.

O sucesso global da indústria brasileira de base florestal é resultado da alta produtividade das árvores plantadas no País. Em 2014, o Brasil manteve mais uma vez sua liderança no ranking global de produtividade florestal. A produtividade média dos plantios brasileiros de eucalipto atingiu 36 m³/ha.ano e a produtividade dos plantios de pinus foi de 30,1 m³/ha.ano, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Produtividade e rotação média



(*) Exceto o Brasil / (*) Except Brazil.

Fonte: Pöyry (2018) citado em IBÁ (2019).

A produção nacional de celulose em 2018, considerando-se fibra curta (eucalipto) e longa (pinus) e pasta de alto rendimento, foi de 21,1 milhões de toneladas. Com esse resultado, o Brasil se consolidou no segundo lugar no *ranking* dos países produtores de celulose de todos os tipos e como primeiro produtor mundial de celulose de eucalipto, sendo nacional a maior empresa de celulose de mercado do mundo. A participação do setor de árvores plantadas no PIB brasileiro tem crescido a cada ano e fechou 2018 representando 1,3% de toda a riqueza gerada no País e 7% do PIB industrial, que representa R\$86,6 bilhões, com um saldo da balança comercial de US\$11,4 bilhões (IBÁ, 2019).

Ainda segundo IBÁ (2015), em termos marginais, cada hectare de árvores plantadas adicionou R\$ 7,8 mil ao PIB nacional, em 2014. Como comparação, o

complexo soja – importante referência nacional – adicionou R\$ 4,9 mil/ano por hectare plantado, enquanto a pecuária, R\$ 2,7 mil/ano. Em 2014, o número de empregos mantidos de forma direta pelo setor de árvores plantadas foi de 610 mil. À medida que as atividades do setor de árvores plantadas se concentram fora de centros urbanos, o setor contribui de forma significativa para fixar a população no meio rural e gerar renda para as comunidades do entorno de suas unidades de negócio. Com o número de empregos gerados diretamente pelo setor brasileiro de árvores plantadas e o salário médio líquido de seus trabalhadores, a renda gerada pela atividade em 2014 foi de R\$ 11,60 bilhões.

3. METODOLOGIA

O capítulo tem por objetivo classificar a pesquisa e demonstrar as etapas necessárias para o desenvolvimento do trabalho, descrevendo a metodologia a ser empregada.

3.1. CLASSIFICAÇÃO

Toda pesquisa deve ter um método científico determinado que melhor se encaixe a pesquisa para se alcançar os objetivos. O presente trabalho se enquadra no método indutivo, pois a partir de premissas que basearam o estudo, pretende-se demonstrar uma verdade geral ou o que se julga verdade (LAKATOS, MARCONI, 2003).

Do ponto de vista da natureza da pesquisa, esse trabalho pode ser enquadrado como aplicado, pois o estudo será utilizado para melhorar um problema concreto, baseado em conhecimentos já existentes na literatura.

A pesquisa possui caráter quantitativo, sendo que os dados coletados, analisados e processados, são todos numéricos, que darão condições para confirmar as premissas encontradas na bibliografia.

Quanto ao objetivo, segundo Gil (2002), a maioria dos estudos exploratórios é realizada a partir de pesquisa bibliográfica e/ou estudo de caso, mesmo que esse tipo de pesquisa seja bem flexível. Essas características acabam por definir o presente estudo como exploratório.

Em relação aos procedimentos, o trabalho apresentado se baseia em um estudo de caso e suas características serão detalhadas na próxima seção. O estudo de caso pode ser definido como uma investigação empírica de um conjunto contemporâneo de acontecimentos (YIN, 2001).

3.2. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi desenvolvido na unidade florestal de uma indústria de papel e celulose, no estado do Paraná. A unidade florestal em questão abastece duas plantas fabris: uma das dez maiores fábricas do mundo de papelcartão de fibra virgem e a maior fábrica do mundo de celulose com produção simultânea de celulose de fibra

longa e de fibra curta. Além disso, também abastece com toras de comércio indústrias do setor madeireiro na região.

A área florestal é composta por 275,6 mil hectares, sendo 135,2 mil hectares de florestas plantadas de pinus e eucalipto, e 110,3 mil hectares de mata nativa preservada. Em números médios, a unidade abastece as duas fábricas com uma massa de 780 mil toneladas por mês de toras de eucalipto e pinus. Dentro desse cenário complexo, pretende-se criar um modelo de programação que possa realizar a programação diária da sequência e alocação das máquinas a serem mudadas de localização em cada caminhão que irá efetuar a mudança.

Hoje a empresa possui 15 caminhões pranchas que fazem as mudanças das máquinas florestais em campo, realizando em média 23 mudanças por dia. São quatro modelos diferentes de pranchas, sendo que nem todo modelo pode carregar toda máquina, além do dever de obedecer à legislação sobre a jornada dos motoristas e os horários que esses caminhões podem rodar em rodovias estaduais e federais.

Em função de alguns indicadores serem estratégicos para a companhia, os resultados finais de custo e o indicador de aderência, tiveram seus resultados ocultados. Como resultado é apresentado o ganho em aumento percentual do indicador de aderência, que é o indicador chave do problema estudado. Para entendimento, esse indicador tem normalmente resultados entre 85% e 95%, que indicam que a cada 10 transportes agendados, entre 85% e 95% são realizados no horário programado.

Além do estudo de caso, esse trabalho também passou por uma pesquisa bibliográfica que permitiu que o estudo fosse desenvolvido com sólida base teórica. A bibliografia consultada foi encontrada em base de dados de artigos científicos, principalmente *Science Direct*, Scielo e algumas bases específicas, como do ENEGEP e de revistas científicas da área florestal. Além disso, também embasaram esse trabalho, teses dos bancos da USP e UFPR. Os livros utilizados se valem do critério de autor mais representativo em determinado assunto, assim como nos artigos e teses.

3.3. LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Os dados para a construção do modelo foram disponibilizados pela empresa. Os dados são referentes a tempo de viagem, distância média de transporte, tempo de carga, tempo de descarga, e outros tempos necessários. A análise foi feita em cima de toda a base de dados da empresa, analisando a população das mudanças de máquinas realizadas em 2017 até o mês de dezembro do mesmo ano.

Após a análise desse banco, o algoritmo foi construído para minimizar a utilização das pranchas, assim minimizando o custo de transporte já que todo custo é controlado em reais gastos por quilômetro rodado, mas tomando o cuidado de maximizar o número de equipamentos alocados nas pranchas para atender ao máximo a programação solicitada.

Para a construção do modelo, utilizou-se a ferramenta *Visual Basic Applications* (VBA), no Excel, conforme Figura 6, com um trecho do código fonte do algoritmo. O modelo foi operacionalizado em um computador com processador Intel® Core™ i5 e 4GB de memória RAM.

Figura 6 - Código Fonte VBA

```

Executar Ferramentas Suplementos Janela Ajuda
Ln 67, Col 16
(Geral) otimizarPrancha

For tr = 1 To nTrials
    ReDim lstCheck(1 To nPranchas, 1 To 1)
    'Limpa parâmetros para próximas rodadas
    ReDim TbPranchas(1 To nPranchas) 'lista taboo de pranchas
    ReDim TbEquip(1 To nEquip)
    ReDim arrResultInt(1 To nPranchas, 1 To nEquip)
    ReDim usoPrancha(1 To nPranchas)

    FOint = 0

    'Preenche com indisponibilidade de pranchas

    For prnch = 1 To nPranchas
        If arrPranchas(prnch, 6) = 1 Then
            TbPranchas(prnch) = 1 'indisponivel
        Else
            TbPranchas(prnch) = 0
        End If
    Next prnch

    'Sorteio de pranchas de início
    For prnch = 1 To nPranchas
        count = 0 'Conta o número de equipamentos alocados na prancha

        'Escolhe uma prancha
        'Sorteia a prancha aleatoriamente
        idxPrancha = sorteiaPrancha(TbPranchas)

        If idxPrancha > 0 Then
            TbPranchas(idxPrancha) = 1

            '=====
            timeRef = arrPranchas(idxPrancha, 4) 'Horário inicial da prancha

            currLat = arrPranchas(idxPrancha, 8)
            currLong = arrPranchas(idxPrancha, 9)
        End If
    Next prnch
End For

```

Fonte: Autoria Própria (2019)

Os resultados obtidos na programação foram comparados às bases históricas da empresa e também validados por pessoas com experiência na área, que puderam afirmar que o modelo está conseguindo otimizar o sequenciamento do transporte de máquinas entre as áreas florestais da empresa.

4. DESENVOLVIMENTO

Nesse capítulo estão descritas as etapas de coleta de dados e desenvolvimento do algoritmo, explicando cada uma das variáveis utilizadas, conforme a metodologia demonstrada.

4.1. VARIÁVEIS UTILIZADAS

As variáveis e dados coletados que foram utilizados para compor o modelo estão descritos abaixo:

Caminhões Prancha: A empresa possui 15 caminhões para realizar a movimentação das suas máquinas florestais, 13 com pranchas modelo “carrega tudo”, de diferentes tamanhos. Desses 15, dois rodam com pranchas dois eixos, nove com três eixos, duas com quatro eixos e dois são plataformas, para equipamentos menores. Para exemplificar, na Figura 7, pode ser visto uma prancha de 4 eixos. Elas são identificadas por 3 algarismos, conforme seu cadastro no sistema da empresa.

Figura 7 - Quantidade de variáveis para o modelo



Fonte: Dambroz (2019)

Equipamentos: Em sistema há mais de 700 equipamentos que podem ser transportados. Todos foram importados para o banco de dados do algoritmo com seu respectivo prefixo ou código, que é a sua forma de identificação na empresa. Por exemplo, os equipamentos com prefixo TE são tratores de esteira, os HVs são harvesters e os PR são processadores. Todos os códigos são acompanhados de quatro algarismos, que se referem a ordem crescente de aquisição de equipamentos, sendo assim o FW0001, foi o primeiro *forwarder* cadastrado na empresa. A Figura 8

traz um processador sendo transportado por uma prancha três eixos em uma estrada florestal.

Figura 8 - Caminhão prancha transportando um processador



Fonte: Autoria Própria (2018)

A Figura 9 denomina os tipos de equipamentos, com seus respectivos códigos, que podem ser transportados.

Figura 9 - Tipos de Equipamentos

Código	Equipamento
EH	Escavadeira Hidraulica
FW	Forwarder
FB	Feller
HV	Harvester
AMN	Motoniveladora
ARC	Rolo compactador
ARE	Retroescavadeira
TE	Trator de esteira
TP	Trator de pneu
SK	Skidder

Fonte: Autoria Própria (2018)

Matriz de carregamento: Para construir o modelo foi necessário identificar qual o tipo de prancha deveria transportar cada equipamento, e então foi construída uma matriz, que diz por exemplo, que pranchas quatro eixos, podem carregar equipamentos que iriam em quatro eixos, três eixos e dois eixos. A matriz está representada na Figura 10. Além disso, cada tipo de prancha teve seu custo por

quilômetro atrelado ao código, visto que uma prancha maior tem um maior custo, ela não deve ser utilizada indiscriminadamente para transportar um equipamento que poderia ser levado por uma prancha de dois eixos.

Figura 10 - Matriz de carregamento

		Equipamento deve ser carregado por			
		2 eixos	3 eixos	4 eixos	Plataforma
Tipos de caminhão prancha	2 eixos	1			
	3 eixos	1	1		
	4 eixos	1	1	1	
	Plataforma				1

Fonte: Autoria Própria (2017)

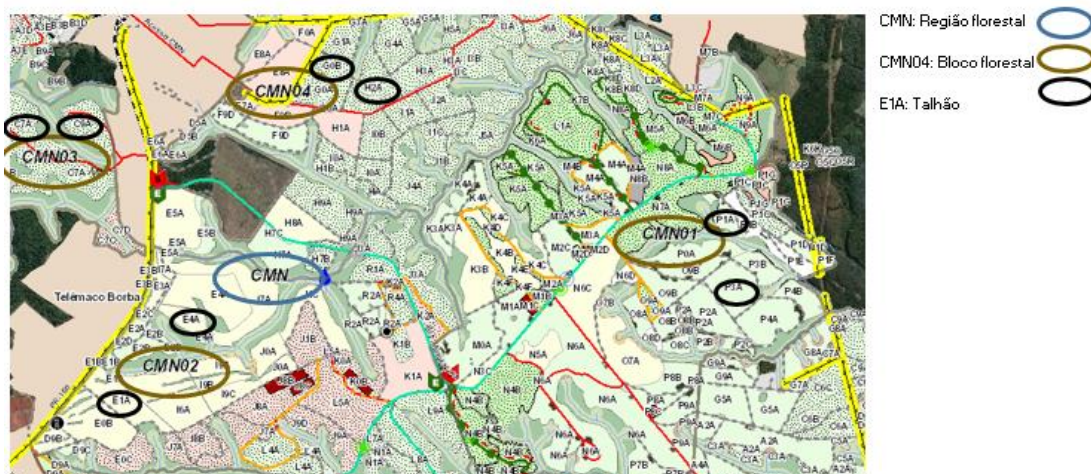
Velocidade média: Para calcular o tempo de deslocamento entre um ponto e outro, foi necessário buscar um dado relacionado a velocidade média desse tipo de caminhão dentro das áreas da empresa, que foi utilizado no algoritmo.

Tempos de processo: Para compor todo o tempo gasto em um transporte de máquina, deve-se levar em consideração além do trajeto, o tempo gasto carregando e descarregando os equipamentos. Para esses tempos foram utilizados dados históricos da empresa.

Blocos florestais e coordenadas: A empresa tem todos os seus dados geográficos identificados em mapas e tabelas, a partir de três tipos de espaços geográficos: A região florestal, o bloco florestal que está dentro da região, e o talhão que está dentro do bloco. São nesses espaços que acontecem as atividades florestais, a formação de um bloco de colheita, a sequência de colheita nos talhões, o escoamento da madeira e a entrada da silvicultura.

Nesse trabalho optou-se por trabalhar com o nível de bloco, o que já trouxe um alto grau de complexidade, devido à massa de dados. Os blocos (locais) avaliados nesse trabalho chegaram a 1137, sendo que na execução do algoritmo um número menor deles foi selecionado para rodar. A Figura 11 demonstra como é essa distribuição do espaço geográfico no planejamento florestal. A nomenclatura de cada bloco é formada por três letras e dois números.

Figura 11 - Distribuição de região, bloco e talhão



Fonte: Autoria Própria (2017)

Todas as variáveis acima foram mapeadas e integradas ao modelo construído, para retratar da forma mais fiel possível o cenário enfrentado diariamente em campo.

4.2. FUNCIONAMENTO DO MODELO

O modelo inicia seu funcionamento na aba 'Equipamentos', na qual o usuário primeiramente escolhe o equipamento que quer transportar, indica se é próprio ou de terceiros, define sua região de origem e descreve o nome comum da área. Define sua região de destino, descreve seu bairro e define seu limite de início da viagem, ou seja, a hora que deseja que sua máquina seja coletada. A coluna 'prancha necessária' é calculada após a definição do equipamento na primeira coluna.

No exemplo da Figura 12, foram escolhidos 9 equipamentos para gerar um sequenciamento de transporte.

Figura 12 - Cadastro de equipamentos a serem transportados

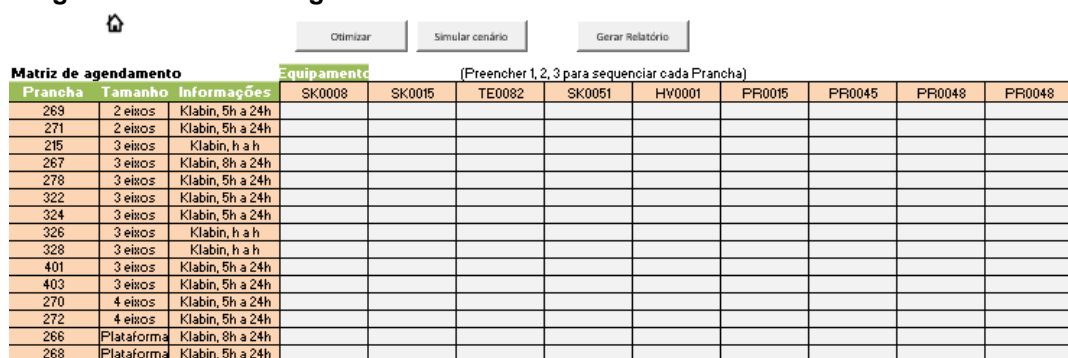
Cadastro de Equipamentos a serem transportados							Valores calculados	
Equipamento	Próprio / Terceiro	RF Origem	Descrição origem	RF Destino	Descrição destino	Limite Início viagem (h)	Prancha necessária	
SK0008	Próprio	ABT01	ARROZAL (CIR)	DAS01	AGUDOS (DAS)	10	3 eixos	
SK0015	Próprio	CIR01	ARROZAL (CIR)	DAS01	AGUDOS (DAS)	10	3 eixos	
TE0082	Próprio	CIR01	ARROZAL (CIR)	DAS01	AGUDOS (DAS)	10	3 eixos	
SK0051	Próprio	MANF	MANF	CSL01	SÃO LEOPOLDO (CSL)	19	2 eixos	
HV0001	Próprio	AVR01	NHALZINHO BAIRRO DOS FRANÇAS MD8 (CB)	FJS10	RETO APÓS ENTRADA MORRO AZUL M	19	2 eixos	
PR0015	Próprio	DRC01	RIO DO COBRE MD2 (DRC)	ALZ01	PIQUIRA 3 (CPQ)	10	3 eixos	
PR0045	Próprio	DRC01	RIO DO COBRE MD2 (DRC)	CPI01	PIQUIRA 3 (CPQ)	10	3 eixos	
PR0048	Próprio	DRC01	RIO DO COBRE MD2 (DRC)	CPI01	PIQUIRA 3 (CPQ)	10	3 eixos	
PR0048	Próprio	DRC01	RIO DO COBRE MD2 (DRC)	CPI01	PIQUIRA 3 (CPQ)	10	3 eixos	

Fonte: Autoria própria (2017)

Após isso, é necessário clicar no botão acima ‘Preparar dados’ para seguirmos para a tela de otimização. O botão arranja os dados no formato que o algoritmo consegue lê-los.

Os dados são preparados e abrem na aba ‘Agendamento’, exemplificada na Figura 13, na qual foi criada uma matriz de agendamento e que na primeira coluna ‘Prancha’ estão inseridas todas as pranchas disponíveis para transporte, assim como seu tamanho e seus horários disponíveis. Nas colunas seguintes, estão os equipamentos que foram escolhidos na etapa anterior.

Figura 13 - Matriz de agendamento

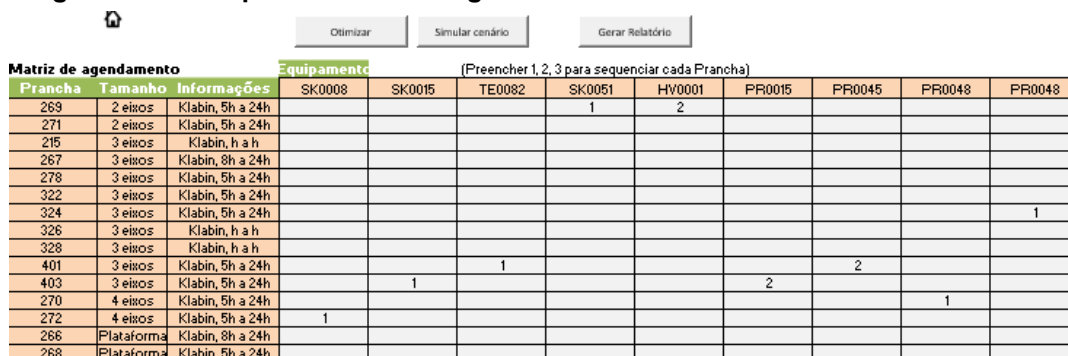


Matriz de agendamento			Equipamento (Preencher 1, 2, 3 para sequenciar cada Prancha)								
Prancha	Tamanho	Informações	SK0008	SK0015	TE0082	SK0051	HV0001	PR0015	PR0045	PR0048	PR0048
269	2 eixos	Klabin, 5h a 24h									
271	2 eixos	Klabin, 5h a 24h									
215	3 eixos	Klabin, h a h									
267	3 eixos	Klabin, 8h a 24h									
278	3 eixos	Klabin, 5h a 24h									
322	3 eixos	Klabin, 5h a 24h									
324	3 eixos	Klabin, 5h a 24h									
326	3 eixos	Klabin, h a h									
328	3 eixos	Klabin, h a h									
401	3 eixos	Klabin, 5h a 24h									
403	3 eixos	Klabin, 5h a 24h									
270	4 eixos	Klabin, 5h a 24h									
272	4 eixos	Klabin, 5h a 24h									
266	Plataforma	Klabin, 8h a 24h									
268	Plataforma	Klabin, 5h a 24h									

Fonte: Autoria própria (2017)

A partir desse momento, o usuário somente necessita clicar no botão ‘Otimizar’ para que o algoritmo programado forneça o sequenciamento do transporte, enumerando de forma crescente a sequência de transporte a ser realizada por cada caminhão prancha, o que pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 - Exemplo da matriz de agendamento



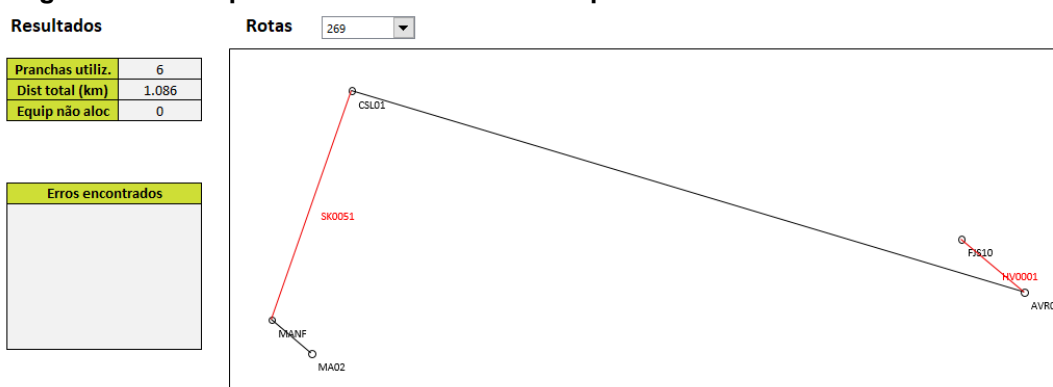
Matriz de agendamento			Equipamento (Preencher 1, 2, 3 para sequenciar cada Prancha)								
Prancha	Tamanho	Informações	SK0008	SK0015	TE0082	SK0051	HV0001	PR0015	PR0045	PR0048	PR0048
269	2 eixos	Klabin, 5h a 24h				1	2				
271	2 eixos	Klabin, 5h a 24h									
215	3 eixos	Klabin, h a h									
267	3 eixos	Klabin, 8h a 24h									
278	3 eixos	Klabin, 5h a 24h									
322	3 eixos	Klabin, 5h a 24h									
324	3 eixos	Klabin, 5h a 24h									1
326	3 eixos	Klabin, h a h									
328	3 eixos	Klabin, h a h									
401	3 eixos	Klabin, 5h a 24h			1				2		
403	3 eixos	Klabin, 5h a 24h		1				2			
270	4 eixos	Klabin, 5h a 24h								1	
272	4 eixos	Klabin, 5h a 24h	1								
266	Plataforma	Klabin, 8h a 24h									
268	Plataforma	Klabin, 5h a 24h									

Fonte: Autoria própria (2017)

A otimização traz uma sequência para cada prancha, o exemplo da Figura 14 mostra que para a primeira prancha 269, ela deve primeiramente transportar o equipamento SK0051 e depois HV0001. Assim como para os demais casos.

Logo abaixo, a rota otimizada, é demonstrada para cada prancha. No exemplo, vemos a rota da prancha 269. Ela inicia em MA02 (base), vai buscar o equipamento SK0051 na região da oficina central (MANF), para então deixá-la na região destino, CSL01. Esse caminhão prancha ainda tem mais um transporte de equipamentos para fazer, que é sair dessa última região e buscar o equipamento HV0001 que está na região AVR01, e deixá-lo na região destino FJS10.

Figura 15 - Exemplo de rota de um caminhão prancha

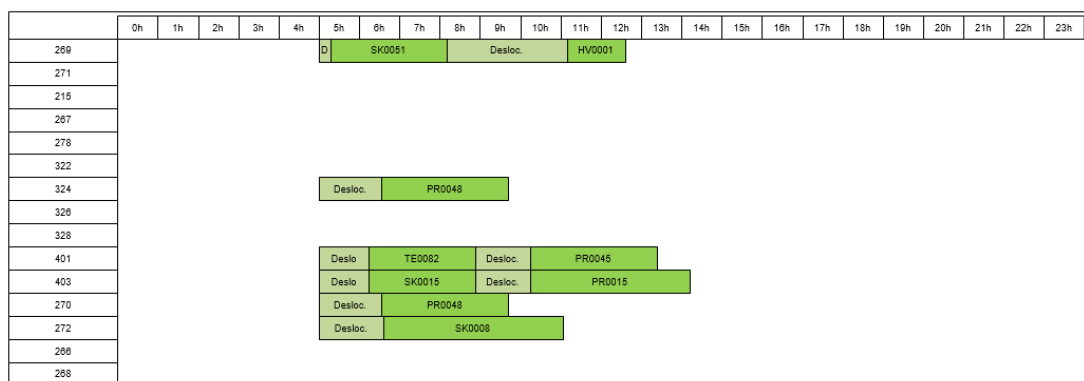


Fonte: Autoria própria (2017)

Na janela de rotas, conforme a Figura 15, é possível escolher a prancha para ser visualizado a rota. Para esse exemplo com nove transportes de equipamentos, é necessária a utilização de 6 pranchas, e a distância percorrida seria de 1.086 km.

Um gráfico de Gantt também é gerado, para melhor visualização das etapas de cada prancha para aquele agendamento, assim como facilita a visualização do pessoal da operação na hora de agendar o transporte com a área que solicitou a mudança da máquina, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Gantt dos transportes de cada prancha



Fonte: Autoria própria (2017)

No modelo é possível acompanhar de hora em hora onde está cada caminhão prancha, informando se está em momento de deslocamento até os equipamentos ou fazendo o transporte do mesmo.

4.3. FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO



O algoritmo foi construído em linguagem VBA, no Excel 2013, através de um código fonte. Sua função objetivo minimiza a distância percorrida e a quantidade de pranchas utilizadas, que são os principais fatores que compõem o custo do transporte. Foi estabelecido como critério de parada um número de 1000 iterações, conforme a Equação 3 abaixo:

$$FO = \min \sum_{i \in I} dist\ desloc + dist\ transp + cam\ utilizados, i = \{1, 2, \dots, 1000\} \quad (3)$$

Onde, *dist desloc* representa a distância de deslocamento de cada prancha; *dist transp* representa a distância de transporte de cada caminhão prancha, e *cam utilizados* traz a quantidade de caminhões necessários para o sequenciamento. Na variável “caminhões utilizados”, é aplicado uma penalidade a cada vez que um novo caminhão prancha é alocado no transporte.

Após a programação do usuário feita na aba ‘Equipamentos’, o algoritmo escolhe uma prancha aleatoriamente dentro da planilha ‘Pranchas’ exibida na Figura 17, para começar as iterações.

Figura 17 - Planilha Pranchas

Cadastre as Pranchas disponíveis  

Prefixo Prancha	Tamanho	Klabin / Terceiro	Início disp (h)	Fim disp (h)	Indisponível	Local de saída
269	2 eixos	Klabin	5	24		MA02
271	2 eixos	Klabin	5	24	1	MA02
215	3 eixos	Klabin			1	MA02
267	3 eixos	Klabin	8	24		MA02
278	3 eixos	Klabin	5	24		MA02
322	3 eixos	Klabin	5	24		MA02
324	3 eixos	Klabin	5	24		MA02
326	3 eixos	Klabin			1	MA02
328	3 eixos	Klabin			1	MA02
401	3 eixos	Klabin	5	24		MA02
403	3 eixos	Klabin	5	24		MA02
270	4 eixos	Klabin	5	24		MA02
272	4 eixos	Klabin	5	24		MA02
266	Plataforma	Klabin	8	24		MA02
268	Plataforma	Klabin	5	24		MA02

Fonte: Autoria própria (2017)

Após a escolha, é verificada se ela está disponível e se chegará para coletar a máquina em tempo hábil para transporte, de acordo com o horário ao qual foi programado. Após verificar que a prancha poderá fazer o transporte, o algoritmo busca o equipamento mais próximo (dentre as programadas) dessa prancha, leva até o seu destino, e busca o próximo equipamento mais perto, se houver.

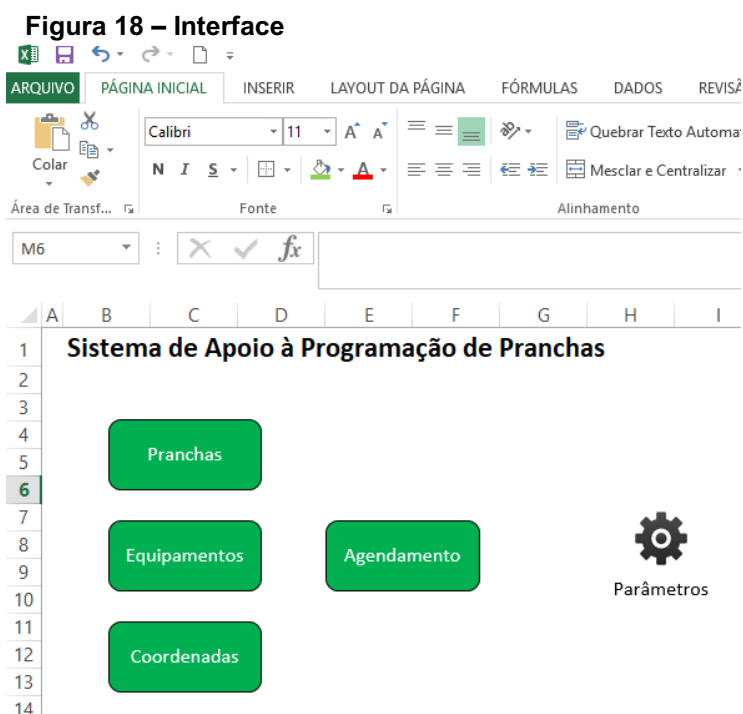
O cálculo de distância é realizado de forma aproximada, utilizando as coordenadas de cada bloco, com sua latitude e longitude. Agregando a conta a velocidade média do transporte, é possível saber em quanto tempo a máquina estará em seu destino final.

Em caso de a prancha anterior não conseguir fazer o transporte de mais equipamentos, o algoritmo retoma o sorteio da prancha e segue o mesmo caminho, até que se verifique que encerrou os equipamentos cadastrados, e assim ele cria uma solução para sua função objetivo, obedecendo o critério de parada e minimizando a FO.

As principais restrições do modelo se referem ao horário de transporte das máquinas, ao equipamento a ser alocado em cada caminhão prancha e se a prancha está indisponível, por exemplo por estar em manutenção mecânica ou realizando atividade de treinamento.

5. RESULTADOS

O modelo construído traz uma interface amigável para a área que faz o agendamento e controla o transporte das máquinas da empresa estudada, conforme Figura 18. Tudo foi desenvolvido em Excel, o que basicamente não trouxe custo de desenvolvimento ou implementação para a empresa.



Fonte: Autoria própria (2017)

O principal indicador da área de transporte de máquinas é a aderência à programação, ou seja, em quantas das vezes o caminhão prancha chegou para carregar a máquina no horário pré-agendado pela área dona do equipamento. Esse indicador de nível de serviço não serve apenas para verificar a performance da área, mas norteia também futuras aquisições de pranchas, mostrando se a capacidade de transporte está dentro do desejável, visto que o custo de uma máquina parada no campo aguardando transporte é alto e altamente improdutivo.

Pode-se observar ao longo do teste de implementação da ferramenta, durante dois meses, que os índices de aderência subiram 4,5%, pois os controladores de transporte tinham mais subsídio para definirem se conseguiriam atender a mudança no horário desejado, ou se proporião um novo horário para a área solicitante.

O indicador é calculado dividindo quantos transportes foram atendidos no horário agendado em relação ao total de transportes realizados num determinado período de tempo. O atendimento ao horário é importante devido à necessidade de não se deixar esses equipamentos parados no campo, já que isso significa perda produtiva.

Além desse, houve outros ganhos qualitativos, como padronização no processo com a utilização de uma única ferramenta para os agendamentos e controles, e poder de simulação caso seja necessário. Isso se deve a investigação em relação a velocidade média dos caminhões, tempos de processo e o método encontrado para medir a distância entre os dois blocos de transporte.

Foi construído um escopo, utilizando como base esse trabalho, para a contratação no mercado de um software exclusivo para esse tipo de transporte, o que pode trazer resultados ainda melhores para a companhia.

Resultados considerando o transporte de dez máquinas, 13 máquinas e 15 máquinas podem ser verificados, com as telas do modelo, no apêndice 1, para ilustração dos números obtidos em cada simulação.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A competitividade no setor florestal vem aumentando a cada ano e o nível dos empreendimentos já ganharam em escala o tamanho que podiam, agora o principal objetivo do setor é ganhar em produtividade e reduzir custos para sustentar os negócios (IBÁ, 2019).

Com base nesse conceito, o presente trabalho buscou minimizar os custos da atividade de transporte de máquinas na empresa estudada, obtendo relevantes melhorias de desempenho no principal indicador referente a essa atividade, e ganhos qualitativos, de difícil mensuração.

Pode-se dizer que tanto o objetivo geral, quanto os específicos, desse trabalho de conclusão de curso, foram alcançados, visto que o modelo tem funcionalidade trabalhando com dados reais. Todas as variáveis encontradas foram enquadradas no modelo construído, utilizando uma ferramenta de fácil acesso a todos na companhia. Além disso, os dados relacionados a aderência no transporte de máquinas obtiveram êxito no período avaliado de dois meses após a implementação da ferramenta.

Esse trabalho pode servir de base para a contratação de uma empresa especializada em sequenciamento de transporte, para a construção de um programa mais robusto, que leve em consideração toda a camada de estradas florestais da empresa, e estradas estaduais e federais que cortam os caminhos por onde há deslocamento de máquinas da empresa, que resulta em um raio médio de 120km, podendo chegar a fazer mudanças para localidades a 320km.

Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se realizar um estudo em relação a eficiência computacional do algoritmo evolutivo apresentado, aumentando o número de iterações, de blocos florestais considerados, e o aumento no número de mudanças para estressar o modelo desenvolvido, podendo se investigar também os atuais níveis dos indicadores da empresa em relação a esse assunto.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. L. **Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para a Análise de Decisões**. 2. ed. Rio de Janeiro. LTC, 1998.

ANDRADE, E. L. **Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para Análise de Decisões**. 3 ed. Rio de Janeiro. LTC, 2002.

BARBOZA, A. O; NEVES, F; BORTOLOTTI, S; SOUZA, R. A. Programação linear inteira mista e algoritmo genético aplicados ao problema de transferência de estocagem de produtos em uma indústria petrolífera. **Sistemas & Gestão**. V.10, p. 561-574, 2015.

BASGALUPP, M. P. **LEGAL-Tree: um algoritmo genético multi-objetivo para indução de árvores de decisão**. 2010. 94f. Tese (Doutorado). Ciências de Computação e Matemática Computacional. Universidade de São Paulo, São Carlos.

Chandra C.; Liu Z.; He J.; Ruohonen T. A binary branch-and-bound algorithm to minimize maximum scheduling cost. **Omega**, Londres, v. 42, p.9-15, fev 2013.

CHASE, R. B., AQUILANO, N. J., JACOBS, F. R. **Administração da produção para a vantagem competitiva**. Porto Alegre: Bookman. 2006

CHINNECK, J. W. **Practical Optimization**: a Gentle Introduction. 2004

CORNUEJOLS, G.; TUCÜNTÜ, R. **Optimization Methods in Finance**. Camegie Mellon University, Pittsburgh, 2005

COSTA, M. F. **Aplicação de meta-heurísticas no escalonamento de motoristas para o transporte de madeira**. 2012. 63f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

Dambroz Implementos, Caxias do Sul. Disponível em: <<http://www.dambroz.com.br/produtos/carrega-tudo-4-eixos/>>, acesso em 01 nov

2019.

DULLAERT, W., MAES, B., VERNIMMEN, B., WITLOX, F. An evolutionary algorithm for order splitting with multiple transport alternatives. **Expert Systems With Applications**, v. 28, p.201-208, 2005.

FERREIRA, A. H. **Proposta de um modelo em programação linear para a solução de problemas de sistemas produtivos job shop com setup dependentes da sequência**. 2012. 112 f. Tese (Doutorado). Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo.

FREITAS, A. A. **Soft computing for knowledge discovery and data mining**. Ed. Springer US, 2008. 433p.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLDBARG, M. C., LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Campus, 2005.

JENA, S.D. POGGI, M. Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming. **European Journal of Operational Research**. V.230, abr 2013.

Jonh Deere Florestal. Disponível em: <<https://www.deere.com.br/pt/florestal/>>, acesso em 01 mai 2017.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**. 4. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 223 p.

LACOWICZ, P. G.; BERGER, R.; TIMOFEICZYK JUNIOR, R.; SILVA, J. C. G. L. Minimização dos custos de transporte rodoviário florestal com o uso da programação linear e otimização do processo. **Floresta**. Curitiba, v. 32, n. 1, p.75-87, fev. 2002.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LEUNG, J. T. **Handbook of scheduling: algorithms, models, and performance analysis**. Boca Raton: Chapman & Hall, 2004.

LOESCH, Cláudio; HEIN, Nelson. **Pesquisa operacional: fundamentos e modelos**. São Paulo: Saraiva, 2009. 248p.

LOPES, E. S.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P.; RIBEIRO, A.A.C.S. Harvesting and wood transport planning with SNAP III program (Scheduling and Network Analysis Program) in a pine plantation in Southeast Brazil. **Arvore**, Viçosa, v. 27, n.6, Nov./Dez., 2003.

MALINOVSKI, R. A. **Modelo matemático para otimização dos custos operacionais de transporte de toras com base na qualidade de estradas**. Tese de Doutorado. 2010. 180f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R. **Evolução dos Sistemas de Colheita de Pinus na Região Sul do Brasil**. Curitiba, PR: FUPEF, 1998.

MARINS, F. A. S. **Introdução à Pesquisa Operacional**. (Apostila). São Paulo: Cultura Acadêmica. UNESP - Universidade Estadual Paulista. São Paulo, 2011.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da produção**. São Paulo: Saraiva, 2005.

MONTERO, A; DIAZ, I. M; BRONT, J. J. An Integer Programming approach for the Time-Dependent Traveling Salesman Problem with Time Windows. **Computers and Operations Research**. Jun 2017.

MOREIRA, Daniel Augusto. **Pesquisa Operacional: Curso Introdutório**. 2 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

MORO, L. F. L. **Técnicas de Otimização Mista-Inteira para o Planejamento e Programação de Produção em Refinarias de Petróleo**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2000.

NOGUEIRA, F. **Programação Inteira**. Notas de Aula. 2010. UFJF. Disponível em:<ufjf.br/files/ProgramacaoInteira1>, acesso em 23 out 2017.

PINEDO, M. L. **Scheduling: theory, algorithms, and systems**. 3rd. New York: Springer, 2008.

Relatório IBÁ 2015, São Paulo. Disponível em:<iba.com.br>, acesso em 27 out 2017.

Relatório IBÁ 2019, São Paulo. Disponível em:<iba.com.br>, acesso em 01 nov 2019.

RUSSOMANO, V. H. **Planejamento e Controle da Produção**. 6. ed. São Paulo: Pioneira, 2000.

SESSIONS, J. A heuristic algorithm for the solution of the variable and fixed cost transportation problem. In. SYMPOSIUM ON SYSTEMS ANALYSIS IN FOREST RESOURCES. Athens. 1985. **Proceedings**. Georgia Center for Continuing Education. 1987. p. 324-36.

SLACK, N. **Vantagem competitiva em manufatura: atingindo competitividade nas operações industriais**. Tradução de Sônia Maria Corrêa. São Paulo: Atlas, 1993.

SOUZA, D. O. **Algoritmos genéticos aplicados ao planejamento do transporte principal de madeira**. Tese de Doutorado. 2004. 184f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SPERANZA, M.G. Trends in transportation and logistics. **European Journal of Operational Research**. V.239, ago 2016.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**. 8. ed. Prentice Hall, 2008.

TUBINO, D.F. **Planejamento e controle da produção**. São Paulo: Atlas, 2007.

TUBINO, D.F. **Planejamento e controle da produção**. 2. ed .São Paulo: Atlas, 2009.

ZIONTS, S. **Linear and integer programming**. New Jersey: Prentice-Hall, 1974.

WOLSEY, L.A. **Integer programming**. New York : Wiley, 1998.

YIN, R.K. **Estudo de caso – planejamento e métodos**. 2ª Edição. Porto Alegre: Bookman. 2001

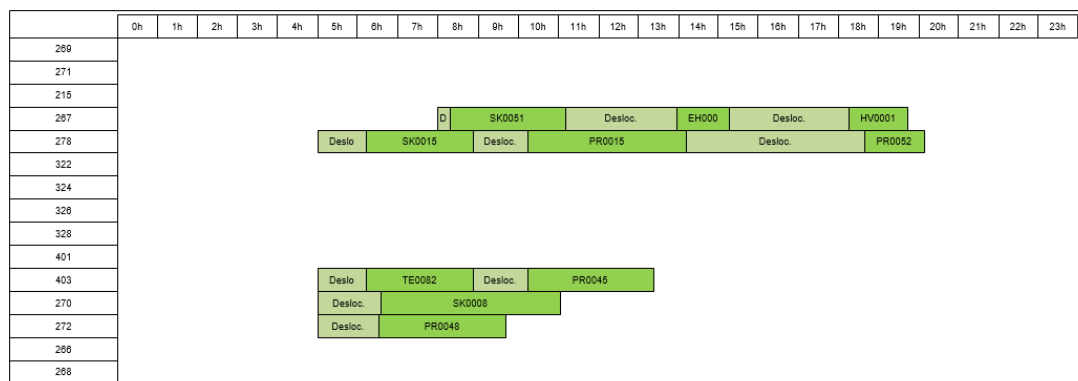
APÊNDICE

1 - Resultados para o transporte de dez máquinas.

Matriz de agendamento			Equipamento									
Prancha	Tamanho	Informações	SK0008	SK0015	TE0082	SK0051	HV0001	PR0015	PR0045	PR0048	EH0005	PR0052
269	2 eixos	Klabin, 5h a 24h										
271	2 eixos	Klabin, 5h a 24h										
215	3 eixos	Klabin, h a h										
267	3 eixos	Klabin, 8h a 24h										
278	3 eixos	Klabin, 5h a 24h		1		1	3				2	
322	3 eixos	Klabin, 5h a 24h						2				3
324	3 eixos	Klabin, 5h a 24h										
326	3 eixos	Klabin, h a h										
328	3 eixos	Klabin, h a h										
401	3 eixos	Klabin, 5h a 24h										
403	3 eixos	Klabin, 5h a 24h										
270	4 eixos	Klabin, 5h a 24h			1				2			
272	4 eixos	Klabin, 5h a 24h	1									
268	Plataforma	Klabin, 8h a 24h								1		
268	Plataforma	Klabin, 5h a 24h										

Próprio / Terceira	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio
RF Origem	ABT01	CIR01	CIR01	MANF	AVR01	DRC01	DRC01	DRC01	FSP09	AFK01	
RF Destino	ARROZAL (C)	ARROZAL (C)	ARROZAL (C)	MANF	PINHALZINH	RIO DO COBR	RIO DO COBR	RIO DO COBR	MD2 (DRC)		
RF Destino	DAS01	DAS01	DAS01	CSL01	FJS10	ALZ01	CPI01	CPI01	FJS10	ALV01	
RF Destino	AGUDOS (DA)	AGUDOS (DA)	AGUDOS (DA)	SÃO LEOPOL	BARRO PRE	PIQUIRA 3 (C)	PIQUIRA 3 (C)	PIQUIRA 3 (CPQ)			
Início (h)	10	10	10	19	19	10	10	10	15	15	
Fim (h)	3 eixos	3 eixos	3 eixos	2 eixos	2 eixos	3 eixos	3 eixos	3 eixos	3 eixos	3 eixos	

Pranchas utiliz.	5
Dist total (km)	1.177
Equip não aloc	0



2 – Resultados para o transporte de 13 máquinas

Matriz de agendamento			Equipamento												
Prancha	Tamanho	Informações	SK0008	SK0015	TE0082	SK0051	HV0001	PR0015	PR0045	PR0048	EH0005	PR0052	FB0009	SK0007	TP0105
269	2 eixos	Klabin, 5h a 24h													
271	2 eixos	Klabin, 5h a 24h													
215	3 eixos	Klabin, h a h													
267	3 eixos	Klabin, 8h a 24h				1	3				2				
278	3 eixos	Klabin, 5h a 24h	2		1									1	
322	3 eixos	Klabin, 5h a 24h							2						
324	3 eixos	Klabin, 5h a 24h		1								3			
326	3 eixos	Klabin, h a h													
328	3 eixos	Klabin, h a h													
401	3 eixos	Klabin, 5h a 24h													
403	3 eixos	Klabin, 5h a 24h								1					
270	4 eixos	Klabin, 5h a 24h											1		
272	4 eixos	Klabin, 5h a 24h													
266	Plataforma	Klabin, 8h a 24h													1
268	Plataforma	Klabin, 5h a 24h													

Prancha / Tamanho	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio
RF Origem	ABT01	CIR01	CIR01	MANF	AVR01	DRC01	DRC01	DRC01	FSP09	AFK01	CIR01	AGF01	CSJ01	
Descrição origem	ARROZAL (CIR)	ARROZAL (CIR)	ARROZAL (CIR)	MANF	PINHALZINHO	RIO DO COBRE	RIO DO COBRE	RIO DO COBRE MD2 (DRC)						
RF Destino	DAS01	DAS01	DAS01	CSL01	FJS10	AL201	CP101	CP101	FJS10	ALV01	ABT01	FSP09	APP01	
Descrição destino	AGUDOS (DAS)	AGUDOS (DAS)	AGUDOS (DAS)	SÃO LECOPOLI	BARRO PRETO	FIGUEIRA 3 (CP)	FIGUEIRA 3 (CP)	FIGUEIRA 3 (CP)						
Início (h)	10	10	10	19	19	10	10	10	15	15	10	10	10	
Fim (h)	3 eixos	3 eixos	3 eixos	2 eixos	2 eixos	3 eixos	3 eixos	3 eixos	3 eixos	3 eixos	4 eixos	2 eixos	Plataforma	

Pranchas utiliz.	7
Dist total (km)	1.413
Equip não aloc	0

