



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

GIOVANNI CORREIA VIEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO TRANSPORTE DE MÁQUINAS EM
FLORESTAS DE PRODUÇÃO**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

GIOVANNI CORREIA VIEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO TRANSPORTE DE MÁQUINAS EM
FLORESTAS DE PRODUÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais, na Área de Concentração Ciências Florestais.
Orientador: Dr. Gilson Fernandes da Silva.
Coorientador: Dr. Geraldo Regis Mauri.

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Sul, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

V657m Vieira, Giovanni Correia, 1985-
Modelagem matemática do transporte de máquinas em florestas de
produção. – 2018.
133f. : il.

Orientador: Gilson Fernandes da Silva.
Coorientador: Geraldo Regis Mauri.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do
Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Planejamento. 2. Logística empresarial. 3. Pesquisa operacional. 4.
Manejo florestal. I. Silva, Gilson Fernandes da. II. Mauri, Geraldo Regis. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias. IV. Título.

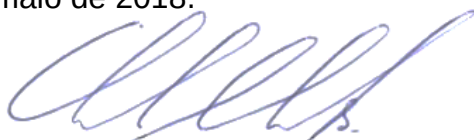
CDU: 630

MODELAGEM MATEMÁTICA DO TRANSPORTE DE MÁQUINAS EM FLORESTAS DE PRODUÇÃO

Giovanni correia vieira

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais, na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 29 de maio de 2018.



Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes. (Examinador externo)
Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná



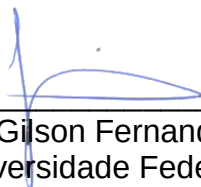
Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça. (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Nilton César Fiedler. (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri. (Coorientador)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva. (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

À Universidade Federal do Espírito Santo, ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pela oportunidade de estudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva, pela orientação, profissionalismo, comprometimento e amizade.

Ao Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri, pela coorientação, por sempre ter me recebido quando precisava de ajuda, pelas importantes considerações e amizade.

Aos membros da Comissão Examinadora, Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça, Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes e Prof. Dr. Nilton César Fiedler, pelas relevantes contribuições para esta tese.

Ao Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça, pelo comprometimento em todos os trabalhos que temos realizado desde o período que foi meu orientador de mestrado, pelas considerações importantes neste trabalho e pela amizade.

Não posso esquecer dos meus orientadores da graduação: o Prof. Dr. Cristiano Tagliaferre por ter me auxiliado na escrita do meu primeiro projeto, pelos ensinamentos na área de meteorologia agrícola e recursos hídricos e pela amizade; a Prof. Dra. Luciana Gomes Castro por despertar em mim o interesse pela pesquisa, pelos ensinamentos na área de pedologia e física do solo e pela amizade; o Prof. Dr. Luís Carlos de Freitas pelo incentivo a fazer pós-graduação, pela orientação na monografia de conclusão da graduação e em diversos outros trabalhos e pela amizade; o Prof. Dr. Otoniel Magalhaes Moraes (*in memoriam*) por orientar no meu primeiro artigo e pela amizade.

Aos amigos que fiz no Laboratório de Manejo e Mensuração Florestal da UFES: Anny, Antônio, Catherine, Clayton, Diego Maradona, Evandro, Isáira, Janiel, Jeangeles,

Jeferson, Julyana, Leonardo, Livia, Luandson, Luciana, Marcelo, Márcia, Quétilla, Rodrigo, Sandra, Sandro, Taíse, pela amizade, ajuda e boa convivência neste período.

A todos os amigos que fiz em Jerônimo Monteiro e Alegre.

Aos meus pais Bolivaldo e Luzia, pelo incentivo nos meus estudos e por serem pais maravilhosos.

Ao meu irmão Thiago, pelo incentivo e amizade.

À Luciana, pelo amor e companheirismo.

RESUMO

VIEIRA, Giovanni Correia, **Modelagem matemática do transporte de máquinas em florestas de produção**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro. Orientador: Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva. Coorientador: Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri.

A colheita e o transporte florestal são responsáveis pela maior parte dos custos da madeira posta no pátio das indústrias de celulose. Um planejamento eficiente poderá reduzir os custos de produção das empresas deste segmento. Neste sentido, a pesquisa operacional possui potencial para ser utilizada na solução, de forma ótima, de um problema recorrente nas empresas do setor florestal, que é a necessidade de eficiência na logística de transporte das máquinas florestais, de forma a evitar o máximo possível o tempo em espera para o transporte. Portanto, o objetivo deste trabalho é propor um modelo de programação e roteirização do transporte de máquinas florestais utilizando técnicas de pesquisa operacional. Trata-se de um problema multiobjetivo que busca determinar a rota de menor distância, o atraso mínimo possível e o número ideal de veículos para o transporte de máquinas florestais. O problema apresenta também restrições a serem atendidas, como horário específico para o transporte de cada máquina, frota heterogênea para atender as máquinas que possuem dimensões diferentes. A metodologia de modelagem baseou-se no problema de roteamento de veículos com coleta e entrega, janelas de tempo e frota heterogênea – *PRVCEJTFH* com modificações para atender os objetivos deste estudo. Como método de solução foi utilizado o método exato por meio do algoritmo *Branch and Bound*. O modelo de otimização do transporte de máquinas florestais possibilitou encontrar uma solução ótima para determinar a rota de transporte com menor distância ponderada pela qualidade da estrada e minimizou o número de veículos pranchas utilizados no transporte das máquinas. Estas soluções têm relação direta com os custos associados ao transporte de máquinas florestais. Em situações de alta demanda da empresa o modelo minimizou o atraso. Nestas circunstâncias o gestor pode decidir por reduzir os atrasos independentemente do número de veículos necessários para o transporte das máquinas. Esta decisão deve ser tomada considerando aspectos econômicos e técnicos. O modelo proposto apresenta eficácia e eficiência, tornando possível obter a melhor solução possível em cada situação e em um tempo aceitável.

Palavras chave: Planejamento, logística, otimização, pesquisa operacional, manejo florestal.

ABSTRACT

VIEIRA, Giovanni Correia, **Mathematical modeling of transport of machines in production forests**. 2018. Thesis (Doctor degree in Forestry Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro. Adviser: Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva. Co-advisor: Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri.

Harvesting and forest transport account for most of the costs of pulpwood in the pulp industry's yard. Efficient planning can reduce the production costs of companies in this segment. In this sense, operational research has the potential to be used in the optimal solution of a recurring problem in forestry companies, which is the need for efficiency in the transportation logistics of forestry machines, in order to avoid as much as possible the waiting time for transport. Therefore, the objective of this work is to propose a model of programming and routing of the transport of forest machines using operational research techniques. It is a multiobjective problem that seeks to determine the shortest distance route, the minimum possible delay and the ideal number of vehicles for the transport of forest machines. The problem also presents constraints to be met, such as a specific time for the transportation of each machine, a heterogeneous fleet to meet the machines that have different dimensions. The modeling methodology was based on the problem of routing vehicles with collection and delivery, time windows and heterogeneous fleet - *PRVCEJTFH* with modifications to meet the objectives of this study. As a method of solution, the exact method using the Branch and Bound algorithm was used. The model of optimization of the transport of forest machines made it possible to find an optimal solution to determine the transport route with the lowest distance weighted by the quality of the road and minimized the number of vehicles used to transport the machines. These solutions are directly related to the costs associated with the transportation of forest machines. In situations of high demand the company minimized the delay. In these circumstances the manager can decide to reduce the delays regardless of the number of vehicles needed to transport the machines. This decision should be made considering economic and technical aspects. The proposed model shows effectiveness and efficiency, making it possible to obtain the best possible solution in each situation and in an acceptable time.

Keywords: Planning, logistics, optimization, operational research, forest management.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	HIPÓTESES	11
3	OBJETIVOS	12
3.1	OBJETIVO GERAL	12
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
4	REVISÃO DE LITERATURA	13
4.1	PLANEJAMENTO FLORESTAL	13
4.2	PESQUISA OPERACIONAL.....	15
4.2.1	Programação linear	15
4.2.2	Programação linear inteira	16
4.2.3	Problema de roteamento de veículos	17
4.3	SISTEMAS COMPUTACIONAIS APLICADOS AO PLANEJAMENTO FLORESTAL	25
5	METODOLOGIA.....	26
5.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	26
5.2	FLUXOGRAMA METODOLÓGICO	27
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
6.1	CENÁRIO 1	48
6.2	CENÁRIO 2	50
6.3	CENÁRIO 3	54
6.4	CENÁRIO 4	64
7	CONCLUSÕES.....	73
8	REFERÊNCIAS	74
9	ANEXO I: EXEMPLO ALGÉBRICO	80
10	ANEXO II: MODELO ALGÉBRICO DESENVOLVIDO EM <i>PYTON</i>.....	122
11	ANEXO III: MODELO DESENVOLVIDO EM <i>OPL</i>	128

1 INTRODUÇÃO

O planejamento florestal consiste na definição de metas de produção para períodos definidos de tempo, considerando as previsões de mercado, os recursos disponíveis e o objetivo do empreendimento (GOMIDE, 2009). Em um planejamento eficiente é importante que sejam utilizadas ferramentas que facilitem e operacionalizem o trabalho do gestor, de forma que o planejamento seja um processo menos empírico e mais científico de decisão, assim como, é necessário delimitar a validade de cada solução e identificar as principais variáveis que devem ser controladas (MACHADO; LOPES, 2014). Dentre essas ferramentas destaca-se a pesquisa operacional que utiliza modelos matemáticos compostos por equações e inequações para representar de forma simplificada a realidade, por meio da maximização ou minimização de um ou mais objetivos, usualmente descrito por uma função matemática sujeita a um conjunto de restrições, como por exemplo, redução de custos e limitação de máquinas (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

A pesquisa operacional pode ser utilizada na otimização de solução de um problema recorrente nas empresas do setor florestal, como a eficiência na logística de transporte de máquinas florestais. Essas máquinas possuem elevado custo fixo, tornando necessário que estejam em operação continuamente como forma de diluir os custos por unidade de produção. Portanto, o foco desse planejamento é minimizar os custos de transporte, reduzindo os atrasos e limitações dos veículos de transporte.

O planejamento do transporte de máquinas pode ser tratado no âmbito da pesquisa operacional, empregando-se modelos que tratam de problemas de roteamento de veículos (*PRV*), que buscam auxiliar no planejamento da sequência ótima de rotas atendendo às diferentes restrições do problema. O *PRV* aborda uma série de problemas cujo objetivo é encontrar uma rota de menor custo para atender, por exemplo, cidades e clientes dispersos geograficamente, cada um com uma demanda, que pode ser atendida por um ou vários depósitos utilizando uma frota de veículos de diversas capacidades (DANTZIG; RAMSER, 1959; GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2016).

A logística de transporte é uma atividade estratégica responsável pela movimentação de cargas de uma origem até um destino, que busca definir um modal

e uma rota que reduz custos e tempo no transporte de mercadorias (ALMEIDA; PEDRO FILHO, 2010).

O transporte de máquinas é realizado por diferentes tipos de veículos, com destaque para os caminhões tipo plataforma e veículos articulados de 2, 3 e 4 eixos com capacidade de carga variada, sendo que cada veículo prancha somente poderá transportar uma máquina se não exceder a capacidade de carga (peso e/ou dimensões). Essas máquinas estão dispersas geograficamente nas áreas de produção, sendo que cada máquina somente está disponível para ser transportada para o talhão j depois de colher o talhão i .

Os veículos prancha saem da garagem a partir das 06:00 h e deslocam para o local de coleta das máquinas, após o carregamento os veículos vão para os talhões que serão entregues às máquinas. O ciclo de coleta e entrega das máquinas continua até serem transportadas todas as máquinas agendadas para aquele dia. Os veículos pranchas têm até as 18:00 h para retornarem à garagem para serem guardados ou realizarem manutenções. Para a modelagem desse tipo de problema pode-se utilizar como base, devido semelhanças, o modelo de Roteamento de veículos com coleta e entrega, janelas de tempo e frota heterogênea – *PRVCEJTFH*.

O *PRVCEJTFH* é uma variante dos problemas de roteamento de veículos que possui algumas peculiaridades como coletar primeiro o produto em um fornecedor e depois entregar a um determinado cliente, sendo que ele possui um horário específico para coletar e entregar um produto e seus veículos possuem capacidade de carga variada (WANG et al., 2015). No caso do problema abordado neste estudo, é importante que o veículo faça a rota sempre na sequência de pegar primeiro a máquina e levar para o seu destino, assim como chegar no horário adequado para recolher a máquina (CALVETE; GALE; OLIVEROS, 2007).

As empresas do setor realizam geralmente o planejamento do transporte dessas máquinas com base na experiência do gestor, sendo adotado apenas programas de controle de frota, que contêm informações sobre a localização e disponibilidade mecânica das máquinas. Baseado nessa carência de estudos, este trabalho busca otimizar os custos de transporte, evitando que as máquinas fiquem ociosas à espera de transporte.

2 HIPÓTESES

As hipóteses a serem analisadas neste trabalho para alcançar os objetos propostos são:

H₁: O problema de roteamento de veículos com coleta e entrega, janelas de tempo e frota heterogênea com adaptações possui a capacidade de representar a realidade de transporte de máquinas florestais em empresas do setor.

H₂: O método de solução proposto é eficiente e eficaz para a resolução do problema de otimização do transporte de máquinas.

H₃: O efeito do modelo em diferentes cenários (baixa, média, alta e extrema demanda).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Propor e validar um modelo de programação e roteirização para a otimização do transporte de máquinas florestais utilizando técnicas de pesquisa operacional, visando contribuir para melhor gestão do transporte de máquinas de forma a reduzir os custos e aumentar a eficiência na utilização dos fatores de produção.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Minimizar o atraso no transporte das máquinas florestais;
- Minimizar o número de veículos para o transporte de máquinas florestais;
- Minimizar a distância percorrida pelos veículos prancha no transporte das máquinas.

4 REVISÃO DE LITERATURA

O transporte eficiente das máquinas é importante para evitar atrasos nas operações florestais, manter a produtividade e reduzir os custos. Operações como a colheita e o transporte florestal são responsáveis por uma parcela significativa dos custos da madeira posta nas fábricas das empresas do setor de base florestal. Neste sentido, as técnicas de pesquisa operacional têm potencial para ser uma ferramenta eficiente no auxílio do gestor florestal na tomada de decisão, tornando possível a redução dos custos e, conseqüentemente, aumentar a lucratividade das empresas do setor.

4.1 PLANEJAMENTO FLORESTAL

O planejamento trata-se da definição de objetivos de uma corporação e dos meios para conseguir alcançar esses objetivos, sendo composto por planos e metas a serem atingidas. Para que o planejamento seja efetivo, é importante que o gestor compreenda bem o contexto e o ambiente em que a organização está inserida; utilize métodos científicos que facilitem a tomada de decisões; empregue ferramentas que facilitem e operacionalizem o trabalho do administrador, de forma que o planejamento seja um procedimento menos empírico e mais científico de decisão; delimite a validade de cada solução, identificando as principais variáveis que devem ser controladas; defina metas de produção para períodos definidos de tempo, considerando as previsões de mercado, os recursos disponíveis e o objetivo do empreendimento (BETTINGER et al, 2009; GOMIDE, 2009; GRIFFIN, 2007; MACHADO; LOPES, 2014).

O planejamento trata de questões importantes para a sustentabilidade a longo prazo dos recursos florestais, bem como o fluxo constante de madeira (ANDERSSON, 2005). Pode ser definido como uma identificação de atividades integradas, ao longo do tempo, e necessárias para atingir os objetivos dentro do manejo florestal (SESSIONS; BETTINGER, 2001).

Os principais objetivos do planejamento florestal são: fornecer informações para atender objetivos e metas; orientar os planos operacionais de curto prazo para

atender as metas do plano de longo prazo; analisar de maneira econômica os sistemas clássicos e alternativos; obter informações como rendimentos atuais e futuros para mensurar a disponibilidade de madeira; fornecer informações para as operações; direcionar, centralizar; e gerir os planos e decisões, aferindo o progresso (MACHADO; LOPES, 2014).

No planejamento são geralmente adotados os modelos hierárquicos como forma de melhorar o desempenho e facilitar a execução. Nesse contexto, os sistemas são conectados de forma hierárquica para atender os objetivos e metas da empresa em cada nível, sendo esses níveis classificados em: planejamento estratégico, planejamento gerencial e planejamento operacional (GUNN, 1991). Os planos e objetivos do planejamento devem ser compatíveis entre os níveis hierárquicos, de modo que ocorra maior especificidade e menor tempo no sentido do planejamento estratégico para o planejamento operacional (BETTINGER et al., 2009).

Corrêa; Corrêa (2006) afirma que no planejamento deve-se levar em consideração a decomposição dos problemas em subproblemas menores, a resolução de forma sequencial do maior horizonte para o menor, a consolidação de cada nível, assim como a dinâmica das atividades. Nesse contexto, Grunig (1992) discorre sobre a importância da comunicação entre os níveis de planejamento, independentemente do porte das empresas, para conseguir bom desempenho e alcançar os objetivos propostos. O planejamento de forma integrada só é possível com fluxos de informações entre os níveis, sendo estes classificados em estratégico, gerencial e operacional (KUNSCH, 2003).

O planejamento estratégico tem por objetivo estabelecer o destino da empresa, determinar critérios para a alocação de recursos, prioridades e meios necessários para atingir as metas estratégicas da empresa. O planejamento estratégico é realizado geralmente pelos gestores de alto escalão da empresa, no qual se define as metas de longo prazo da empresa e os meios para alcançá-las (GRIFFIN, 2007). Na área florestal, trata do planejamento de longo prazo, geralmente de 10 a 20 anos ou de 2 a 4 rotações e busca a escolha dos objetivos da organização e a seleção de alternativas a serem consideradas para cumprimento desses objetivos (MACHADO; LOPES, 2014).

O planejamento gerencial busca atender componentes específicos do planejamento estratégico. É realizado por gestores de médio escalão, tem uma

abordagem mais específica e concreta. São feitos planos de médio prazo com escala média de até 5 anos no horizonte de planejamento no setor florestal, e, estão mais relacionados com a realização de uma atividade do que com a decisão de o que fazer (MACHADO; LOPES, 2014).

O planejamento operacional busca determinar como será executado o plano gerencial para que as metas do plano operacional sejam atendidas, é desenvolvido geralmente por gestores da área operacional e tem como objetivo o desenvolvimento de estruturas de aferição, controle e coordenação; e, também busca antecipar os problemas que podem comprometer as metas do plano tático, limitado pelas restrições impostas pelo plano gerencial. (MACHADO; LOPES, 2014).

O planejamento florestal possui objetivos limitados por restrições com relação à produção e ao uso sustentável dos recursos naturais. Nesse contexto, pode-se utilizar modelos matemáticos para representar a realidade de forma simplificada, de forma a alocar os recursos escassos de forma ótima. A seção da matemática que trata desses problemas é conhecida como pesquisa operacional. No setor florestal, os ramos da pesquisa operacional que mais se destacam são: Programação Linear (*PL*), Programação Inteira (*PI*), Programação Inteira Mista (*PIM*), Programação Dinâmica (*PD*), Programação Multiobjetivo (*PMO*), meta-heurísticas e simulação.

4.2 PESQUISA OPERACIONAL

4.2.1 Programação linear

A Programação Linear – *PL* trata de modelos matemáticos, compostos de equações e inequações, que são utilizados no planejamento de atividades com o objetivo de obter um resultado ótimo de acordo com os objetivos especificados (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). É um modelo matemático de otimização em que todas as funções da variável contínua são lineares. De uma forma geral, o modelo de *PL* é composto de uma função objetivo, que tem por finalidade maximizar ou minimizar um objetivo (1); sujeito a restrições (2) e (3), que são compostas de equações e inequações, cuja função é restringir os recursos disponíveis para a solução do problema; e, as restrições de não negatividade que evitam que os recursos sejam

utilizados em um nível negativo (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2016; HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Maximizar ou minimizar:

$$Z = cx \quad (1)$$

Sujeito a:

$$Ax \geq b \quad (2)$$

$$x \geq 0, \forall i \text{ e } j \quad (3)$$

em que: x é a variável de decisão; c é o coeficiente de custo; A é a matriz de restrições; e b vetor coluna dos componentes da restrição.

Com relação à solução de problemas de *PL*, o algoritmo *Simplex* é um dos mais utilizados (MATOUSEK; GÜARTNER, 2007). O algoritmo parte de uma solução viável inicial para identificar novas soluções em extremos adjacentes de qualidade igual ou superior à solução anterior por meio de um método iterativo (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2016). O procedimento é concluído quando for encontrado o melhor valor para a função objetivo em um desses vértices (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2016; HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

4.2.2 Programação linear inteira

A Programação Linear Inteira – *PLI* trata de problemas em que todas ou algumas variáveis são discretas. Em situações que todas as variáveis devem assumir valores inteiros, trata-se de um problema de programação inteira pura. Em ocasiões que apenas algumas variáveis estão sujeitas a condição de integralidade, trata-se de um problema de programação inteira mista (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2016). Já em circunstâncias em que as variáveis só podem assumir valores 0 ou 1, trata-se de programação inteira binária (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

O modelo de *PLI* é semelhante ao de *PL*, no qual é acrescentado apenas restrições de integralidade nas variáveis que precisam ser inteiras. Por outro lado, a solução de um modelo de *PLI* é mais complexa, pois a maioria dos problemas são classificados como problemas de difícil solução, ou seja, possuem um número muito grande de soluções possíveis que precisam ser avaliadas (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Com relação às técnicas de solução de problemas de *PLI*, Goldbarg; Goldbarg; Luna (2016) citam as técnicas de enumeração (*branch-and-bound*, enumeração implícita e restrições *surrogate*), técnicas de cortes (cortes inteiros, cortes combinatórios, cortes de interseção e método de decomposição de *Benders*) e técnicas híbridas (*branch-and-cut* e teoria de grupo). Dessas técnicas, a mais utilizada é o *branch-and-bound*, que consiste em realizar uma enumeração inteligente dos pontos candidatos a solução ótima inteira de um problema (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2016).

4.2.3 Problema de roteamento de veículos

O problema de roteamento de veículos – *PRV* apresentado por Dantzig; Ramser (1959) foi derivado do clássico problema do caixeiro viajante. O *PRV* tem por objetivo estabelecer um roteiro que minimize o custo total da rota, cada ponto seja visitado apenas uma vez, os veículos não excedam a capacidade de carga e que inicie e termine a rota em um depósito ou base de veículos (LAPORTE et al., 2000).

Gendreau; Laporte; Séguin (1996) definem o *PRV* como o grafo $G = (V, A)$, em que V é o conjunto de vértices, A é o conjunto de arestas conectando os vértices e o vértice V_0 é o depósito e/ou a garagem dos veículos. Já os vértices V_i são os clientes a serem atendidos; os custos associados ao deslocamento do vértice i ao vértice j é representado pela matriz $C = [c_{ij}]$; o número de veículos do problema pode ser constante ou variável; a frota pode ser homogênea ou heterogênea; e cada veículo possui uma capacidade Q_k . O objetivo deste problema consiste em construir m rotas com custo mínimo, começando e terminando na garagem V_0 , em que cada cliente seja atendido apenas uma vez e atenda as restrições impostas.

O *PRV* é um dos problemas de pesquisa operacional mais estudados devido às suas mais diversas aplicações. Esses estudos proporcionaram o desenvolvimento de variantes deste modelo que atendem a novas situações reais, como: capacidade dos veículos, tipo de frota, quantidade de veículos, janela de tempo para atender os consumidores, serviços de coleta e/ou entrega, número de depósitos. A origem das diversas variantes do *PRV* ocorre em função das diversas regras e limitações encontradas em aplicações reais (PILLAC et al., 2013).

Os principais tipos de *PRV* são:

– Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo – *PRVJT*: neste tipo de problema, é necessário acrescentar uma restrição em que os clientes têm um horário para serem visitados. O veículo possui uma faixa de tempo para atender o cliente, se chegar antes do horário previsto, deve esperar, se chegar no horário previsto pode atender o cliente e se chegar atrasado já não pode mais atender o cliente (RUSSELL; CHIANG, 2006). A janela de tempo pode ser flexível em algumas situações, quando é permitido um atendimento adiantado ou atrasado com penalidade na função objetivo, ou com janelas de tempo rígidas, quando é obrigatório que os veículos visitem no horário previsto para cada nó (CALVETE; GALE; OLIVEIROS, 2007).

– Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea – *PRVFH*: os veículos neste tipo de modelo têm capacidades de cargas diferentes para serem respeitadas. Nesse caso, os custos associados ao transporte são diferentes, pois veículos maiores possuem maiores custos de transporte (BELFIORE; YOSHIZAKI, 2009).

– Problema de Roteamento de Veículos Capacitados – *PRVC*: neste tipo de problema, busca-se reduzir os custos para atender clientes, em que os veículos iniciam e finalizam o trajeto das rotas em um depósito. É dito capacitado porque a carga para atender os clientes de uma rota não pode extrapolar a capacidade do veículo (TARANTILIS et al., 2005).

– Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega – *PRVCE*: neste tipo de problema, o veículo deve atender a demanda de coleta e entrega em cada vértice. Existem circunstâncias em que os veículos precisam realizar as entregas para depois realizar as coletas, ocasiões em que a coleta e entrega ocorre de forma simultânea em cada nó, e, o mais comum é quando o veículo precisa coletar a

mercadoria de um local para levar para outro ponto na rota (MINGOZZI; GIORGI, 1999; MONTANÉ; GALVÃO, 2006).

– Problema de Roteamento de Veículos Dinâmico – *PRVD*: neste caso, admite-se que a rota inicialmente planejada seja modificada pela inserção de novos dados de entrada ao sistema, como inserção de novos clientes ou remoção de um cliente por algum imprevisto (GHIANI et al., 2003). Nesta situação, as rotas devem ser reorganizadas de forma que se ofereça o menor custo de atendimento para a nova circunstância (PUREZA; LARAZIN, 2010).

– Problema de Roteamento Periódico de Veículos – *PRPV*: este problema trata de selecionar as visitas de clientes e estabelecer as rotas dos veículos para cada dia do horizonte de planejamento (CORDEAU; GENDREAU; LAPORTE, 1997). Nesse sentido, os *PRPV* buscam selecionar uma combinação de dias para atender a cada nó, determinar um conjunto de clientes que serão atendidos por cada veículo em cada dia e, por fim, definir as rotas dos veículos para cada dia do horizonte de planejamento (FRANCIS; SMILOWITZ; TZUR, 2008).

Em algumas situações, pode ser combinado mais de um tipo de modelo para originar modelos mais abrangentes e mais condizentes com a realidade, como o modelo de Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega com Janelas de Tempo – *PRVCEJT*.

4.2.3.1 *Problema de roteamento de veículos com coleta, entrega, janelas de tempo – PRVCEJT*

Cordeau (2006) descreveu o *PRVCEJT* como: dado um número n de usuários, sejam eles de coletas ou entregas, como um grafo direcionado $G = (V, A)$, em que: V é o conjunto de vértices e A é o conjunto de arcos que ligam cada vértice. Os veículos devem partir de um depósito ou garagem de origem, vértice de origem $G^- = \{g_k^- = 0\}$, e finalizar a rota em um depósito ou garagem de destino $G^+ = \{g_k^+ = 2n + 1\}$. Em algumas situações, o depósito de origem e destino são os mesmos. O modelo separa de forma bem clara os locais de coleta e os locais de entrega, em que o conjunto de coleta é definido por $P = \{1, \dots, n\}$ e o conjunto de

entrega por $D = \{n+1, \dots, n\}$. Neste contexto, o conjunto de solicitações de transporte a serem atendidas é dado por $N = P \cup D \cup G^- \cup G^+$ e o problema pode ser redefinido pelo grafo direcionado $G = (N, A)$.

O conjunto dos veículos é definido por K , em que cada veículo possui uma capacidade de carga Q_k , e não pode exceder um tempo total de percurso dado por T_k . Para cada pedido $i \in N$ está associado um carregamento q_i e um tempo de serviço não negativo d_i de tal modo que $q_0 = q_{2n+1} = 0$, $q_i = -q_{n+1}$, para $i = 1, \dots, n$ e $d_0 = d_{2n+1} = 0$, ou seja, ao depósito está associado carregamento nulo, de forma que os veículos saiam do depósito de origem sem carga e retornam ao depósito de destino também sem carga. Não existe tempo de serviço para carregamento e descarregamento nos depósitos e os nós i e $(n+1)$ possuem carregamento simétrico, de modo que a carga positiva indica coleta e a carga negativa entrega.

Com relação ao tempo, cada nó $i \in N$ está associado a uma janela de tempo para atendimento $[e_i, l_i]$, em que e_i corresponde ao tempo inicial e l_i o tempo final para o atendimento do nó i . Nos depósitos, a janela de tempo $[e_0, l_0]$ representa os instantes de tempo inicial e final no qual admite-se que o veículo saia do depósito, enquanto a janela de tempo $[e_{2n+1}, l_{2n+1}]$ representa os instantes de tempo inicial e final em que se admite o retorno do veículo. A cada arco $(i, j) \in A$ está associado um custo de rota $c_{i,j}$ e um tempo de viagem $t_{i,j}$.

A definição da variável de decisão é feita utilizando três índices x_{ij}^k , de modo que para cada arco $(i, j) \in A$ existe um veículo $k \in K$, em que $x_{ij}^k = 1$ se e somente se o veículo k viaja do nó i para o nó j , e $x_{ij}^k = 0$ caso contrário. Para cada nó $i \in N$ e cada veículo $k \in K$, B_i^k é o instante de tempo em que o veículo k inicia o serviço no nó i e Q_i^k a capacidade de carga do veículo k após ter visitado o nó i . Para cada usuário j , seja L_i^k o tempo de viagem do usuário i no veículo k .

O modelo matemático será apresentado abaixo, conforme Cordeau (2006):

$$\text{Min } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} c_{i,j}^k x_{i,j}^k \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in K} x_{i,j}^k = 1 \quad \forall i \in P \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} x_{i,j}^k - \sum_{j \in N} x_{n+i,j}^k = 0 \quad \forall i \in P, k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N} x_{g_k^-, j}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{j \in N} x_{j,i}^k - \sum_{j \in N} x_{i,j}^k = 0 \quad \forall i \in P \cup D, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N} x_{i, g_k^+}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$B_j^k \geq (B_i^k + d_i + t_{i,j}) x_{i,j}^k \quad \forall i \in N, j \in N, k \in K \quad (10)$$

$$Q_j^k \geq (Q_i^k + q_j) x_{i,j}^k \quad \forall i \in N, j \in N, k \in K \quad (11)$$

$$L_i^k = B_{n+i}^k - (B_i^k + d_i) \quad \forall i \in P, k \in K \quad (12)$$

$$B_{2n+1}^k - B_0^k \leq T_k \quad \forall k \in K \quad (13)$$

$$e_i \leq B_i^k \leq l_i \quad \forall i \in N, k \in K \quad (14)$$

$$T_{i,n+i} \leq L_i^k \leq L \quad \forall i \in P, k \in K \quad (15)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq Q_i^k \leq \min\{Q_k, Q_k + q_i\} \quad \forall i \in N, k \in K \quad (16)$$

$$x_{i,j}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, j \in N, k \in K \quad (17)$$

A função objetivo minimiza os custos (4), as restrições (5) e (6) asseguram que cada nó seja atendido apenas uma vez e que o nó de coleta e entrega seja atendido pelo mesmo veículo. As restrições (7), (8) e (9) garantem que cada veículo k comece sua rota no depósito de origem e termine no depósito de destino. A restrição (10) determina que o tempo para o veículo k atender o nó j tem que ser maior ou igual ao instante de tempo em que o veículo inicia o serviço no nó i somado com o tempo de serviço d_i e com o tempo de deslocamento de i a j . A restrição (11) garante que a capacidade de carga do veículo Q_j^k no nó j tem que ser maior ou igual à capacidade de carga Q_i^k que o veículo tem ao visitar o nó i somada à carga do nó j . A restrição (12) define o tempo de viagem de cada veículo. A restrição (15) atua também como restrição de precedência, que garante que o nó i deve ser visitado antes do nó $n+i$ para o usuário i . Já a restrição (13) está relacionada à duração de cada rota, enquanto as restrições (14) e (16) referem-se às janelas de tempo para o atendimento dos clientes e as limitações de capacidade dos veículos, respectivamente. A restrição (17) garante que as variáveis do problema devem ser binárias.

Nota-se que esta formulação é não linear devido às restrições (10) e (11). Uma forma de linearizar essas restrições é apresentada como se segue: (CORDEAU, 2006):

$$B_j^k \geq B_i^k + d_i + t_{i,j} - M_{i,j}^k(1 - x_{i,j}^k) \quad \forall i \in N, j \in N, k \in K \quad (18)$$

$$Q_j^k \geq Q_i^k + q_j - W_{i,j}^k(1 - x_{i,j}^k) \quad \forall i \in N, j \in N, k \in K \quad (19)$$

A validade dessas restrições é assegurada pelas inequações $M_{i,j}^k \geq \max\{0, l_i + d_i + t_{i,j} - e_j\}$ e $W_{i,j}^k \leq \min\{Q_k, Q_k + q_i\}$.

4.2.3.2 Dimensões do problema

Os PRVCEJT apresentados na literatura, no geral, tratam até 100 clientes utilizando métodos exatos. Já utilizando meta-heurística, observou-se trabalhos que

atenderam 1.000 clientes, sendo que os que apresentaram melhor desempenho foram o algoritmo genético e o *Adaptive Large Neighborhood Search – ALNS* (Tabela 1).

Tabela 1: Trabalhos realizados para solucionar o PRVCEJT

Autor	Métodos adotados	n° máximo de clientes
ARNESSEN et al (2017)	Programação dinâmica <i>MIP-solver</i> comercial	30
BAE; MOON (2016)	Algoritmo genético	5
BELFIORE; YOSHIZAKI (2013)	Heurística e busca tabu	100
BENT; HENTENRYCK (2006)	Algoritmo memética	600
CHEN(2016)	Logica <i>fuzzy</i>	100
CHERKESLY et al (2016)	<i>Branch-price-and-cut</i>	75
CHERKESLY; DESAULNIERS; LAPORTE, (2015)	Algoritmo genético e busca local	300
DENG; MAO; ZHOU (2016)	<i>Simulated Annealing (SA)</i>	20
ERBAO; MINGYONG; KAI (2008)	Differential evolution theory and Algoritmo genético	8
FABRI; RECHT (2006)	Método heurístico	100
GHILAS; DEMIR; WOENSEL (2016a)	<i>Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS)</i>	100
GHILAS; DEMIR; WOENSEL (2016b)	<i>Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS)</i> com <i>Sample average approximation method (SAA)</i>	80
GUTIÉRREZ-JARPA et al (2010)	<i>Branch-and-price</i>	100
HOSNY; MUMFORD (2012)	Heurística	1.000
IASSINOVSKAIA; LIMBOURG; RIANE (2016)	Programação linear inteira mista (<i>branch-and-cut</i>)	7
KESKIN; ÇATAY (2016)	Programação linear inteira mista e heurística (<i>Adaptive Large Neighborhood Search – ALNS</i>)	100
LI; CHEN; PRINS (2016)	Programação linear inteira mista e heurística (<i>Adaptive Large Neighborhood Search – ALNS</i>)	100
LIN (2008)	Programação linear inteira e heurística	30
LIN (2011)	Programação inteira mista e heurística	200
LIU et al. (2013)	Programação inteira mista, Busca Tabu, Algoritmo genético	100
LU; YU (2012)	Algoritmo genético	100
MAHMOUDI; ZHOU (2016)	Programação dinâmica	24
MÄNNEL; BORTFELDT (2016)	Heurística	100
MCNABB; WEIR; HILL; HALL (2015)	Metaheurística (colônia de formigas)	10
MINGYONG; ERBAO (2010)	Programação inteira mista, metaheurística	8
NGUYEN; CRAINIC; TOULOUSE (2013)	Busca tabu	72
ÖZDEMIREL; GÖKGÜR; ELIYI (2016)	Programação inteira mista	20
POLAT; KALAYCI; KULAK; GÜNTHER (2015)	Programação inteira mista e heurística	199
VEENSTRA; CHERKESLY; DESAULNIERS; LAPORTE (2017)	Solução exata	40
WANG; CHEN (2012)	Programação inteira binária mista e algoritmo genético	100
WANG; CHEN (2013)	Programação inteira binária mista	100
WANG; MU; ZHAO; SUTHERLAND (2015)	Programação inteira mista e <i>simulated annealing (SA)</i>	100
YAN; CHU; HSIAO; HUANG (2015)	Heurística	30

4.2.3.3 Métodos exatos para solução do PRVCEJT

Para Parragh et al., (2008), para solucionar o PRVCEJT, os principais métodos exatos foram restrição do caminho mais curto e geração de colunas, os algoritmos *Branch and Cut*, *Branch and Cut and Price*, *Pricing*, *Branch and Bound*.

Em trabalhos realizados para solucionar o PRVCEJT por Desrosiers; Dumas (1988), Dumas et al. (1991), Gélinas et al. (1995) foi utilizado o algoritmo geração de colunas e restrição do caminho mais curto. Posteriormente, o algoritmo *Branch and Cut* foi utilizado nos trabalhos de Ruland; Rodin (1997), Cordeau et al. (2010), Ropke et al. (2007), Cherkesly et al. (2016). Lu; Dessouky (2004), para solucionar o PRVCEJT, utilizaram o algoritmo *Pricing*, *Branch and Bound*. No mesmo contexto, o *Branch and Cut and Price* foi utilizado por Ropke; Cordeau (2009), e *branch-and-price* por Gutiérrez-Jarpa et al. (2010).

4.2.3.3.1 Branch-and-bound na programação inteira binária

Pelo método *branch-and-bound* é possível realizar uma enumeração inteligente dos pontos aspirantes à solução ótima inteira de um problema. A palavra *branch* faz referência as partições que o algoritmo faz no espaço de soluções, o termo *bound* refere-se à prova da otimalidade da solução (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2016). As estratégias de desdobramentos da árvore de busca comumente empregadas são a busca em largura e profundidade.

4.2.3.3.2 Branch-and-cut na programação inteira binária

A metodologia *Branch-and-cut* utiliza uma combinação de três tipos de técnicas, sendo estas o pré-processamento automático de problemas, a geração de planos de corte e técnicas de ramificação e, por fim, avaliação progressiva mais inteligente.

Para o pré-processamento automático de problemas é realizada uma "inspeção computadorizada" da formulação do problema de PI fornecida pelo usuário buscando

indicar possibilidades que tornem mais rápida a resolução do problema sem eliminar nenhuma solução plausível.

O plano de corte é uma nova restrição funcional que visa reduzir a região de soluções possíveis para o relaxamento *PL* sem descartar nenhuma solução viável para o problema de *PI*.

4.3 SISTEMAS COMPUTACIONAIS APLICADOS AO PLANEJAMENTO FLORESTAL

As técnicas de pesquisa operacional mais utilizadas no planejamento florestal são: programação linear, programação linear inteira, programação dinâmica, programação múltiplos objetivos e simulação. Os principais sistemas computacionais utilizados na otimização e gestão dos recursos florestais são: *OpTimber-LP*, *REMSOFT*, *Trimble Forestry*, *Microforest*, *IMPLAN (Software for Economic Analysis)*, *RPF (Forest Regulation System)*, *OtimToras (Optimization of Multiproduct of Timber System)*, *IPTIM (Integrated Planning for Timberland Management)*, *SNAP (Scheduling and Network Analysis Program)*, *SisEucalipto*, *SisPinus*, *SIMO (Simulation and Optimization)*, *Sifplan-TreeSoftware*, *e-kersys* (plataforma de gerenciamento florestal), *SGF (Sistema de Gestão florestal)*, *SPRING*, *ArcGIS* e *QGIS*.

No que se refere ao transporte de máquinas florestais, não existe um programa específico de otimização. Algumas empresas adotam somente um sistema de controle de frota. Esses programas dispõem de informações de localização e disponibilidade mecânica dos veículos.

5 METODOLOGIA

5.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema consiste em transportar as máquinas florestais por meio de veículos tipo pranchas, que transportam uma máquina por vez, de um talhão com as operações finalizadas para outro talhão a ser trabalhado ou eventualmente para as oficinas de manutenção complexa e lavagem (Figura 1). Quando as máquinas encerram suas atividades em um talhão, elas estão prontas para serem transportadas para outro talhão. O agendamento é realizado no dia anterior, em que é repassado para o supervisor de transporte as seguintes informações: o tipo de máquina a ser transportado, o horário que ela está disponível para o transporte, o talhão de origem e o talhão de destino da máquina.

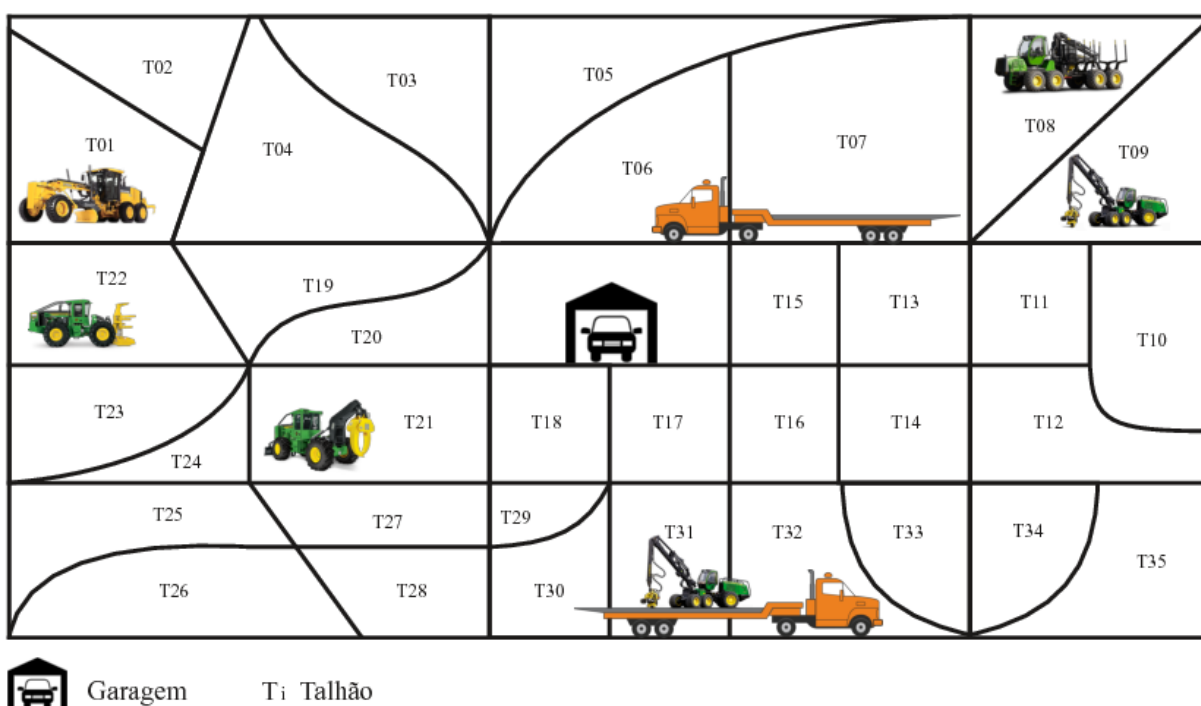


Figura 1: Esquema do problema de transporte das máquinas florestais.
Fonte: Adaptado de Barros Junior (2017).

5.2 FLUXOGRAMA METODOLÓGICO

Os passos metodológicos (Figura 2) para otimizar o transporte de máquinas florestais são: geração de banco de dados geográficos; definição do ponto mais próximo da estrada de cada talhão e da garagem; matriz de distâncias (*Network Analyst*); outras variáveis de entrada; criação de um banco de dados em *Structured Query Language – SQL*; formulação do modelo matemático; descrição dos cenários; e, espacialização dos resultados de cada cenário.

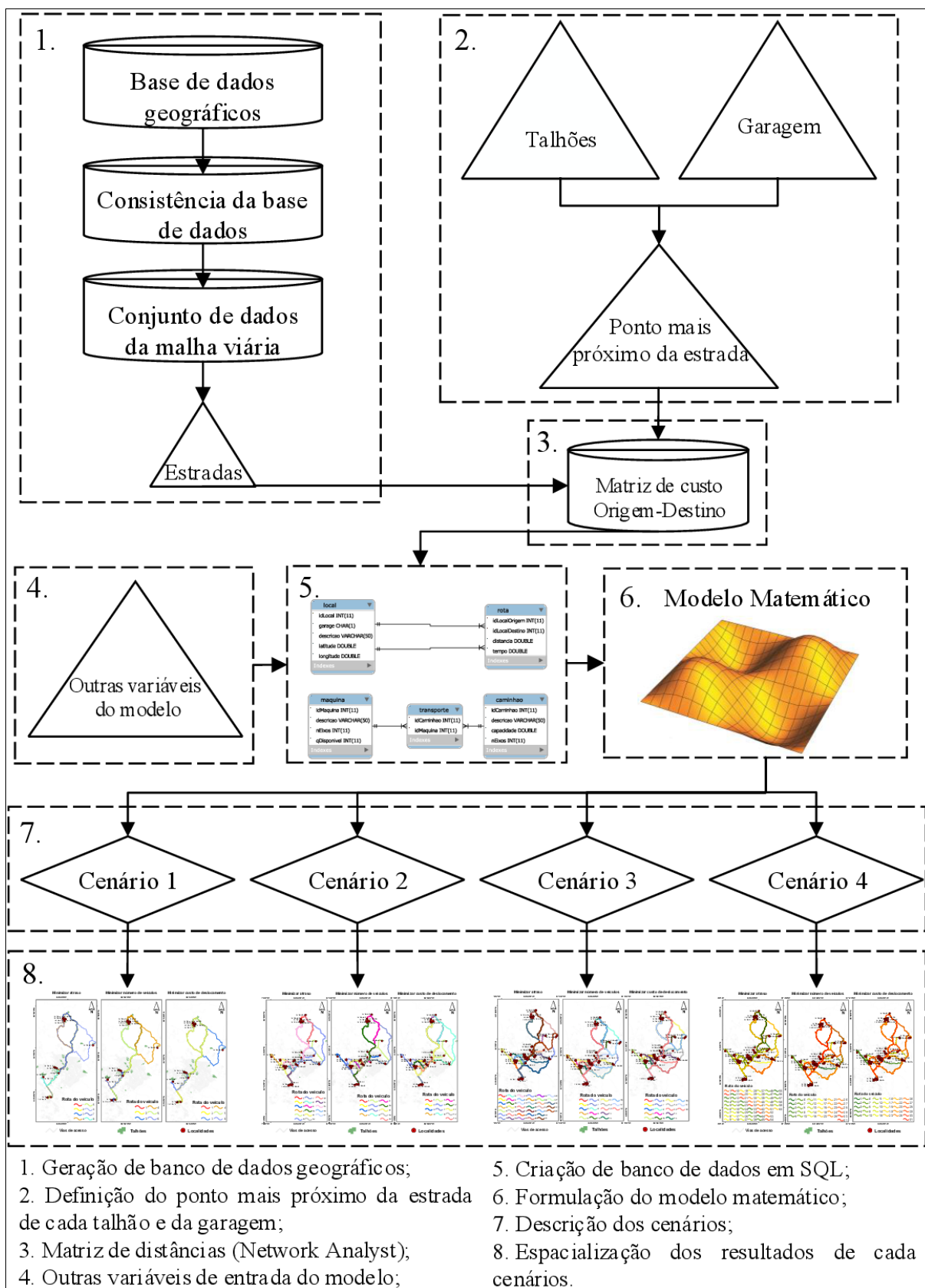


Figura 2: Passos metodológicos para a otimização do transporte de máquinas florestais.

Passo 1: Geração de banco de dados geográficos

A base de dados foi obtida de uma empresa do setor de celulose e papel localizada no estado do Paraná, Brasil (Figura 3). A base é composta por um arquivo vetorial linear, contendo informações das estradas da região da empresa e um arquivo poligonal contendo as garagens dos veículos de transporte e os 1.500 talhões onde as máquinas operam, com suas respectivas coordenadas geográficas.

As estradas da empresa são classificadas em pavimentação asfáltica, revestimento primário (cascalhada) e sem revestimento (terra). Considerando que o tipo de pavimentação influencia na velocidade dos veículos e nos custos de combustível e manutenção, foi estabelecido um sistema de pesos de forma que as estradas com melhor pavimentação fossem usadas. O sistema de pesos foi calculado com base na velocidade média em cada tipo de estrada obtida do trabalho de Lopes; Machado; Souza (2002), conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Velocidade dos veículos que realizam o transporte nos principais tipos estradas florestais

Classificação	Largura/Superfície da Pista de Rolamento	Velocidade (km/hora)
Excelente	Pista dupla pavimentação asfáltica	80.0
Boa	Pista dupla pavimentação asfáltica	67.0
Média	Pista dupla pavimentação asfáltica	62.3
Ruim	Pista dupla pavimentação asfáltica	58.4
Média	Pista dupla pavimentação asfáltica	66.90
Excelente	Pista dupla revestimento primário	41.0
Boa	Pista dupla revestimento primário	38.6
Média	Pista dupla revestimento primário	37.0
Ruim	Pista dupla revestimento primário	35.6
Média	Pista simples revestimento primário	38.05
Excelente	Pista dupla sem revestimento	30.8
Boa	Pista dupla sem revestimento	30.3
Média	Pista dupla sem revestimento	28.7
Ruim	Pista dupla sem revestimento	27.4
Média	Pista simples sem revestimento	29.30

Fonte: Adaptado de Lopes; Machado; Souza (2002).

Para o cálculo da penalização do tipo de pavimento na distância de cada rota, adotou-se a equação (20), que normaliza o valor máximo em 0 e o mínimo em 1:

$$Z_i^{(k)} = \frac{Z_{\max}^k - Z_i^k}{Z_{\max}^k - Z_{\min}^k} \quad (20)$$

em que: Z_i^k é o valor normalizado em km/h, $Z_{\max}^k$ é o valor máximo de velocidade em km/h, $Z_{\min}^k$ é o valor mínimo de velocidade em km/h e Z_i^k o valor da velocidade que será normalizado em km/h.

Para o problema em questão, foi utilizada a velocidade máxima de 80 km.h⁻¹, o máximo que a legislação de transito brasileira permite para veículos de carga em rodovias. Por esta lógica de penalização do custo, ela é máxima para a estrada de terra e para a estrada com revestimento asfáltico é mínima, o que favorece o uso da estrada com revestimento asfáltico na minimização do custo de transporte das máquinas (Tabela 3). Com relação ao tempo, foi obtido utilizando a fórmula de velocidade (21), ou seja, foi dividida uma unidade de *km* pela velocidade média da rodovia analisada. Após calcular o tempo, foi utilizado um coeficiente de segurança de 10%, como forma de deixar uma folga para compensar possíveis atrasos causados por imprevistos.

$$\Delta t(h) = \frac{\Delta S(km)}{V_m(km.h^{-1})} \quad (21)$$

em que: ΔS é a distância, V_m é a velocidade média em cada tipo de estrada e Δt é o intervalo de tempo necessário para o veículo deslocar de um ponto a outro.

Tabela 3: Tabela com os pesos a serem utilizados nas matrizes de custos e tempo

Código	Tipo de pavimentação	Velocidade média (km/h)	Peso relacionado com a qualidade da estrada	Tempo (h)
0	Revestimento asfáltico	66.90	0.2584	0.0149
1	Revestimento primário	38.05	0.8274	0.0271
2	Sem revestimento	29.30	1.0000	0.0366

Uma base de dados composta pelos arquivos lineares das estradas com os arquivos poligonais dos talhões e da garagem foi criada e utilizada para encontrar as distâncias entre os locais atendidos pelos veículos que realizaram o transporte posteriormente.

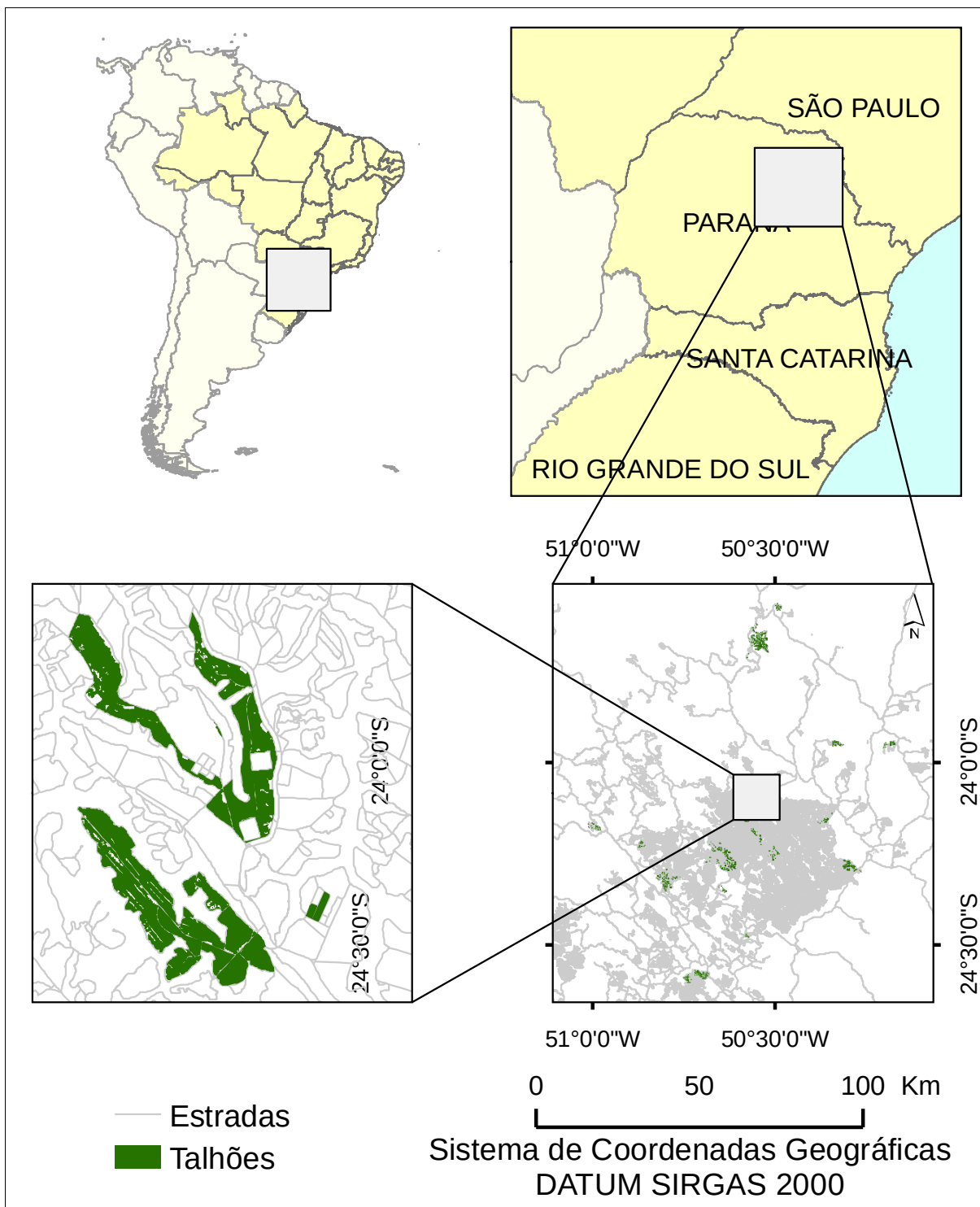


Figura 3: Localização da empresa em que foram obtidos os dados para validação do modelo.

Passo 2: Definição do ponto mais próximo da estrada de cada talhão e da garagem

A empresa possui a informação do talhão que a máquina coletada se encontra, mas não tem o local exato para realizar a coleta da máquina. Assim sendo, utilizou-se o algoritmo do vizinho mais próximo (algoritmo *Near Analysis* do software *Arcgis* 10.2) para encontrar o ponto da estrada que é mais próximo do talhão para servir de local de embarque. Esse algoritmo determina o ponto mais próximo de uma feição em relação a um ponto consultado. Posteriormente, foi criada uma feição espacial com tipologia de pontos que representa esse vizinho mais próximo e, consequentemente, o local que a máquina deve ficar para ser coletada (MARCATTI, 2013; SEDGEWICK, 1998).

Passo 3: Matriz de distâncias (*Network Analyst*)

A ferramenta *Network Analyst* do software *Arcgis* 10.2 foi utilizada para obtenção da rota de menor distância ponderada pela qualidade da estrada, que é o produto da distância pelo peso referente à qualidade da estrada, entre os talhões e destes em relação à garagem. Foram realizadas todas as combinações de distâncias possíveis, sendo que a rota com menor distância ponderada pela qualidade da estrada foi utilizada para compor a matriz de distâncias a ser utilizada na modelagem do problema (Tabela 4).

Tabela 4: Exemplo de uma matriz de distâncias entre talhões e garagem

	G_o	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	G_d
G_o	999	23070	22961	17631	17605	18658	46233	7806	5974	6850	42545	0
T_1	23070	999	839	6126	6101	21790	68428	29893	28061	28937	64740	23070
T_2	22961	839	999	6017	5992	21681	68319	29784	27952	28828	64631	22961
T_3	17631	6126	6017	999	390	16351	62988	24453	22621	23498	59300	17631
T_4	17605	6101	5992	390	999	16325	62963	24428	22596	23472	59274	17605
T_5	18658	21790	21681	16351	16325	999	64016	25481	23648	24525	60327	18658
T_6	46233	68428	68319	62988	62963	64016	999	50102	48270	49146	4201	46233
T_7	7806	29893	29784	24453	24428	25481	50102	999	3140	2097	46413	7806
T_8	5974	28061	27952	22621	22596	23648	48270	3140	999	1932	44581	5974
T_9	6850	28937	28828	23498	23472	24525	49146	2097	1932	999	45458	6850
T_{10}	42545	64740	64631	59300	59274	60327	4201	46413	44581	45458	999	42545

G_d 0 23070 22961 17631 17605 18658 46233 7806 5974 6850 42545 999
 Em que: G_o é a garagem de origem, G_d é a garagem de destinos e os T_{ts} são os talhões.

Passo 4: Outras variáveis de entrada

A base de dados também possui informações sobre os tipos de máquinas, com suas dimensões e pesos, tipos de veículos de transporte (caminhões e articulados prancha) com suas capacidades de carga (dimensão e peso). A empresa utiliza 15 veículos de quatro capacidades de carga e dimensões diferentes (Tabela 5). Essa característica de frota heterogênea aumenta a complexidade de modelagem do problema, mas por outro lado facilita a solução por reduzir o número de combinações possíveis.

Tabela 5: Tipo e quantidade de veículos que realizam o transporte das máquinas

Tipo de Veículo com pranchas	Quantidade
Caminhão plataforma	2
Articulado 2 eixos	2
Articulado 3 eixos	9
Articulado 4 eixos	2
Total	15

Com relação às máquinas, estas são compostas por 236 unidades, com dimensões e pesos diferentes (Tabela 6). Em média, a empresa transporta 20 máquinas por dia, sendo que em dias de alta demanda chega a transportar 35 máquinas.

Tabela 6: Tipos de máquinas e a característica do veículo para realizar o transporte

Máquina	Tipos de veículos prancha de transporte	Quantidade
TRATOR PNEU MF7180/4 12V	Caminhão plataforma	02
CARREGADEIRA JOHN DEERE 524K	Caminhão plataforma	01
CATERPILLAR ESCHIDCATERPILLAR	Caminhão plataforma	01
ESCAVADEIRA CATERPILLAR 312	Caminhão plataforma	01
HARVESTER ERGO 8W PONSSE	Caminhão plataforma	06
MOTONIVELADORA CASE 865B	Caminhão plataforma	02
MOTONIVELADORA CASE 885	Caminhão plataforma	01
MOTONIVELADORA CATERPILLAR 120H	Caminhão plataforma	02
MOTONIVELADORA CATERPILLAR 120K	Caminhão plataforma	04
MOTONIVELADORA SANY SHG190C	Caminhão plataforma	01
PROCESSADOR TIGERCAT H855C	Caminhão plataforma	01
ROLO COMPACTADOR HAM	Caminhão plataforma	02
SHOVEL LOGGER JOHN DEERE 909J	Caminhão plataforma	01
SKIDDER TIGERCAT 625C	Caminhão plataforma	01

SKIDDER TIGERCAT 635C	Caminhão plataforma	03
TRATOR AGRICOLA VALTRA 4R BT210 4X4	Caminhão plataforma	17
TRATOR ESTEIRA KOMATSU D51	Caminhão plataforma	01
TRATOR ESTEIRA CATERPILLAR CAT320D	Caminhão plataforma	02
TRATOR ESTEIRA CATERPILLAR CAT541	Caminhão plataforma	01
TRATOR ESTEIRA CATERPILLAR D6N	Caminhão plataforma	02
TRATOR ESTEIRA CATERPILLAR D6N XL	Caminhão plataforma	03
TRATOR ESTEIRA DOOSAN	Caminhão plataforma	02
TRATOR ESTEIRA DOOSAN DX225LCA	Caminhão plataforma	20
ESCAVADEIRA CASE CX220B	Articulado 2 eixos	03
ESCAVADEIRA CATERPILLAR 320D	Articulado 2 eixos	01
ESCAVADEIRA HIDRAULICA DOOSAN	Articulado 2 eixos	04
ESCAVADEIRA HYUNDAI 210 LC	Articulado 2 eixos	02
ESCAVADEIRA KOMATSU PC200	Articulado 2 eixos	01
ESCAVADEIRA SANY 210	Articulado 2 eixos	01
FORWARDER ELEPHANT KING 8W PONSSE	Articulado 2 eixos	09
TEF207 TRATOR KOMATSU D61EX	Articulado 2 eixos	01
TEF208 TRATOR KOMATSU D61EX	Articulado 2 eixos	01
TEF211 TRATOR KOMATSU D61EX	Articulado 2 eixos	01
TEF212 TRATOR KOMATSU D61EX	Articulado 2 eixos	01
TRATOR AGRICOLA VALTRA 4R BM100 4X4	Articulado 2 eixos	04
TRATOR ESTEIRA JOHN DEERE 700J	Articulado 2 eixos	05
TRATOR ESTEIRA KOMATSU D61	Articulado 2 eixos	02
TRATOR ESTEIRA TAURON 700J	Articulado 2 eixos	01
TRATOR KOMATSU ESCADEIRA PC200-8	Articulado 2 eixos	02
TRATOR PNEU MF4291/4 12V	Articulado 2 eixos	19
TRATOR SKIDDER TIGERCAT 635D	Articulado 2 eixos	13
TRATOR VALTRA 4R BT210 4X4	Articulado 2 eixos	02
VOLVO A30E	Articulado 2 eixos	04
VOLVO EC240BLC	Articulado 2 eixos	02
CATERPILLAR 320C	Articulado 3 eixos	01
ESCAVADEIRA SANY EC 215	Articulado 3 eixos	01
FELLER BUNCHER JOHN DEERE 903K	Articulado 3 eixos	01
HARVESTER BEAR 8W	Articulado 3 eixos	04
PROCESSADOR JOHN DEERE 903J	Articulado 3 eixos	06
PROCESSADOR JOHN DEERE 903K	Articulado 3 eixos	01
PROCESSADOR JOHN DEERE 903KH	Articulado 3 eixos	13
SKIDDER JOHN DEERE 648 GIII	Articulado 3 eixos	02
SKIDDER TIGERCAT 635D	Articulado 3 eixos	01
SKIDDER TIMBERJACK 460	Articulado 3 eixos	01
TEF205 TRATOR KOMATSU D85EX	Articulado 3 eixos	01
TEF206 TRATOR KOMATSU D85EX	Articulado 3 eixos	01
TEF209 TRATOR KOMATSU D61EX	Articulado 3 eixos	01
TEF210 TRATOR KOMATSU D61EX	Articulado 3 eixos	01
ESCAVADEIRA HIDRAULICA SOBRE RODAS	Articulado 4 eixos	02
M325D		
FELLER BUNCHER JOHN DEERE 959K	Articulado 4 eixos	02
FELLER BUNCHER TIGERCAT L870C	Articulado 4 eixos	11
PICADOR CBI 6400T	Articulado 4 eixos	03
PROCESSADOR CATERPILLAR 541	Articulado 4 eixos	01
PROCESSADOR DOOSAN DX300LL	Articulado 4 eixos	06
RETRO ESCAVADEIRA CASE 580M	Articulado 4 eixos	01
RETRO ESCAVADEIRA CASE 580N	Articulado 4 eixos	01
RETRO ESCAVADEIRA CATERPILLAR 416E	Articulado 4 eixos	05
ROLO COMPACTADOR DYNAPAC CA250	Articulado 4 eixos	03
ROLO COMPACTADOR VOLVO SD105	Articulado 4 eixos	01
SHOVEL LOGGER JOHN DEERE 909KH	Articulado 4 eixos	02
SHOVEL LOGGER JOHN DEERE 909M	Articulado 4 eixos	03
SHOVEL TIGERCAT LS855C	Articulado 4 eixos	02
SKIDDER CATERPILLAR CAT545C	Articulado 4 eixos	01

SKIDDER JOHN DEERE 748HX	Articulado 4 eixos	01
Total		236

No que tange ao horário em que cada máquina deve ser transportada, foram utilizadas informações do intervalo de horário em que a máquina está pronta para ser transportada. O tempo de deslocamento de um ponto para outro foi obtido dividindo a distância pela velocidade média dos veículos em cada tipo de estrada. Também foram utilizados o tempo gasto para o carregamento e descarregamento das máquinas.

Passo 5: Criação de um banco de dados em SQL

Com base nas informações geográficas e na planilha eletrônica disponibilizada pela empresa, foi criado um banco de dados (Figura 4) composto pela localização de cada talhão e garagem, com a rota de menor distância ponderada pela qualidade da estrada entre estes locais, assim como: o tipo de máquina, a quantidade e as características necessárias para os veículos prancha realizarem o seu transporte (número de eixos); os tipos de veículos prancha que realizam o transporte; a quantidade e capacidade de cargas; e o número de eixos. As informações contidas neste banco de dados foram utilizadas como entrada no modelo matemático.

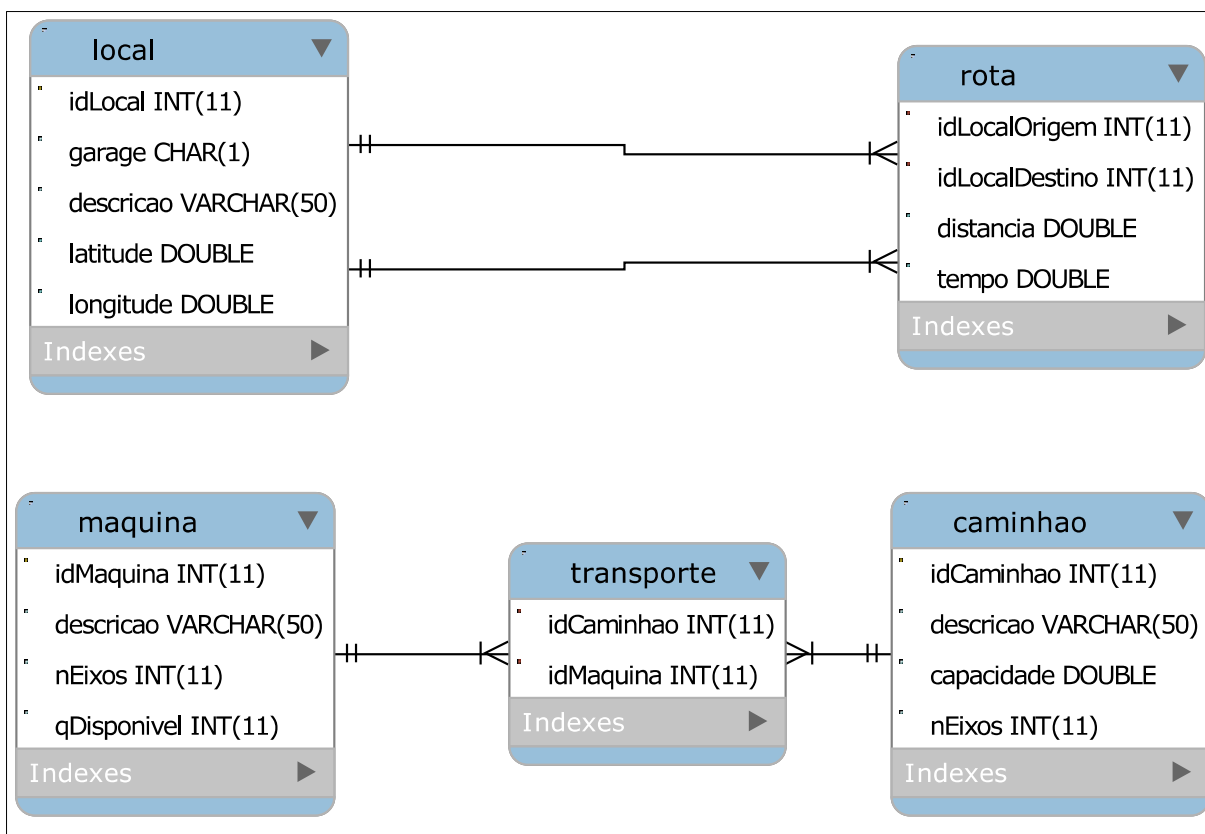


Figura 4: Esquema do banco de dados utilizado como entrada no modelo matemático do problema de transporte das máquinas florestais.

Passo 6: Formulação do modelo matemático

Foi elaborado um modelo matemático de programação linear inteira mista baseado no problema de roteamento de veículos com coleta e entrega, janelas de tempo e frota heterogênea

Passo 6.1: Modelagem matemática do problema

O problema de otimização do transporte de máquinas florestais consiste em obter rotas de menor custo ou distância para coletar máquinas de um local i e transportar para outro local j , em horários de coleta específicos. Este problema possui características semelhantes com a classe de problemas de roteamento de veículos com coleta e/ou entrega e janela de tempo. Desse modo, o problema de otimização do transporte de máquinas florestais está descrito pelo modelo matemático proposto.

No modelo, a função objetivo (22) é composta por três termos. O primeiro termo tem como função minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada total da rota. O segundo termo tem a função de minimizar o atraso no horário de atendimento dos talhões e das garagens. Já o terceiro termo tem a incumbência de minimizar o número de veículos necessários para realizar o transporte das máquinas. As restrições (23) e (24) garantem que os veículos saiam de uma garagem de origem e retornem à garagem de destino no final da rota. A restrição (25) tem a função de assegurar que cada solicitação de transporte seja atendida somente uma vez e por um único veículo. A restrição (26) garante que os nós de coleta e entrega sejam atendidos pelo mesmo veículo. As restrições (27) e (28) são responsáveis pela contenção de fluxo, ou seja, o número de máquinas que entra nos veículos de transporte é igual ao número que sai destes veículos.

A restrição (29) garante que se o veículo k utiliza o arco (i, j) , de modo que $X_{i,j}^k = 1$, então, o instante de tempo em que o veículo k inicia o serviço no nó j de entrega deve ser maior que o instante de tempo em que o mesmo veículo iniciou o serviço no nó de coleta i , acrescido do período de tempo para realização desse serviço d_i e do período de tempo de viagem t_{ij} entre o nó i ao nó j . Já a restrição (30) determina o limite inferior da janela de tempo. Já a restrição (31) determina o limite superior da janela de tempo e possibilita um possível atraso a depender da configuração da restrição (32). Já a restrição (32) é igual a zero se não for permitido atrasos nos atendimentos ou menor/igual infinito quando um dos objetivos for minimizar possíveis atrasos no transporte das máquinas.

A restrição (33), da mesma forma, garante que a carga após o veículo k deixar o nó j deve ser maior ou igual a carga com a qual deixou o nó i , acrescida da carga do nó j . Com relação à capacidade de carga, esta é limitada pelas restrições (34) e (35).

As restrições (36), (37), (38) e (39) são restrições de frota heterogênea e são utilizadas para que os veículos que realizam o atendimento em um determinado talhão sejam compatíveis com as dimensões e peso das máquinas. Nesse caso, são utilizados quatro tipos de veículos: plataforma, dois eixos, três eixos e quatro eixos. Os talhões são agrupados conforme o tipo de veículo necessário para realizar o atendimento.

A restrição (40) garante que as variáveis: A_i , B_i , $M_{i,j}$, Q_i e $W_{i,j}$ sejam não negativas. Já a restrição (41) é responsável para assegurar que as variáveis $X_{i,j}$'s sejam binárias.

Minimizar:

$$\omega_1 \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \sum_{k \in K} c_{i,j}^k x_{i,j}^k + \omega_2 \sum_{i \in N} A_i + \omega_3 \sum_{j \in P} \sum_{k \in K} x_{g_k^-, j}^k \quad (22)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in \left\{ P \cup \left\{ g_k^+ \right\} \right\}} x_{g_k^-, j}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (23)$$

$$\sum_{i \in \left\{ P \cup \left\{ g_k^- \right\} \right\}} x_{i, \left\{ g_k^+ \right\}}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{\substack{j \in \left\{ P \cup D \right\} \\ j \neq i}} \sum_{k \in K} x_{i,j}^k = 1 \quad \forall i \in P \quad (25)$$

$$\sum_{\substack{j \in \left\{ P \cup D \right\} \\ j \neq i}} x_{i,j}^k - \sum_{\substack{j \in \left\{ P \cup D \cup \left\{ g_k^+ \right\} \right\} \\ j \neq i; j \neq n+i}} x_{n+i,j}^k = 0 \quad \forall i \in P, k \in K \quad (26)$$

$$\sum_{\substack{j \in \left\{ P \cup D \cup \left\{ g_k^- \right\} \right\} \\ j \neq i; j \neq n+i}} x_{j,i}^k - \sum_{\substack{j \in \left\{ P \cup D \right\} \\ j \neq i}} x_{i,j}^k = 0 \quad \forall i \in P, k \in K \quad (27)$$

$$\sum_{\substack{j \in \left\{ P \cup D \right\} \\ j \neq i}} x_{j,i}^k - \sum_{\substack{j \in \left\{ P \cup D \cup \left\{ g_k^+ \right\} \right\} \\ j \neq i; j \neq n-i}} x_{i,j}^k = 0 \quad \forall i \in D, k \in K \quad (28)$$

$$B_j \geq B_i + d_i + t_{i,j} - M_{i,j}(1 - x_{i,j}^k) \quad \forall i, j \in N, i \neq j, k \in K \quad (29)$$

$$B_i \geq e_i \quad \forall i \in N \quad (30)$$

$$B_i \leq l_i + A_i \quad \forall i \in N \quad (31)$$

$$A_i \begin{cases} = 0 & \text{se não for permitido atraso no atendimento} \\ \leq \infty & \text{se for permitido atraso no atendimento} \end{cases} \quad \forall i \in N \quad (32)$$

$$Q_j \geq Q_i + q_j - W_{i,j}(1 - x_{i,j}^k) \quad \forall i, j \in N, i \neq j, k \in K \quad (33)$$

$$Q_i = 0 \quad \forall i \in G^- \cup D \cup G^+ \quad (34)$$

$$Q_i = 1 \quad \forall i \in P \quad (35)$$

$$\sum_{k \in K_1} x_{i,n+i}^k = 1 \quad \forall i \in P_1 \quad (36)$$

$$\sum_{i \in K_2} x_{i,n+i}^k = 1 \quad \forall i \in P_2 \quad (37)$$

$$\sum_{i \in K_3} x_{i,n+i}^k = 1 \quad \forall i \in P_3 \quad (38)$$

$$\sum_{i \in K_4} x_{i,n+i}^k = 1 \quad \forall i \in P_4 \quad (39)$$

$$A_i; B_i; M_{i,j}; Q_i; W_{i,j} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (40)$$

$$x_{i,j}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad k \in K \quad (41)$$

Foi desenvolvido um exemplo, na forma algébrica para a melhor compreensão das equações e inequações e funcionamento desse modelo (anexo 1). No anexo 2, pode-se visualizar uma rotina desenvolvida em *Python 2.7.14* para gerar o modelo algébrico conforme o padrão do *software CPLEX Optimization Studio versão 12.2*.

Passo 6.2: Métodos de solução adotados

O modelo foi resolvido pelo método exato utilizando o algoritmo *Branch and Bound* devido à eficácia deste método e por ser um dos mais empregados pelas empresas do setor florestal. O modelo foi implementado no *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio versão 12.2* e solucionado pelo *solver* do mesmo *software* (anexo 3).

O computador utilizado possui as seguintes configurações: processador Intel® Core (TM) i7-4790 CPU @ 3,60 GHz, 32 GB de memória RAM, 500 GB de HD, com sistema operacional Windows 10.

Passo 7: Descrição dos cenários

Para avaliação do modelo proposto, foram utilizados dados de dias distintos com baixa (10 máquinas), média (20 máquinas), alta (40 máquinas) demanda de transporte e uma situação de demanda extrema (60 máquinas), que não ocorre na empresa, para verificar a robustez do modelo proposto. Os veículos prancha saíam da garagem as 06:00 h e retornavam as 18:00 h, sendo esse horário sempre respeitado devido a restrições do código de trânsito brasileiro para veículos de grande porte. Foi considerada uma janela de tempo de uma hora para o atendimento dos talhões de coleta. Já para os talhões de entrega, foram utilizadas janelas de tempo com base no horário permitido de trabalho (06:00 às 18:00 horas), já que esses talhões não possuíam um horário específico para o recebimento das máquinas, desde que fosse o menor tempo possível.

A estratégia de solução adotada foi inicialmente realizar a minimização do atraso, adotando um veículo prancha para cada máquina a ser transportada. Isso foi utilizado para flexibilizar o modelo, pois, dependendo da distância, poderia ser necessário mais de um dia para o transporte. Essa estratégia também flexibilizou o horário quando o atendimento de um talhão não foi viável devido ao horário de chegada do veículo prancha ser maior que a janela de tempo que a máquina estava disponível para o transporte. Isso ocorreu quando o horário de saída da garagem (06:00 horas) somado com o tempo de deslocamento foi maior que o horário da janela de tempo de atendimento. Nessas circunstâncias, devido à impossibilidade de atendimento, os horários foram corrigidos adicionando o atraso à janela de tempo inviável.

Após corrigir as janelas de tempo, quando necessário, a próxima etapa foi minimizar o número de veículos que realizaram o atendimento, já que inicialmente foi atribuído um veículo para o transporte de cada máquina. Após encontrar o número mínimo de veículos prancha para realizar o transporte, foi minimizada a distância ponderada pela qualidade da estrada.

Passo 7.1: Cenário de baixa demanda – transporte de 10 máquinas por dia

Foi analisada uma situação de baixa demanda da empresa (Tabela 7), em que foi realizado o transporte de 10 máquinas por 3 tipos de veículos pranchas.

Tabela 7: Transporte de 10 máquinas e os horários de atendimento dos talhões

Máquina	Tipo de veículo prancha	Coleta	H_i	H_f	Entrega	H_i	H_f
-	-	Garagem	06:00	18:00	-	-	-
HARVESTER ERGO 8W PONSSE	2 eixos	Talhão-135	13:00	14:00	Talhão-478	06:00	18:00
HARVESTER BEAR 8W	3 eixos	Talhão-10	08:00	09:00	Talhão-395	06:00	18:00
HARVESTER BEAR 8W	3 eixos	Talhão-16	08:40	09:40	Talhão-396	06:00	18:00
PROCESSADOR TIGERCAT H855C	3 eixos	Talhão-75	08:00	09:00	Talhão-398	06:00	18:00
PROCESSADOR JOHN DEERE 903KH	3 eixos	Talhão-254	13:00	14:00	Talhão-490	06:00	18:00
SKIDDER TIGERCAT 625C	3 eixos	Talhão-382	12:30	13:30	Talhão-491	06:00	18:00

SKIDDER TIGERCAT 635C	3 eixos	Talhão-383	12:00	13:00	Talhão-570	06:00	18:00
FELLER BUNCHER TIGERCAT L870C	4 eixos	Talhão-82	08:00	09:00	Talhão-415	06:00	18:00
PROCESSADOR DOOSAN DX300LL	4 eixos	Talhão-133	08:00	09:00	Talhão-418	06:00	18:00
PICADOR CBI 6400T	4 eixos	Talhão-384	12:00	13:00	Talhão-639	06:00	18:00
-	-	-	-	-	Garagem	06:00	18:00

Em que: H_i é o horário inicial de atendimento e H_f é o horário final de atendimento.

Passo 7.2: Cenário de média demanda – transporte de 20 máquinas por dia

Foi analisada uma situação de média demanda da empresa (Tabela 8), em que foi realizado o transporte de 20 máquinas por 4 tipos de veículos pranchas.

Tabela 8: Transporte de 20 máquinas e horários de atendimento dos talhões

Máquina	Tipo de veículo prancha	Coleta	H_i	H_f	Entrega	H_i	H_f
-	-	Garagem	06:00	18:00	-	-	-
TRATOR VALTRA 4R BT210 4X4	Plataforma	Talhão-397	10:00	11:00	Talhão-67	06:00	18:00
TRATOR AGRICOLA VALTRA 4R BT210 4X4	Plataforma	Talhão-86	15:00	16:00	Talhão-12	06:00	18:00
TRATOR ESTEIRA DOOSAN DX225LCA	2 eixos	Talhão-208	15:00	16:00	Talhão-148	06:00	18:00
VOLVO A30E	2 eixos	Talhão-185	06:00	07:00	Talhão-469	06:00	18:00
PROCESSADOR JOHN DEERE 903KH	3 eixos	Talhão-100	11:00	12:00	Talhão-408	06:00	18:00
PROCESSADOR JOHN DEERE 903KH	3 eixos	Talhão-207	10:00	11:00	Talhão-569	06:00	18:00
PROCESSADOR JOHN DEERE 903KH	3 eixos	Talhão-28	06:00	07:00	Talhão-301	06:00	18:00
SKIDDER TIGERCAT 625C	3 eixos	Talhão-255	07:00	08:00	Talhão-133	06:00	18:00
SKIDDER TIGERCAT 635C	3 eixos	Talhão-313	08:00	09:00	Talhão-409	06:00	18:00
SKIDDER TIGERCAT 635C	3 eixos	Talhão-273	06:00	07:00	Talhão-233	06:00	18:00
SKIDDER TIGERCAT 635C	3 eixos	Talhão-52	06:00	07:00	Talhão-320	06:00	18:00
SKIDDER TIMBERJACK 460	3 eixos	Talhão-363	07:00	08:00	Talhão-538	06:00	18:00

SKIDDER JOHN DEERE 648 GIII	3 eixos	Talhão-280	09:00	10:00	Talhão-173	06:00	18:00
SKIDDER TIGERCAT 635D	3 eixos	Talhão-372	12:00	13:00	Talhão-99	06:00	18:00
SKIDDER JOHN DEERE 748HX	3 eixos	Talhão-356	07:00	08:00	Talhão-632	06:00	18:00
SKIDDER CATERPILLAR CAT545C	3 eixos	Talhão-576	06:00	07:00	Talhão-89	06:00	18:00
TRATOR SKIDDER TIGERCAT 635D	3 eixos	Talhão-463	06:00	07:00	Talhão-483	06:00	18:00
TRATOR SKIDDER TIGERCAT 635D	3 eixos	Talhão-180	06:00	07:00	Talhão-245	06:00	18:00
FELLER BUNCHER TIGERCAT L870C	4 eixos	Talhão-523	06:00	07:00	Talhão-514	06:00	18:00
PICADOR CBI 6400T	4 eixos	Talhão-186	06:00	07:00	Talhão-620	06:00	18:00
-	-	-	-	-	Garagem	06:00	18:00

Em que: H_i é o horário inicial de atendimento e H_f é o horário final de atendimento.

Passo 7.3: Cenário de alta demanda – transporte de 40 máquinas por dia

Foi analisada uma situação de alta demanda da empresa (Tabela 9), em que foi realizado o transporte de 40 máquinas por 4 tipos veículos pranchas.

Tabela 9: Transporte de 40 máquinas e horários de atendimento dos talhões

Máquina	Tipo de veículo prancha	Coleta	H_i	H_f	Entrega	H_i	H_f
-	-	Garagem	06:00	18:00	-	-	-
CARREGADEIRA JOHN DEERE 524K	Plataforma	Talhão-397	08:00	09:00	Talhão-599	06:00	18:00
CATERPILLAR ESCHIDCATERPILLAR	Plataforma	Talhão-86	10:00	11:00	Talhão-93	06:00	18:00
TRATOR ESTEIRA TAURON 700J	Plataforma	Talhão-208	06:00	07:00	Talhão-522	06:00	18:00
TRATOR AGRICOLA VALTRA 4R BT210 4X4	Plataforma	Talhão-185	09:00	10:00	Talhão-123	06:00	18:00
ESCAVADEIRA CATERPILLAR 312	Plataforma	Talhão-100	13:00	14:00	Talhão-540	06:00	18:00
MOTONIVELADORA CATERPILLAR 120H	Plataforma	Talhão-207	10:00	11:00	Talhão-504	06:00	18:00
FORWARDER ELEPHANT KING 8W PONSSE	2 eixos	Talhão-28	15:00	16:00	Talhão-25	06:00	18:00
HARVESTER ERGO 8W PONSSE	2 eixos	Talhão-255	07:00	08:00	Talhão-68	06:00	18:00
SKIDDER JOHN DEERE 648 GIII	2 eixos	Talhão-313	06:00	07:00	Talhão-130	06:00	18:00
VOLVO EC240BLC	2 eixos	Talhão-273	08:00	09:00	Talhão-401	06:00	18:00
TRATOR KOMATSU ESCADEIRA PC200-8	2 eixos	Talhão-52	09:00	10:00	Talhão-174	06:00	18:00

TRATOR ESTEIRA CATERPILLAR CAT320D	2 eixos	Talhão-363	13:00	14:00	Talhão-11	06:00	18:00
FELLER BUNCHER JOHN DEERE 903k	3 eixos	Talhão-280	06:00	07:00	Talhão-561	06:00	18:00
HARVESTER BEAR 8W	3 eixos	Talhão-372	12:00	13:00	Talhão-396	06:00	18:00
PROCESSADOR CATERPILLAR 541	3 eixos	Talhão-356	07:00	08:00	Talhão-300	06:00	18:00
TRATOR ESTEIRA CATERPILLAR CAT541	3 eixos	Talhão-576	10:00	11:00	Talhão-420	06:00	18:00
ESCAVADEIRA SANY EC 215	3 eixos	Talhão-463	06:00	07:00	Talhão-56	06:00	18:00
TRATOR ESTEIRA KOMATSU D61	3 eixos	Talhão-180	06:00	07:00	Talhão-287	06:00	18:00
PROCESSADOR JOHN DEERE 903J	3 eixos	Talhão-523	06:00	07:00	Talhão-192	06:00	18:00
PROCESSADOR JOHN DEERE 903J	3 eixos	Talhão-186	10:00	11:00	Talhão-624	06:00	18:00
PROCESSADOR JOHN DEERE 903KH	3 eixos	Talhão-67	07:00	08:00	Talhão-184	06:00	18:00
PROCESSADOR JOHN DEERE 903KH	3 eixos	Talhão-12	07:00	08:00	Talhão-448	06:00	18:00
SKIDDER TIGERCAT 625C	3 eixos	Talhão-148	09:00	10:00	Talhão-200	06:00	18:00
SKIDDER TIGERCAT 635C	3 eixos	Talhão-469	11:00	12:00	Talhão-426	06:00	18:00
SKIDDER TIGERCAT 635C	3 eixos	Talhão-408	12:00	13:00	Talhão-145	06:00	18:00
SKIDDER TIMBERJACK 460	3 eixos	Talhão-569	13:00	14:00	Talhão-565	06:00	18:00
SKIDDER JOHN DEERE 648 GIII	3 eixos	Talhão-301	10:00	11:00	Talhão-328	06:00	18:00
SKIDDER TIGERCAT 635D	3 eixos	Talhão-133	10:00	11:00	Talhão-552	06:00	18:00
SKIDDER JOHN DEERE 748HX	3 eixos	Talhão-409	08:00	09:00	Talhão-127	06:00	18:00
SKIDDER CATERPILLAR CAT545C	3 eixos	Talhão-233	08:00	09:00	Talhão-412	06:00	18:00
TRATOR SKIDDER TIGERCAT 635D	3 eixos	Talhão-320	11:00	12:00	Talhão-640	06:00	18:00
VOLVO EC240BLC	3 eixos	Talhão-538	12:00	13:00	Talhão-251	06:00	18:00
TEF205 TRATOR KOMATSU D85EX	3 eixos	Talhão-173	06:00	07:00	Talhão-495	06:00	18:00
ESCAVADEIRA HIDRAULICA SOBRE RODAS M325D	4 eixos	Talhão-99	13:00	14:00	Talhão-358	06:00	18:00
FELLER BUNCHER TIGERCAT L870C	4 eixos	Talhão-632	09:00	10:00	Talhão-342	06:00	18:00
FELLER BUNCHER TIGERCAT L870C	4 eixos	Talhão-89	06:00	07:00	Talhão-284	06:00	18:00
PICADOR CBI 6400T	4 eixos	Talhão-483	06:00	07:00	Talhão-330	06:00	18:00
PROCESSADOR DOOSAN DX300LL	4 eixos	Talhão-245	09:00	10:00	Talhão-10	06:00	18:00
SHOVEL TIGERCAT LS855C	4 eixos	Talhão-514	06:00	07:00	Talhão-637	06:00	18:00
SHOVEL LOGGER JOHN DEERE 909KH	4 eixos	Talhão-620	09:00	10:00	Talhão-639	06:00	18:00
-	-	-	-	-	Garagem	06:00	18:00

Em que: H_i é o horário inicial de atendimento e H_f é o horário final de atendimento.

Passo 7.4: Cenário de demanda extrema – transporte de 60 máquinas por dia

Foi realizada uma simulação de demanda extrema (Tabela 10), com o transporte de 60 máquinas por 4 tipos veículos pranchas.

Tabela 10: Transporte de 60 máquinas e horários de atendimento dos talhões

Máquina	Tipo de veículo prancha	Coleta	H_i	H_f	Entrega	H_i	H_f
-	-	Garagem	06:00	18:00	-	-	-
CARREGADEIRA JOHN DEERE 524K	Plataforma	Talhão-218	06:30	07:30	Talhão-541	06:00	18:00
CATERPILLAR ESCHIDCATERPILLAR	Plataforma	Talhão-449	08:30	09:30	Talhão-407	06:00	18:00
TRATOR ESTEIRA TAURON 700J	Plataforma	Talhão-118	06:30	07:30	Talhão-543	06:00	18:00
TRATOR PNEU MF4291/4 12V	Plataforma	Talhão-92	08:30	09:30	Talhão-610	06:00	18:00
TRATOR PNEU MF4291/4 12V	Plataforma	Talhão-400	12:00	13:00	Talhão-228	06:00	18:00
TRATOR AGRICOLA VALTRA 4R BT210 4X4	Plataforma	Talhão-562	10:00	11:00	Talhão-20	06:00	18:00
TRATOR AGRICOLA VALTRA 4R BT210 4X4	Plataforma	Talhão-317	06:30	07:30	Talhão-354	06:00	18:00
ESCAVADEIRA CATERPILLAR 312	Plataforma	Talhão-617	06:30	07:30	Talhão-178	06:00	18:00
MOTONIVELADORA CATERPILLAR 120H	Plataforma	Talhão-378	07:00	08:00	Talhão-572	06:00	18:00
ROLO COMPACTADOR DYNAPAC CA250	Plataforma	Talhão-278	06:30	07:30	Talhão-302	06:00	18:00
ROLO COMPACTADOR VOLVO SD105	Plataforma	Talhão-355	09:30	10:30	Talhão-257	06:00	18:00
ROLO COMPACTADOR HAM	Plataforma	Talhão-45	14:00	15:00	Talhão-259	06:00	18:00
ROLO COMPACTADOR HAM	Plataforma	Talhão-631	07:30	08:30	Talhão-321	06:00	18:00
RETRO ESCAVADEIRA CATERPILLAR 416E	Plataforma	Talhão-393	13:00	14:00	Talhão-297	06:00	18:00
MOTONIVELADORA CATERPILLAR 120K	Plataforma	Talhão-38	07:00	08:00	Talhão-245	06:00	18:00
FORWARDER ELEPHANT KING 8W PONSSE	2 eixos	Talhão-524	10:00	11:00	Talhão-21	06:00	18:00
FORWARDER ELEPHANT KING 8W PONSSE	2 eixos	Talhão-306	06:30	07:30	Talhão-229	06:00	18:00
HARVESTER ERGO 8W PONSSE	2 eixos	Talhão-206	06:30	07:30	Talhão-248	06:00	18:00
HARVESTER ERGO 8W PONSSE	2 eixos	Talhão-410	11:30	12:30	Talhão-296	06:00	18:00

SKIDDER JOHN DEERE 648 GIII	2 eixos	Talhão-553	11:30	12:30	Talhão-72	06:00	18:00
VOLVO EC240BLC	2 eixos	Talhão-453	06:00	07:00	Talhão-363	06:00	18:00
TRATOR KOMATSU ESCADEIRA PC200-8	2 eixos	Talhão-474	06:00	07:00	Talhão-52	06:00	18:00
TRATOR ESTEIRA CATERPILLAR CAT320D	2 eixos	Talhão-372	09:30	10:30	Talhão-463	06:00	18:00
ESCAVADEIRA HIDRAULICA DOOSAN	2 eixos	Talhão-588	12:00	13:00	Talhão-35	06:00	18:00
TRATOR ESTEIRA CATERPILLAR CAT320D	2 eixos	Talhão-104	13:00	14:00	Talhão-67	06:00	18:00
TRATOR ESTEIRA DOOSAN DX225LCA	2 eixos	Talhão-579	06:30	07:30	Talhão-478	06:00	18:00
TRATOR ESTEIRA DOOSAN DX225LCA	2 eixos	Talhão-533	06:00	07:00	Talhão-371	06:00	18:00
VOLVO A30E	2 eixos	Talhão-119	10:30	11:30	Talhão-315	06:00	18:00
ESCAVADEIRA CATERPILLAR 320D	2 eixos	Talhão-142	06:30	07:30	Talhão-409	06:00	18:00
MOTONIVELADORA CASE 865B	2 eixos	Talhão-24	06:30	07:30	Talhão-468	06:00	18:00
FELLER BUNCHER JOHN DEERE 903k	3 eixos	Talhão-90	10:00	11:00	Talhão-357	06:00	18:00
HARVESTER BEAR 8W	3 eixos	Talhão-51	09:30	10:30	Talhão-82	06:00	18:00
PROCESSADOR TIGERCAT H855C	3 eixos	Talhão-486	06:00	07:00	Talhão-238	06:00	18:00
PROCESSADOR JOHN DEERE 903J	3 eixos	Talhão-586	06:00	07:00	Talhão-199	06:00	18:00
PROCESSADOR JOHN DEERE 903KH	3 eixos	Talhão-69	09:00	10:00	Talhão-555	06:00	18:00
SKIDDER TIGERCAT 625C	3 eixos	Talhão-211	06:30	07:30	Talhão-471	06:00	18:00
SKIDDER TIMBERJACK 460	3 eixos	Talhão-345	07:00	08:00	Talhão-589	06:00	18:00
SKIDDER JOHN DEERE 648 GIII	3 eixos	Talhão-130	10:00	11:00	Talhão-230	06:00	18:00
SKIDDER CATERPILLAR CAT545C	3 eixos	Talhão-102	10:30	11:30	Talhão-94	06:00	18:00
TRATOR SKIDDER TIGERCAT 635D	3 eixos	Talhão-28	09:30	10:30	Talhão-172	06:00	18:00
VOLVO EC240BLC	3 eixos	Talhão-329	06:00	07:00	Talhão-16	06:00	18:00
TEF205 TRATOR KOMATSU D85EX	3 eixos	Talhão-398	10:30	11:30	Talhão-169	06:00	18:00
CATERPILLAR 320C	3 eixos	Talhão-594	06:30	07:30	Talhão-12	06:00	18:00
PROCESSADOR CATERPILLAR 541	3 eixos	Talhão-88	09:30	10:30	Talhão-73	06:00	18:00
TRATOR ESTEIRA CATERPILLAR CAT541	3 eixos	Talhão-143	11:30	12:30	Talhão-480	06:00	18:00
ESCAVADEIRA HIDRAULICA SOBRE RODAS M325D	4 eixos	Talhão-251	12:00	13:00	Talhão-239	06:00	18:00
FELLER BUNCHER TIGERCAT L870C	4 eixos	Talhão-240	08:00	09:00	Talhão-293	06:00	18:00
PICADOR CBI 6400T	4 eixos	Talhão-109	06:30	07:30	Talhão-86	06:00	18:00
PROCESSADOR DOOSAN DX300LL	4 eixos	Talhão-18	07:00	08:00	Talhão-233	06:00	18:00
SHOVEL TIGERCAT LS855C	4 eixos	Talhão-434	06:00	07:00	Talhão-443	06:00	18:00
SHOVEL LOGGER JOHN DEERE 909J	4 eixos	Talhão-563	08:00	09:00	Talhão-408	06:00	18:00

SHOVEL LOGGER JOHN DEERE 909KH	4 eixos	Talhão-162	13:30	14:30	Talhão-367	06:00	18:00
SHOVEL LOGGER JOHN DEERE 909M	4 eixos	Talhão-170	08:30	09:30	Talhão-350	06:00	18:00
SHOVEL LOGGER JOHN DEERE 909M	4 eixos	Talhão-395	13:30	14:30	Talhão-457	06:00	18:00
FELLER BUNCHER JOHN DEERE 959K	4 eixos	Talhão-369	07:00	08:00	Talhão-390	06:00	18:00
FELLER BUNCHER JOHN DEERE 959K	4 eixos	Talhão-144	11:30	12:30	Talhão-328	06:00	18:00
FELLER BUNCHER TIGERCAT L870C	4 eixos	Talhão-108	06:30	07:30	Talhão-175	06:00	18:00
PICADOR CBI 6400T	4 eixos	Talhão-184	06:30	07:30	Talhão-528	06:00	18:00
PICADOR CBI 6400T	4 eixos	Talhão-217	08:30	09:30	Talhão-566	06:00	18:00
PROCESSADOR DOOSAN DX300LL	4 eixos	Talhão-95	12:30	13:30	Talhão-158	06:00	18:00
-	-	-	-	-	Garagem	06:00	18:00

Em que: H_i é o horário inicial de atendimento e H_f é o horário final de atendimento.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CENÁRIO 1

A função objetivo foi igual a zero e o número de veículos prancha igual a oito, o que significa que não existem atrasos, ou seja, os horários que as máquinas estão disponíveis para o transporte são viáveis. Se existissem atrasos, estes seriam somados ao limite superior da janela de tempo para tornar o modelo viável. Concluída esta etapa, os horários inviáveis foram corrigidos e realizada a minimização do número de veículos prancha necessários para o transporte, que para este problema foram seis veículos. Na terceira etapa foi realizada a minimização da distância ponderada pela qualidade da estrada, sendo obtida uma distância de 773,064 km. As rotas para cada objetivo estão na Tabela 11 e Figura 5.

Tabela 11: Rotas dos veículos prancha para o cenário de transporte de 10 máquinas

Tipo / nº do veículo	Rota
Minimizar o atraso	
2 eixos / nº1	Garagem → Talhão-135 → Talhão-478 → Garagem
3 eixos / nº1	Garagem → Talhão-10 → Talhão-395 → Talhão-382 → Talhão-491 → Garagem
3 eixos / nº2	Garagem → Talhão-75 → Talhão-398 → Garagem
3 eixos / nº3	Garagem → Talhão-383 → Talhão-570 → Garagem
3 eixos / nº4	Garagem → Talhão-254 → Talhão-490 → Garagem
3 eixos / nº5	Garagem → Talhão-16 → Talhão-396 → Garagem
4 eixos / nº1	Garagem → Talhão-82 → Talhão-415 → Talhão-384 → Talhão-639 → Garagem
4 eixos / nº2	Garagem → Talhão-133 → Talhão-418 → Garagem
Minimizar o número de veículos	
2 eixos / nº1	Garagem → Talhão-135 → Talhão-478 → Garagem
3 eixos / nº1	Garagem → Talhão-16 → Talhão-396 → Talhão-382 → Talhão-491 → Garagem
3 eixos / nº2	Garagem → Talhão-75 → Talhão-398 → Talhão-383 → Talhão-570 → Garagem
3 eixos / nº3	Garagem → Talhão-10 → Talhão-395 → Talhão-254 → Talhão-490 → Garagem
4 eixos / nº1	Garagem → Talhão-133 → Talhão-418 → Talhão-384 → Talhão-639 → Garagem
4 eixos / nº2	Garagem → Talhão-82 → Talhão-415 → Garagem
Minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada	
2 eixos / nº1	Garagem → Talhão-135 → Talhão-478 → Garagem
3 eixos / nº1	Garagem → Talhão-75 → Talhão-398 → Talhão-383 → Talhão-570 → Garagem
3 eixos / nº2	Garagem → Talhão-16 → Talhão-396 → Talhão-382 → Talhão-491 → Garagem
3 eixos / nº3	Garagem → Talhão-10 → Talhão-395 → Talhão-254 → Talhão-490 → Garagem
4 eixos / nº1	Garagem → Talhão-133 → Talhão-418 → Talhão-384 → Talhão-639 → Garagem
4 eixos / nº2	Garagem → Talhão-82 → Talhão-415 → Garagem

→ Veículo prancha vazio

→ Veículo prancha carregado

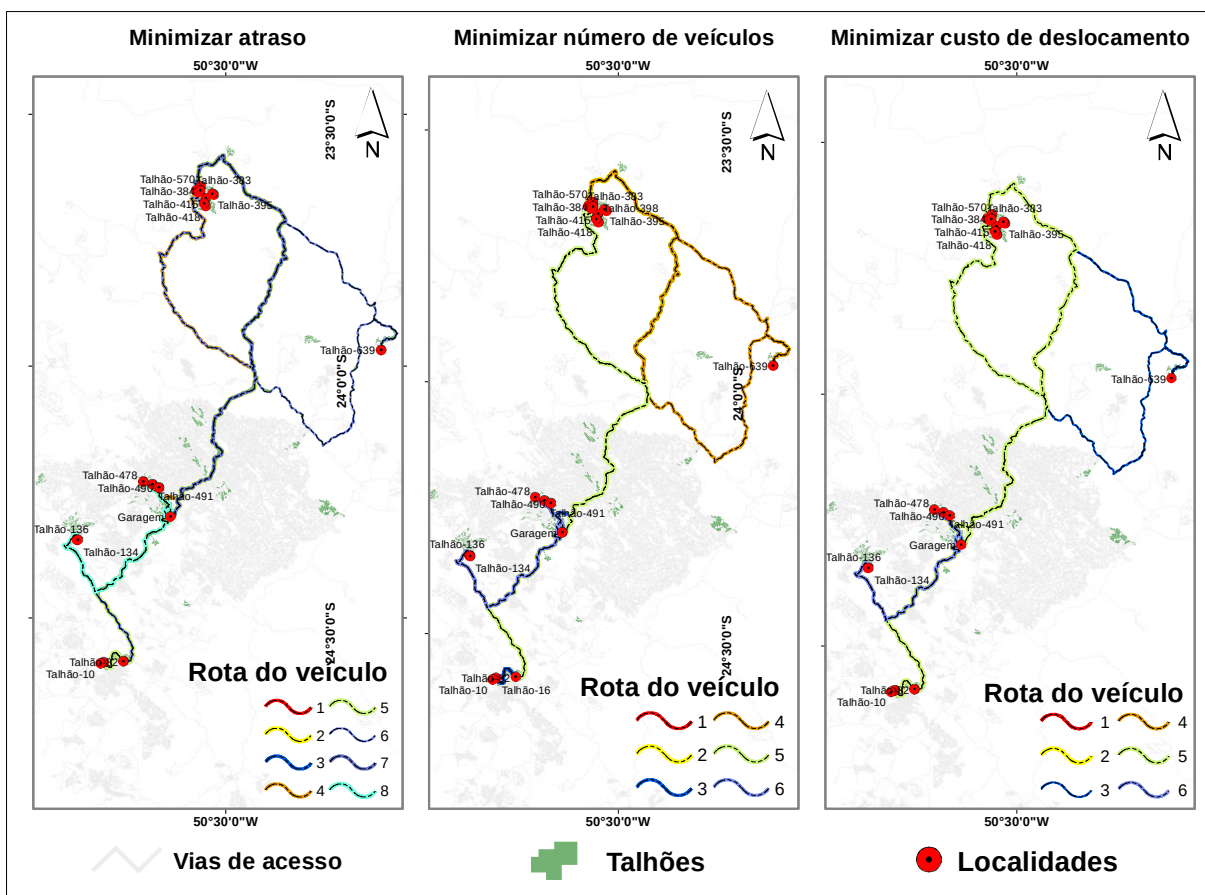


Figura 5: Espacialização do cenário de transporte de 10 máquinas.

Os horários de atendimento de cada talhão, assim como os horários de saída e retorno à garagem se encontram na Tabela 12. Nota-se que não ocorreram atrasos no transporte das máquinas e no retorno à garagem. Os atrasos tendem a ocorrer com mais frequência em situações de maior demanda e quando os talhões estão com maiores distâncias entre eles ou em relação à garagem.

Este modelo tem como vantagem possibilitar ao gestor a identificar também os horários de atendimentos impossíveis de serem atingidos devido à distância entre os talhões de coleta e a garagem em que os veículos pranchas saem. Supondo que essa situação ocorra com muita frequência na empresa, deve ser realizada uma análise para verificar se a locação da garagem está em um local adequado do ponto de vista logístico. Outra alternativa a ser analisada é com relação a alocação de garagens auxiliares em pontos estratégicos que minimizem as chances de ocorrer atrasos devido a distâncias muito longas.

Tabela 12: Horários de atendimento dos talhões para o cenário de transporte de 10 máquinas

		Coleta		Entrega		
Minimizar o atraso						
Tipo / nº do veículo	Origem	Ho. de atendimento	Atraso	Destino	Ho. de atendimento	Atraso
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-135	13:00	00:00	Talhão-478	14:44	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-10	08:00	00:00	Talhão-395	11:56	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-382	12:43	00:00	Talhão-491	15:32	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-75	08:00	00:00	Talhão-398	11:33	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-383	12:00	00:00	Talhão-570	15:23	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-254	13:00	00:00	Talhão-490	15:50	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-16	08:40	00:00	Talhão-396	12:34	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-82	08:00	00:00	Talhão-415	11:35	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-384	12:17	00:00	Talhão-639	14:26	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-133	08:00	00:00	Talhão-418	11:39	00:00
-	-	-	-	Garagem	18:00	00:00
Minimizar o número de veículos						
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-135	13:00	00:00	Talhão-478	14:44	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-16	08:40	00:00	Talhão-396	12:34	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-382	13:30	00:00	Talhão-491	16:19	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-75	08:00	00:00	Talhão-398	11:33	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-383	13:00	00:00	Talhão-570	13:36	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-10	08:00	00:00	Talhão-395	11:56	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-254	13:00	00:00	Talhão-490	15:50	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-133	08:00	00:00	Talhão-418	11:39	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-384	12:20	00:00	Talhão-639	15:15	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-82	09:00	00:00	Talhão-415	12:35	00:00
-	-	-	-	Garagem	18:00	00:00
Minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada						
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-135	14:00	00:00	Talhão-478	15:44	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-75	08:00	00:00	Talhão-398	11:33	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-383	12:18	00:00	Talhão-570	12:54	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-16	08:40	00:00	Talhão-396	12:34	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-382	13:30	00:00	Talhão-491	16:19	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-10	08:00	00:00	Talhão-395	11:56	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-254	14:00	00:00	Talhão-490	16:50	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-133	08:00	00:00	Talhão-418	11:39	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-384	13:00	00:00	Talhão-639	15:15	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-82	08:00	00:00	Talhão-415	11:35	00:00
-	-	-	-	Garagem	18:00	00:00

Ho.: Horário

6.2 CENÁRIO 2

No cenário 2, trata-se de um dia de média demanda de transporte da empresa, no máximo 20 máquinas. Foi realizado primeiro a minimização do atraso, considerando um veículo para transportar cada máquina, sendo obtida uma função objetivo igual a zero e o número de veículos igual a 17, o que significa que não existem

atrasos. O próximo objetivo minimizado foi o número de veículos para realizar o transporte das máquinas, sendo obtido um valor igual a 13 veículos pranchas. Considerando o número mínimo de veículos prancha necessários, foi realizada a minimização da distância ponderada pela qualidade da estrada, sendo obtido um valor de 1.268,246 km. As rotas para cada objetivo podem ser visualizadas na Tabela 13 e Figura 6.

Tabela 13: Rotas dos veículos prancha para o cenário de transporte de 20 máquinas

Tipo / nº do veículo	Rota
Minimizar o atraso	
2 eixos / nº01	Garagem → Talhão-208 → Talhão-148 → Garagem
2 eixos / nº02	Garagem → Talhão-185 → Talhão-469 → Garagem
3 eixos / nº01	Garagem → Talhão-255 → Talhão-133 → Talhão-100 → Talhão-408 → Garagem
3 eixos / nº02	Garagem → Talhão-363 → Talhão-538 → Garagem
3 eixos / nº03	Garagem → Talhão-356 → Talhão-632 → Talhão-372 → Talhão-99 → Garagem
3 eixos / nº04	Garagem → Talhão-52 → Talhão-320 → Garagem
3 eixos / nº05	Garagem → Talhão-273 → Talhão-233 → Garagem
3 eixos / nº06	Garagem → Talhão-313 → Talhão-409 → Garagem
3 eixos / nº07	Garagem → Talhão-28 → Talhão-301 → Garagem
3 eixos / nº08	Garagem → Talhão-207 → Talhão-569 → Garagem
3 eixos / nº09	Garagem → Talhão-280 → Talhão-173 → Garagem
3 eixos / nº10	Garagem → Talhão-576 → Talhão-89 → Garagem
3 eixos / nº11	Garagem → Talhão-463 → Talhão-483 → Garagem
3 eixos / nº12	Garagem → Talhão-180 → Talhão-245 → Garagem
4 eixos / nº01	Garagem → Talhão-523 → Talhão-514 → Garagem
4 eixos / nº02	Garagem → Talhão-186 → Talhão-620 → Garagem
Plataforma / nº01	Garagem → Talhão-397 → Talhão-67 → Talhão-86 → Talhão-12 → Garagem
Minimizar o número de veículos	
2 eixos / nº01	Garagem → Talhão-185 → Talhão-469 → Talhão-208 → Talhão-148 → Garagem
3 eixos / nº01	Garagem → Talhão-255 → Talhão-133 → Talhão-372 → Talhão-99 → Garagem
3 eixos / nº02	Garagem → Talhão-273 → Talhão-233 → Garagem
3 eixos / nº03	Garagem → Talhão-363 → Talhão-538 → Garagem
3 eixos / nº04	Garagem → Talhão-28 → Talhão-301 → Talhão-313 → Talhão-409 → Garagem
3 eixos / nº05	Garagem → Talhão-356 → Talhão-632 → Garagem
3 eixos / nº06	Garagem → Talhão-180 → Talhão-245 → Garagem
3 eixos / nº07	Garagem → Talhão-52 → Talhão-320 → Talhão-207 → Talhão-569 → Garagem
3 eixos / nº08	Garagem → Talhão-576 → Talhão-89 → Talhão-100 → Talhão-408 → Garagem
3 eixos / nº09	Garagem → Talhão-463 → Talhão-483 → Talhão-280 → Talhão-173 → Garagem
4 eixos / nº01	Garagem → Talhão-523 → Talhão-514 → Garagem
4 eixos / nº02	Garagem → Talhão-186 → Talhão-620 → Garagem
Plataforma / nº01	Garagem → Talhão-397 → Talhão-67 → Talhão-86 → Talhão-12 → Garagem
Minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada	
2 eixos / nº01	Garagem → Talhão-185 → Talhão-469 → Talhão-208 → Talhão-148 → Garagem

3 eixos / nº01	Garagem → Talhão-576 → Talhão-89 → Talhão-100 → Talhão-408 → Garagem
3 eixos / nº02	Garagem → Talhão-52 → Talhão-320 → Garagem
3 eixos / nº03	Garagem → Talhão-363 → Talhão-538 → Talhão-372 → Talhão-99 → Garagem
3 eixos / nº04	Garagem → Talhão-255 → Talhão-133 → Talhão-280 → Talhão-173 → Talhão-207 → Talhão-569 → Garagem
3 eixos / nº05	Garagem → Talhão-28 → Talhão-301 → Talhão-313 → Talhão-409 → Garagem
3 eixos / nº06	Garagem → Talhão-356 → Talhão-632 → Garagem
3 eixos / nº07	Garagem → Talhão-463 → Talhão-483 → Garagem
3 eixos / nº08	Garagem → Talhão-180 → Talhão-245 → Garagem
3 eixos / nº09	Garagem → Talhão-273 → Talhão-233 → Garagem
4 eixos / nº01	Garagem → Talhão-523 → Talhão-514 → Garagem
4 eixos / nº02	Garagem → Talhão-186 → Talhão-620 → Garagem
Plataforma / nº01	Garagem → Talhão-397 → Talhão-67 → Talhão-86 → Talhão-12 → Garagem

→ Veículo prancha vazio

→ Veículo prancha carregado

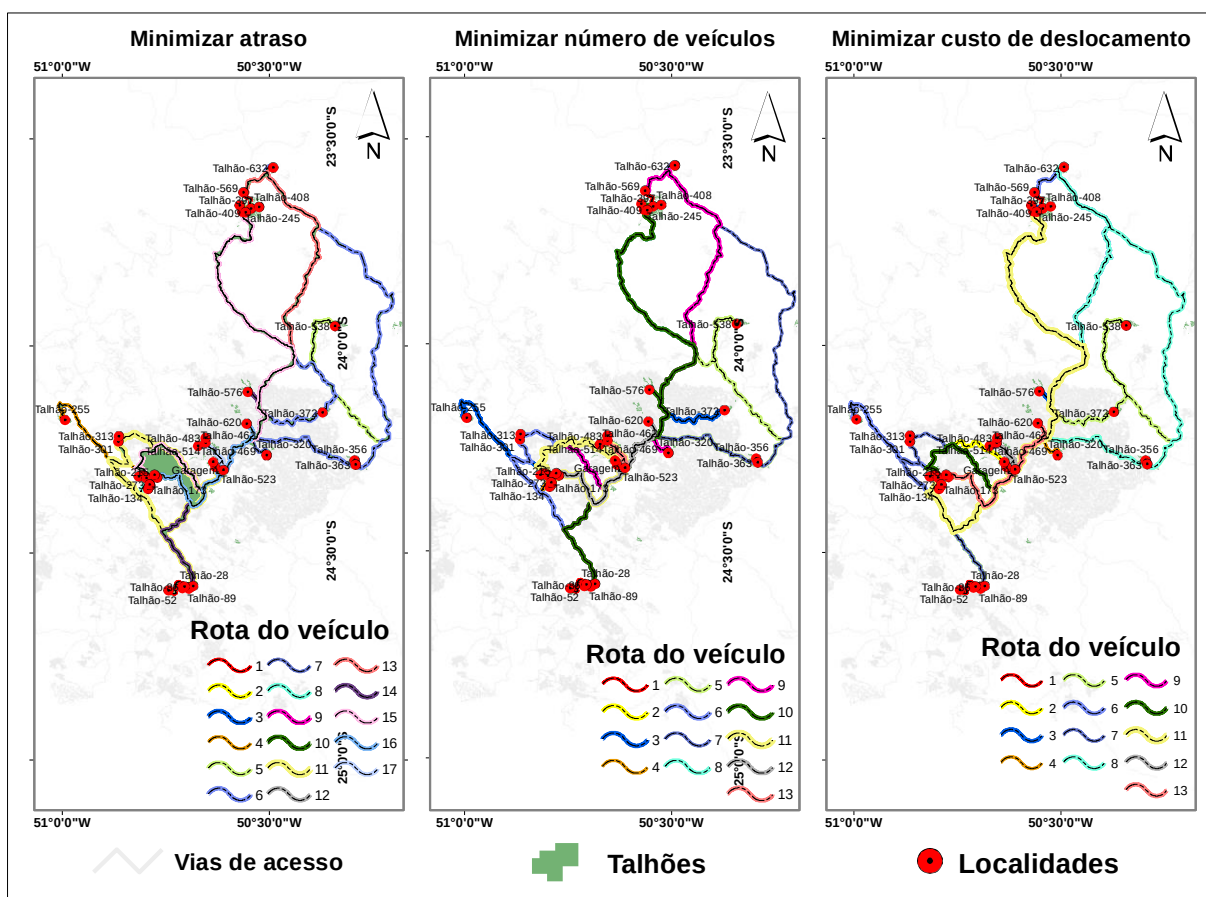


Figura 6: Espacialização do cenário de transporte de 20 máquinas.

Os horários de atendimento de cada talhão, assim como os horários de saída e retorno à garagem se encontram na Tabela 14. Nota-se que não ocorreram atrasos no transporte das máquinas e no retorno dos veículos prancha para a garagem.

Tabela 14: Horários de atendimento dos talhões para o cenário de transporte de 20 máquinas

		Coleta		Entrega		
Minimizar o atraso						
Tipo / nº do veículo	Origem	Ho. de atendimento	Atraso	Destino	Ho. de atendimento	Atraso
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-208	15:00	00:00	Talhão-148	15:44	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-185	06:45	00:00	Talhão-469	08:22	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-100	11:00	00:00	Talhão-408	14:29	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-255	07:23	00:00	Talhão-133	08:51	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-363	08:00	00:00	Talhão-538	13:34	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-372	12:00	00:00	Talhão-99	14:17	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-356	07:10	00:00	Talhão-632	09:38	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-52	06:54	00:00	Talhão-320	08:45	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-273	06:52	00:00	Talhão-233	10:15	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-313	08:00	00:00	Talhão-409	11:25	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-28	07:00	00:00	Talhão-301	09:39	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-207	11:00	00:00	Talhão-569	15:26	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-280	09:00	00:00	Talhão-173	09:32	00:00
3 eixos / nº10	Talhão-576	06:36	00:00	Talhão-89	08:33	00:00
3 eixos / nº11	Talhão-463	06:24	00:00	Talhão-483	07:03	00:00
3 eixos / nº12	Talhão-180	06:52	00:00	Talhão-245	10:18	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-523	07:00	00:00	Talhão-514	11:33	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-186	06:48	00:00	Talhão-620	08:27	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-397	10:00	00:00	Talhão-67	13:35	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-86	15:00	00:00	Talhão-12	15:45	00:00
-	-	-	-	Garagem	18:00	00:00
Minimizar o número de veículos						
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-208	15:00	00:00	Talhão-148	15:44	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-185	07:00	00:00	Talhão-469	08:22	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-255	07:23	00:00	Talhão-133	08:51	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-372	13:00	00:00	Talhão-99	15:17	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-273	07:00	00:00	Talhão-233	10:23	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-363	07:09	00:00	Talhão-538	08:58	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-28	06:48	00:00	Talhão-301	08:22	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-313	09:00	00:00	Talhão-409	12:25	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-356	08:00	00:00	Talhão-632	10:28	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-180	07:00	00:00	Talhão-245	10:26	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-207	11:00	00:00	Talhão-569	14:22	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-52	07:00	00:00	Talhão-320	08:51	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-576	06:36	00:00	Talhão-89	08:33	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-100	11:49	00:00	Talhão-408	15:18	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-280	09:08	00:00	Talhão-173	10:23	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-463	06:24	00:00	Talhão-483	07:03	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-523	07:00	00:00	Talhão-514	07:48	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-186	06:48	00:00	Talhão-620	08:39	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-397	10:00	00:00	Talhão-67	13:35	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-86	15:00	00:00	Talhão-12	16:23	00:00
-	-	-	-	Garagem	18:00	00:00
Minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada						
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-208	15:00	00:00	Talhão-148	15:44	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-185	07:00	00:00	Talhão-469	08:22	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-100	11:49	00:00	Talhão-408	15:18	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-576	06:36	00:00	Talhão-89	08:33	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-52	07:00	00:00	Talhão-320	08:51	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-363	07:09	00:00	Talhão-538	08:58	00:00

3 eixos / nº03	Talhão-372	13:00	00:00	Talhão-99	15:17	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-207	11:00	00:00	Talhão-569	14:22	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-255	07:23	00:00	Talhão-133	08:51	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-280	09:51	00:00	Talhão-173	10:23	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-28	06:48	00:00	Talhão-301	08:22	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-313	09:00	00:00	Talhão-409	12:25	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-356	08:00	00:00	Talhão-632	10:28	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-463	06:24	00:00	Talhão-483	07:03	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-180	07:00	00:00	Talhão-245	10:26	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-273	07:00	00:00	Talhão-233	10:23	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-523	06:07	00:00	Talhão-514	07:48	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-186	06:48	00:00	Talhão-620	08:39	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-397	10:00	00:00	Talhão-67	13:35	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-86	15:38	00:00	Talhão-12	16:23	00:00
-	-	-	-	Garagem	18:00	00:00

Ho.: Horário

6.3 CENÁRIO 3

No cenário 3, foi avaliado o desempenho do modelo para uma situação de alta demanda da empresa que transporta no máximo 40 máquinas por dia. Foi realizada primeiro a minimização do atraso, considerando um veículo prancha para o transporte de cada máquina. A função objetivo foi igual a zero e o número de veículos igual a quarenta. A próxima etapa foi minimizar o número de veículos prancha utilizados, do qual foi obtido um valor mínimo de 18. Como o número de veículos pranchas necessários para o transporte foi superior ao que a empresa tem disponível, foram consideradas duas situações: a primeira utilizando o número mínimo de veículo prancha (18 veículos) e segunda considerando somente o número de veículos que a empresa possui (15 veículos), mas ocorrendo atrasos no transporte. Considerando a primeira situação e minimizando a distância ponderada pela qualidade da estrada, obteve-se um valor de 2.340,925 km na função objetivo. As rotas para cada objetivo nesta situação pode ser visualizadas na Tabela 15 e Figura 7.

Tabela 15: Rotas dos veículos prancha para o cenário de transporte de 40 máquinas

Veículo nº	Rota
Minimizar o atraso	
2 eixos / nº01	Garagem → Talhão-52 → Talhão-174 → Garagem
2 eixos / nº02	Garagem → Talhão-363 → Talhão-11 → Garagem
2 eixos / nº04	Garagem → Talhão-28 → Talhão-25 → Garagem
2 eixos / nº04	Garagem → Talhão-273 → Talhão-401 → Garagem
2 eixos / nº05	Garagem → Talhão-255 → Talhão-68 → Garagem
2 eixos / nº06	Garagem → Talhão-313 → Talhão-130 → Garagem
3 eixos / nº01	Garagem → Talhão-133 → Talhão-552 → Garagem
3 eixos / nº01	Garagem → Talhão-301 → Talhão-328 → Garagem

3 eixos / nº02	Garagem → Talhão-356 → Talhão-300 → Garagem
3 eixos / nº03	Garagem → Talhão-523 → Talhão-192 → Garagem
3 eixos / nº04	Garagem → Talhão-409 → Talhão-127 → Garagem
3 eixos / nº05	Garagem → Talhão-186 → Talhão-624 → Garagem
3 eixos / nº06	Garagem → Talhão-233 → Talhão-412 → Garagem
3 eixos / nº07	Garagem → Talhão-320 → Talhão-640 → Garagem
3 eixos / nº08	Garagem → Talhão-538 → Talhão-251 → Garagem
3 eixos / nº09	Garagem → Talhão-538 → Talhão-251 → Garagem
3 eixos / nº10	Garagem → Talhão-280 → Talhão-561 → Garagem
3 eixos / nº11	Garagem → Talhão-173 → Talhão-495 → Garagem
3 eixos / nº12	Garagem → Talhão-576 → Talhão-420 → Garagem
3 eixos / nº13	Garagem → Talhão-12 → Talhão-448 → Garagem
3 eixos / nº14	Garagem → Talhão-148 → Talhão-200 → Garagem
3 eixos / nº15	Garagem → Talhão-469 → Talhão-426 → Garagem
3 eixos / nº16	Garagem → Talhão-463 → Talhão-56 → Garagem
3 eixos / nº17	Garagem → Talhão-408 → Talhão-145 → Garagem
3 eixos / nº18	Garagem → Talhão-372 → Talhão-396 → Garagem
3 eixos / nº19	Garagem → Talhão-569 → Talhão-565 → Garagem
3 eixos / nº20	Garagem → Talhão-180 → Talhão-287 → Garagem
4 eixos / nº01	Garagem → Talhão-99 → Talhão-358 → Garagem
4 eixos / nº02	Garagem → Talhão-632 → Talhão-342 → Garagem
4 eixos / nº03	Garagem → Talhão-89 → Talhão-284 → Garagem
4 eixos / nº04	Garagem → Talhão-483 → Talhão-330 → Garagem
4 eixos / nº05	Garagem → Talhão-245 → Talhão-10 → Garagem
4 eixos / nº06	Garagem → Talhão-514 → Talhão-637 → Garagem
4 eixos / nº07	Garagem → Talhão-620 → Talhão-639 → Garagem
Plataforma / nº01	Garagem → Talhão-397 → Talhão-599 → Garagem
Plataforma / nº02	Garagem → Talhão-86 → Talhão-93 → Garagem
Plataforma / nº03	Garagem → Talhão-208 → Talhão-522 → Garagem
Plataforma / nº04	Garagem → Talhão-185 → Talhão-123 → Garagem
Plataforma / nº05	Garagem → Talhão-100 → Talhão-540 → Garagem
Plataforma / nº06	Garagem → Talhão-207 → Talhão-504 → Garagem
Minimizar o número de veículos	
2 eixos / nº01	Garagem → Talhão-255 → Talhão-68 → Talhão-52 → Talhão-174 → Talhão-363 → Talhão-11 → Garagem
2 eixos / nº02	Garagem → Talhão-313 → Talhão-130 → Talhão-273 → Talhão-401 → Talhão-28 → Talhão-25 → Garagem
3 eixos / nº01	Garagem → Talhão-233 → Talhão-412 → Talhão-372 → Talhão-396 → Garagem
3 eixos / nº02	Garagem → Talhão-280 → Talhão-561 → Talhão-538 → Talhão-251 → Garagem
3 eixos / nº03	Garagem → Talhão-180 → Talhão-287 → Talhão-576 → Talhão-420 → Talhão-569 → Talhão-565 → Garagem
3 eixos / nº04	Garagem → Talhão-67 → Talhão-184 → Talhão-301 → Talhão-328 → Garagem
3 eixos / nº05	Garagem → Talhão-463 → Talhão-56 → Talhão-133 → Talhão-552 → Garagem
3 eixos / nº06	Garagem → Talhão-356 → Talhão-300 → Talhão-469 → Talhão-426 → Garagem
3 eixos / nº07	Garagem → Talhão-523 → Talhão-192 → Talhão-148 → Talhão-200 → Talhão-320 → Talhão-640 → Garagem
3 eixos / nº08	Garagem → Talhão-409 → Talhão-127 → Garagem
3 eixos / nº09	Garagem → Talhão-12 → Talhão-448 → Talhão-408 → Talhão-145 → Garagem
3 eixos / nº10	Garagem → Talhão-173 → Talhão-495 → Talhão-186 → Talhão-624 → Garagem
4 eixos / nº01	Garagem → Talhão-514 → Talhão-637 → Talhão-632 → Talhão-342 → Talhão-99 → Talhão-358 → Garagem
4 eixos / nº02	Garagem → Talhão-89 → Talhão-284 → Talhão-620 → Talhão-639 → Garagem

4 eixos / nº03	Garagem → Talhão-483 → Talhão-330 → Talhão-245 → Talhão-10 → Garagem
Plataforma / nº01	Garagem → Talhão-483 → Talhão-330 → Talhão-245 → Talhão-10 → Garagem
Plataforma / nº02	Garagem → Talhão-86 → Talhão-93 → Talhão-100 → Talhão-540 → Garagem
Plataforma / nº03	Garagem → Talhão-397 → Talhão-599 → Garagem Garagem → Talhão-208 → Talhão-522 → Talhão-185 → Talhão-123 → Talhão-207 → Talhão-504 → Garagem
Minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada	
2 eixos / nº01	Garagem → Talhão-313 → Talhão-130 → Talhão-273 → Talhão-401 → Talhão-28 → Talhão-25 → Garagem
2 eixos / nº02	Garagem → Talhão-255 → Talhão-68 → Talhão-52 → Talhão-174 → Talhão- 363 → Talhão-11 → Garagem
3 eixos / nº01	Garagem → Talhão-463 → Talhão-56 → Talhão-320 → Talhão-640 → Garagem
3 eixos / nº02	Garagem → Talhão-409 → Talhão-127 → Garagem
3 eixos / nº03	Garagem → Talhão-67 → Talhão-184 → Talhão-186 → Talhão-624 → Garagem
3 eixos / nº04	Garagem → Talhão-173 → Talhão-495 → Talhão-538 → Talhão-251 → Garagem
3 eixos / nº05	Garagem → Talhão-523 → Talhão-192 → Talhão-148 → Talhão-200 → Talhão-133 → Talhão-552 → Garagem
3 eixos / nº06	Garagem → Talhão-180 → Talhão-287 → Talhão-576 → Talhão-420 → Talhão-569 → Talhão-565 → Garagem
3 eixos / nº07	Garagem → Talhão-280 → Talhão-561 → Talhão-372 → Talhão-396 → Garagem
3 eixos / nº08	Garagem → Talhão-12 → Talhão-448 → Talhão-469 → Talhão-426 → Garagem
3 eixos / nº09	Garagem → Talhão-356 → Talhão-300 → Talhão-301 → Talhão-328 → Garagem
3 eixos / nº10	Garagem → Talhão-233 → Talhão-412 → Talhão-408 → Talhão-145 → Garagem
4 eixos / nº01	Garagem → Talhão-89 → Talhão-284 → Talhão-620 → Talhão-639 → Garagem
4 eixos / nº02	Garagem → Talhão-514 → Talhão-637 → Talhão-245 → Talhão-10 → Garagem
4 eixos / nº03	Garagem → Talhão-483 → Talhão-330 → Talhão-632 → Talhão-342 → Talhão-99 → Talhão-358 → Garagem
Plataforma / nº01	Garagem → Talhão-208 → Talhão-522 → Talhão-86 → Talhão-93 → Talhão- 100 → Talhão-540 → Garagem
Plataforma / nº02	Garagem → Talhão-185 → Talhão-123 → Talhão-207 → Talhão-504 → Garagem
Plataforma / nº03	Garagem → Talhão-397 → Talhão-599 → Garagem

→ Veículo prancha vazio

→ Veículo prancha carregado

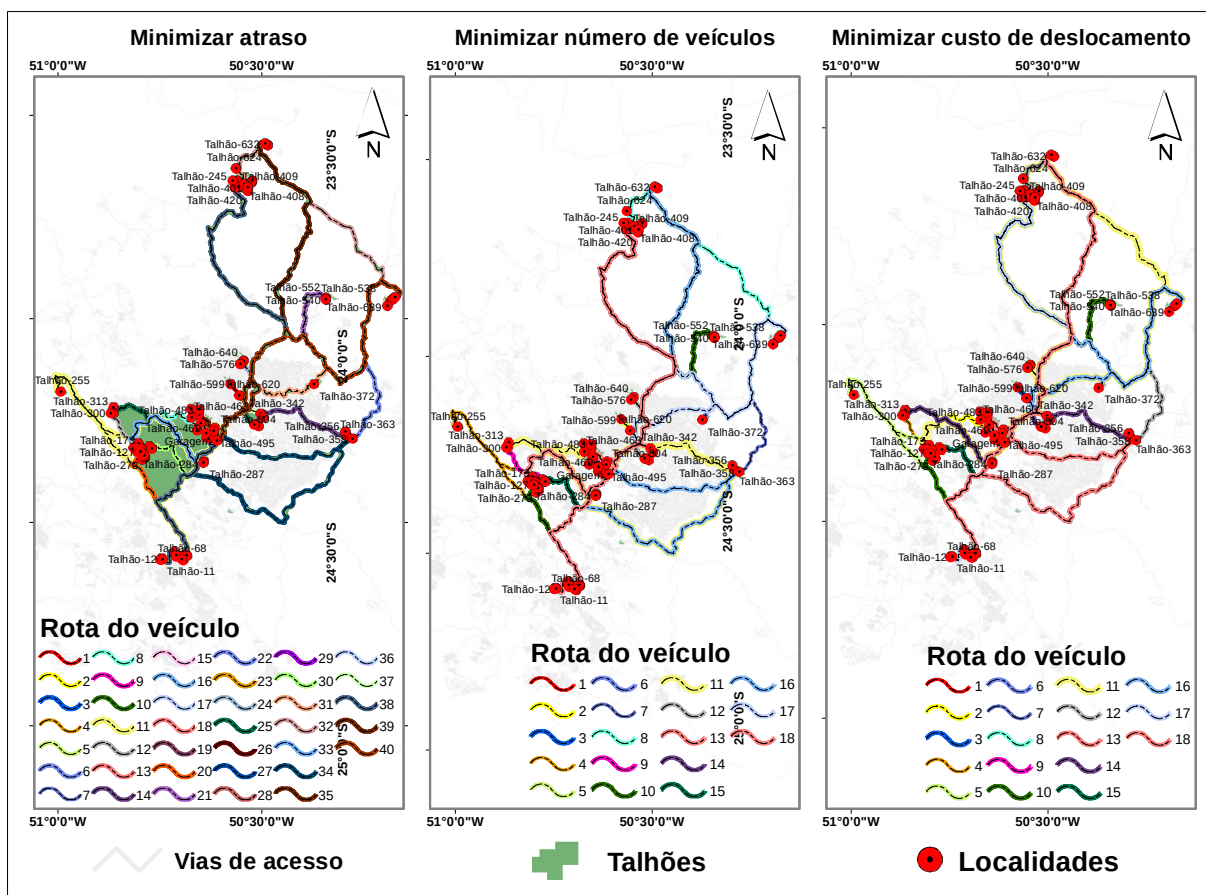


Figura 7: Espacialização do cenário de transporte de 40 máquinas.

Os horários de atendimento de cada talhão, assim como os horários de saída e retorno para a garagem se encontram na Tabela 16. Nota-se que não ocorreram atrasos no transporte das máquinas e no retorno dos veículos prancha para a garagem.

Tabela 16: Horários de atendimento dos talhões para o cenário de transporte de 40 máquinas

		Coleta		Entrega		
Minimizar o atraso						
Tipo / nº do veículo	Origem	Ho. de atendimento	Atraso	Destino	Ho. de atendimento	Atraso
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-52	09:00	00:00	Talhão-174	10:26	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-363	13:00	00:00	Talhão-11	15:30	00:00
2 eixos / nº03	Talhão-28	15:00	00:00	Talhão-25	15:32	00:00
2 eixos / nº04	Talhão-273	08:00	00:00	Talhão-401	11:35	00:00
2 eixos / nº05	Talhão-255	07:23	00:00	Talhão-68	09:13	00:00
2 eixos / nº06	Talhão-313	06:52	00:00	Talhão-130	07:48	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-133	10:00	00:00	Talhão-552	12:49	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-356	07:10	00:00	Talhão-300	09:38	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-523	06:07	00:00	Talhão-192	07:31	00:00

3 eixos / nº04	Talhão-409	08:05	00:00	Talhão-127	11:30	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-186	10:00	00:00	Talhão-624	13:11	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-233	08:04	00:00	Talhão-412	08:43	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-320	11:00	00:00	Talhão-640	12:04	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-538	12:00	00:00	Talhão-251	14:40	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-280	06:52	00:00	Talhão-561	10:10	00:00
3 eixos / nº10	Talhão-173	06:53	00:00	Talhão-495	08:24	00:00
3 eixos / nº11	Talhão-576	10:00	00:00	Talhão-420	12:29	00:00
3 eixos / nº12	Talhão-301	10:00	00:00	Talhão-328	11:45	00:00
3 eixos / nº13	Talhão-12	07:07	00:00	Talhão-448	09:00	00:00
3 eixos / nº14	Talhão-148	09:00	00:00	Talhão-200	09:44	00:00
3 eixos / nº15	Talhão-469	11:00	00:00	Talhão-426	11:42	00:00
3 eixos / nº16	Talhão-463	06:24	00:00	Talhão-56	08:06	00:00
3 eixos / nº17	Talhão-408	12:00	00:00	Talhão-145	15:33	00:00
3 eixos / nº18	Talhão-372	12:00	00:00	Talhão-396	14:33	00:00
3 eixos / nº19	Talhão-569	13:00	00:00	Talhão-565	14:57	00:00
3 eixos / nº20	Talhão-180	06:52	00:00	Talhão-287	08:07	00:00
3 eixos / nº21	Talhão-67	07:00	00:00	Talhão-184	08:18	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-99	13:00	00:00	Talhão-358	15:08	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-632	09:00	00:00	Talhão-342	11:12	00:00
4 eixos / nº03	Talhão-89	06:54	00:00	Talhão-284	08:10	00:00
4 eixos / nº04	Talhão-483	06:23	00:00	Talhão-330	07:28	00:00
4 eixos / nº05	Talhão-245	09:00	00:00	Talhão-10	12:43	00:00
4 eixos / nº06	Talhão-514	06:20	00:00	Talhão-637	06:56	00:00
4 eixos / nº07	Talhão-620	09:00	00:00	Talhão-639	11:37	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-397	08:18	00:00	Talhão-599	11:02	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-86	10:00	00:00	Talhão-93	10:33	00:00
Plataforma / nº03	Talhão-208	06:50	00:00	Talhão-522	08:14	00:00
Plataforma / nº04	Talhão-185	09:00	00:00	Talhão-123	09:41	00:00
Plataforma / nº05	Talhão-100	13:00	00:00	Talhão-540	15:45	00:00
Plataforma / nº06	Talhão-207	10:00	00:00	Talhão-504	11:23	00:00
-	-	-	-	Garagem	17:43	00:00

Minimizar o número de veículos

-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-255	07:23	00:00	Talhão-68	09:13	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-52	10:00	00:00	Talhão-174	11:26	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-363	13:52	00:00	Talhão-11	16:22	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-28	16:00	00:00	Talhão-25	16:32	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-313	06:52	00:00	Talhão-130	07:48	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-273	08:39	00:00	Talhão-401	12:27	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-372	12:38	00:00	Talhão-396	15:11	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-233	08:04	00:00	Talhão-412	08:43	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-280	06:52	00:00	Talhão-561	10:10	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-538	12:39	00:00	Talhão-251	15:19	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-576	10:00	00:00	Talhão-420	12:36	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-180	06:52	00:00	Talhão-287	08:07	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-569	13:25	00:00	Talhão-565	15:22	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-67	07:00	00:00	Talhão-184	08:18	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-301	11:00	00:00	Talhão-328	12:45	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-463	06:24	00:00	Talhão-56	08:06	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-133	11:00	00:00	Talhão-552	13:49	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-356	07:10	00:00	Talhão-300	09:38	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-469	12:00	00:00	Talhão-426	12:42	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-523	06:07	00:00	Talhão-192	07:31	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-148	09:00	00:00	Talhão-200	09:54	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-320	12:00	00:00	Talhão-640	13:04	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-409	09:00	00:00	Talhão-127	12:25	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-12	07:07	00:00	Talhão-448	09:00	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-408	13:00	00:00	Talhão-145	16:33	00:00
3 eixos / nº10	Talhão-186	11:00	00:00	Talhão-624	14:11	00:00

3 eixos / nº10	Talhão-173	06:53	00:00	Talhão-495	08:24	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-99	14:00	00:00	Talhão-358	16:08	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-632	10:00	00:00	Talhão-342	12:12	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-514	06:20	00:00	Talhão-637	06:56	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-89	07:00	00:00	Talhão-284	08:16	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-620	10:00	00:00	Talhão-639	12:37	00:00
4 eixos / nº03	Talhão-483	06:23	00:00	Talhão-330	07:28	00:00
4 eixos / nº03	Talhão-245	09:57	00:00	Talhão-10	13:40	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-86	10:00	00:00	Talhão-93	11:33	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-100	13:17	00:00	Talhão-540	16:02	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-397	08:18	00:00	Talhão-599	11:29	00:00
Plataforma / nº03	Talhão-207	10:52	00:00	Talhão-504	12:15	00:00
Plataforma / nº03	Talhão-208	06:50	00:00	Talhão-522	08:14	00:00
Plataforma / nº03	Talhão-185	09:35	00:00	Talhão-123	10:16	00:00
-	-	-	-	Garagem	18:00	00:00
Minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada						
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-28	16:00	00:00	Talhão-25	16:32	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-313	06:52	00:00	Talhão-130	07:48	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-273	08:31	00:00	Talhão-401	12:06	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-255	07:23	00:00	Talhão-68	09:13	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-52	10:00	00:00	Talhão-174	11:26	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-363	13:52	00:00	Talhão-11	16:22	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-463	06:24	00:00	Talhão-56	08:06	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-320	12:00	00:00	Talhão-640	13:04	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-409	09:00	00:00	Talhão-127	12:25	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-186	11:00	00:00	Talhão-624	14:11	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-67	07:00	00:00	Talhão-184	08:18	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-538	12:39	00:00	Talhão-251	15:19	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-173	06:53	00:00	Talhão-495	08:24	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-523	06:07	00:00	Talhão-192	07:31	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-148	09:10	00:00	Talhão-200	09:54	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-133	11:00	00:00	Talhão-552	13:49	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-576	10:00	00:00	Talhão-420	12:36	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-180	06:52	00:00	Talhão-287	08:07	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-569	13:25	00:00	Talhão-565	15:22	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-280	06:52	00:00	Talhão-561	10:10	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-372	12:38	00:00	Talhão-396	15:11	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-12	07:07	00:00	Talhão-448	09:00	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-469	12:00	00:00	Talhão-426	12:42	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-356	07:10	00:00	Talhão-300	09:38	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-301	11:00	00:00	Talhão-328	12:45	00:00
3 eixos / nº10	Talhão-408	13:00	00:00	Talhão-145	16:33	00:00
3 eixos / nº10	Talhão-233	08:04	00:00	Talhão-412	08:43	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-89	07:00	00:00	Talhão-284	08:16	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-620	10:00	00:00	Talhão-639	12:37	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-245	10:00	00:00	Talhão-10	13:43	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-514	06:20	00:00	Talhão-637	06:56	00:00
4 eixos / nº03	Talhão-99	14:00	00:00	Talhão-358	16:08	00:00
4 eixos / nº03	Talhão-632	10:00	00:00	Talhão-342	12:12	00:00
4 eixos / nº03	Talhão-483	06:23	00:00	Talhão-330	07:28	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-86	11:00	00:00	Talhão-93	11:33	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-208	06:50	00:00	Talhão-522	08:14	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-100	13:17	00:00	Talhão-540	16:02	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-185	09:00	00:00	Talhão-123	09:41	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-207	11:00	00:00	Talhão-504	12:23	00:00
Plataforma / nº03	Talhão-397	08:18	00:00	Talhão-599	11:02	00:00
-	-	-	-	Garagem	18:00	00:00

Ho.: Horário

Na situação em que foram utilizados somente os veículos que a empresa possui, foi recalculado o atraso utilizando apenas os 15 veículos prancha. Posteriormente, o atraso foi somado ao valor superior da janela de tempo, para tornar o modelo viável, no qual ocorreu um atraso total de 9,85 horas. Em seguida, foi minimizada a distância ponderada pela qualidade da estrada do problema que foi de 2.294,927 km. Nota-se que ao aceitar atrasar a coleta de uma máquina, ocorreu uma redução da distância ponderada pela qualidade da estrada de 46 km. Nesse caso, é possível o gestor fazer uma análise econômica e verificar se essa redução em distância acrescida do custo de aquisição ou fretamento de um veículo prancha extra é menor que os custos fixos dos períodos de atrasos que incidem nas máquinas florestais de alto valor de aquisição. Equalizando esses custos, é possível o gestor tomar uma decisão do ponto de vista econômico mais viável para a empresa. Por outro lado, saber o número mínimo de veículos pranchas para realizar o transporte das máquinas sem atrasos é importante do ponto de vista técnico em situações em que a empresa precise atender uma alta demanda da empresa. Nesse contexto, o atraso na entrega da matéria-prima na indústria pode ocasionar maiores perdas econômicas na indústria e/ou impactar a credibilidade da empresa no quesito de honrar os compromissos de entregar produtos a seus clientes no tempo acordado. As rotas para cada objetivo podem ser visualizadas na Tabela 17 e Figura 8.

Tabela 17: Rotas dos veículos prancha para o cenário de transporte de 40 máquinas considerando os 15 veículos que a empresa tem disponível

Tipo / nº do veículo	Rota
	Minimizar o atraso
Plataforma / nº01	Garagem → Talhão-208 → Talhão-522 → Talhão-185 → Talhão-123 → Talhão-207 → Talhão-504 → Talhão-100 → Talhão-540 → Garagem
Plataforma / nº02	Garagem → Talhão-397 → Talhão-599 → Talhão-86 → Talhão-93 → Garagem
2 eixos / nº01	Garagem → Talhão-255 → Talhão-68 → Talhão-52 → Talhão-174 → Talhão-363 → Talhão-11 → Garagem
2 eixos / nº02	Garagem → Talhão-313 → Talhão-130 → Talhão-273 → Talhão-401 → Talhão-28 → Talhão-25 → Garagem
3 eixos / nº01	Garagem → Talhão-280 → Talhão-561 → Talhão-408 → Talhão-145 → Garagem
3 eixos / nº02	Garagem → Talhão-180 → Talhão-287 → Talhão-576 → Talhão-420 → Talhão-569 → Talhão-565 → Garagem
3 eixos / nº03	Garagem → Talhão-233 → Talhão-412 → Talhão-409 → Talhão-127 → Garagem
3 eixos / nº04	Garagem → Talhão-356 → Talhão-300 → Talhão-538 → Talhão-251 → Garagem

3 eixos / nº05	Garagem → Talhão-67 → Talhão-184 → Talhão-320 → Talhão-640 → Garagem
3 eixos / nº06	Garagem → Talhão-523 → Talhão-192 → Talhão-148 → Talhão-200 → Talhão-133 → Talhão-552 → Garagem
3 eixos / nº07	Garagem → Talhão-12 → Talhão-448 → Talhão-469 → Talhão-426 → Garagem
3 eixos / nº08	Garagem → Talhão-173 → Talhão-495 → Talhão-186 → Talhão-624 → Garagem
3 eixos / nº09	Garagem → Talhão-463 → Talhão-56 → Talhão-301 → Talhão-328 → Talhão-372 → Talhão-396 → Garagem
4 eixos / nº01	Garagem → Talhão-89 → Talhão-284 → Talhão-620 → Talhão-639 → Talhão-245 → Talhão-10 → Garagem
4 eixos / nº02	Garagem → Talhão-514 → Talhão-637 → Talhão-483 → Talhão-330 → Talhão-632 → Talhão-342 → Talhão-99 → Talhão-358 → Garagem
Minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada	
Plataforma / nº01	Garagem → Talhão-397 → Talhão-599 → Talhão-86 → Talhão-93 → Garagem
Plataforma / nº02	Garagem → Talhão-208 → Talhão-522 → Talhão-185 → Talhão-123 → Talhão-207 → Talhão-504 → Talhão-100 → Talhão-540 → Garagem
2 eixos / nº01	Garagem → Talhão-313 → Talhão-130 → Talhão-273 → Talhão-401 → Talhão-28 → Talhão-25 → Garagem
2 eixos / nº02	Garagem → Talhão-255 → Talhão-68 → Talhão-52 → Talhão-174 → Talhão- 363 → Talhão-11 → Garagem
3 eixos / nº01	Garagem → Talhão-356 → Talhão-300 → Talhão-186 → Talhão-624 → Garagem
3 eixos / nº02	Garagem → Talhão-523 → Talhão-192 → Talhão-301 → Talhão-328 → Talhão-372 → Talhão-396 → Garagem
3 eixos / nº03	Garagem → Talhão-233 → Talhão-412 → Talhão-409 → Talhão-127 → Garagem
3 eixos / nº04	Garagem → Talhão-12 → Talhão-448 → Talhão-469 → Talhão-426 → Garagem
3 eixos / nº05	Garagem → Talhão-67 → Talhão-184 → Talhão-148 → Talhão-200 → Talhão-133 → Talhão-552 → Garagem
3 eixos / nº06	Garagem → Talhão-180 → Talhão-287 → Talhão-576 → Talhão-420 → Talhão-569 → Talhão-565 → Garagem
3 eixos / nº07	Garagem → Talhão-463 → Talhão-56 → Talhão-320 → Talhão-640 → Garagem
3 eixos / nº08	Garagem → Talhão-173 → Talhão-495 → Talhão-538 → Talhão-251 → Garagem
3 eixos / nº09	Garagem → Talhão-280 → Talhão-561 → Talhão-408 → Talhão-145 → Garagem
4 eixos / nº01	Garagem → Talhão-89 → Talhão-284 → Talhão-620 → Talhão-639 → Talhão-245 → Talhão-10 → Garagem
4 eixos / nº02	Garagem → Talhão-514 → Talhão-637 → Talhão-483 → Talhão-330 → Talhão-632 → Talhão-342 → Talhão-99 → Talhão-358 → Garagem

→ Veículo prancha vazio

→ Veículo prancha carregado

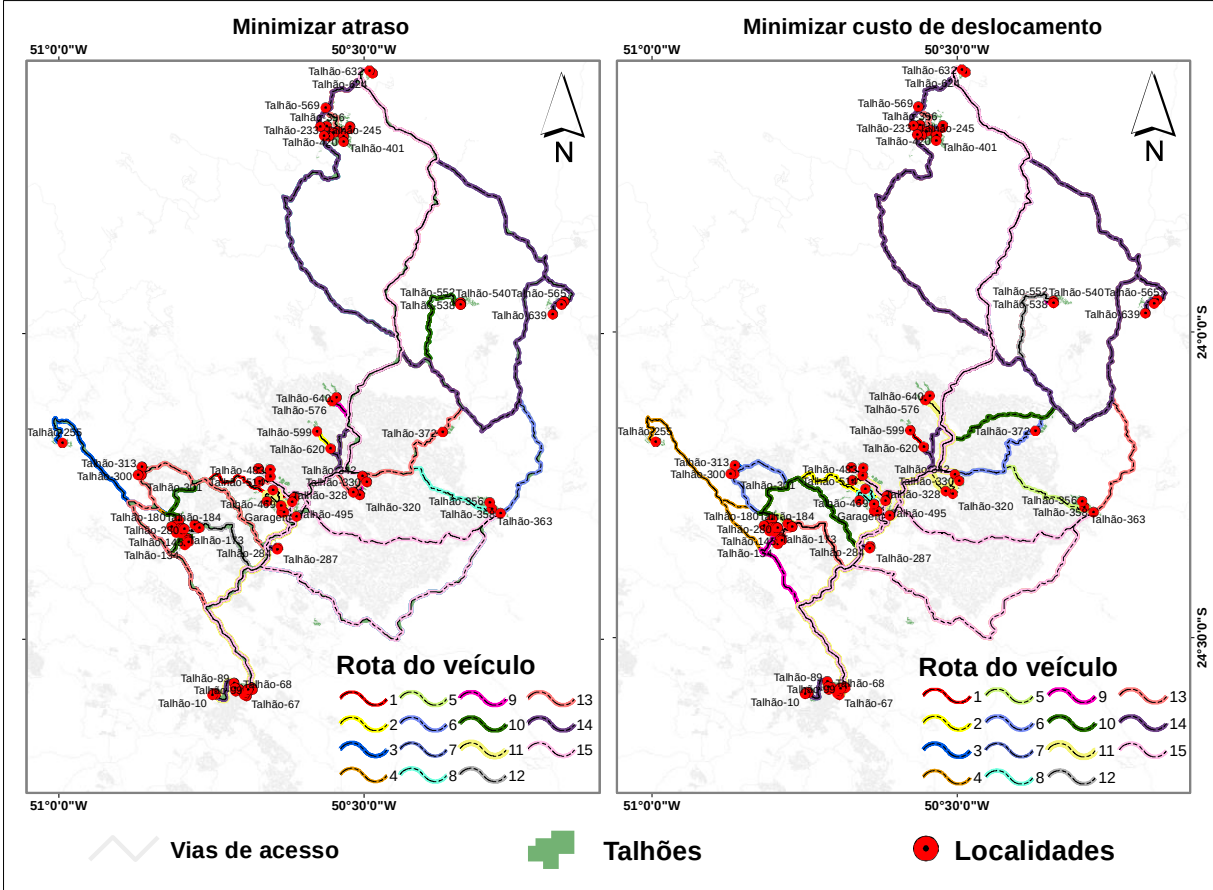


Figura 8: Espacialização do cenário de transporte de 40 máquinas considerando somente os 15 veículos que a empresa possui.

Os horários de atendimento de cada talhão, assim como os horários de saída e retorno à garagem se encontram na Tabela 18. Nota-se que a redução de veículos provocou atrasos em alguns talhões e no horário de retorno dos veículos prancha para a garagem. Os talhões que sofreram atrasos foram: Talhão-86, Talhão-372, Talhão-409, Talhão-99, Talhão-632, Talhão-483, Talhão-245 e a garagem de destino. O Talhão-245 foi o que teve mais atrasos, de aproximadamente 4 horas.

Tabela 18: Horários de atendimento dos talhões para o cenário de transporte de 40 máquinas considerando os 15 veículos que a empresa tem disponível

Tipo / nº do veículo	Origem	Coleta		Entrega		
		Minimizar o atraso				
		Ho. de atendimento	Atraso	Destino	Ho. de atendimento	Atraso
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-255	07:23	00:00	Talhão-68	09:13	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-52	09:49	00:00	Talhão-174	11:15	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-363	13:32	00:00	Talhão-11	16:02	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-28	16:00	00:00	Talhão-25	18:00	00:00

2 eixos / nº02	Talhão-313	06:52	00:00	Talhão-130	07:48	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-273	08:31	00:00	Talhão-401	12:06	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-280	06:52	00:00	Talhão-561	10:10	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-408	13:00	00:00	Talhão-145	18:00	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-576	10:00	00:00	Talhão-420	12:29	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-180	06:52	00:00	Talhão-287	08:07	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-569	14:00	00:00	Talhão-565	15:57	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-409	09:25	00:25	Talhão-127	14:59	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-233	08:04	00:00	Talhão-412	08:43	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-356	07:10	00:00	Talhão-300	09:38	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-538	13:00	00:00	Talhão-251	15:40	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-67	07:00	00:00	Talhão-184	08:18	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-320	11:00	00:00	Talhão-640	12:04	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-523	06:07	00:00	Talhão-192	07:31	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-148	09:00	00:00	Talhão-200	09:44	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-133	11:00	00:00	Talhão-552	13:49	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-12	07:07	00:00	Talhão-448	09:00	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-469	11:00	00:00	Talhão-426	11:42	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-186	10:00	00:00	Talhão-624	13:11	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-173	06:53	00:00	Talhão-495	08:24	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-372	13:01	00:01	Talhão-396	16:15	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-463	06:24	00:00	Talhão-56	08:06	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-301	10:00	00:00	Talhão-328	11:45	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-89	06:54	00:00	Talhão-284	08:10	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-245	14:03	04:03	Talhão-10	17:46	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-620	09:16	00:00	Talhão-639	11:53	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-99	14:42	00:42	Talhão-358	16:50	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-632	10:52	00:52	Talhão-342	13:04	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-483	07:32	00:32	Talhão-330	08:37	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-514	06:20	00:00	Talhão-637	06:56	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-208	06:50	00:00	Talhão-522	08:14	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-185	09:35	00:00	Talhão-123	10:16	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-100	13:42	00:00	Talhão-540	17:26	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-207	10:52	00:00	Talhão-504	12:15	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-397	08:18	00:00	Talhão-599	11:02	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-86	12:52	01:52	Talhão-93	13:25	00:00
-	-	-	-	Garagem	19:24	01:24
Minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada						
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-28	16:00	00:00	Talhão-25	16:32	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-313	06:52	00:00	Talhão-130	07:48	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-273	08:31	00:00	Talhão-401	12:06	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-255	07:23	00:00	Talhão-68	09:13	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-52	10:00	00:00	Talhão-174	11:26	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-363	14:00	00:00	Talhão-11	16:30	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-356	07:10	00:00	Talhão-300	09:38	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-186	11:00	00:00	Talhão-624	14:11	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-372	13:01	00:01	Talhão-396	15:34	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-523	06:07	00:00	Talhão-192	07:31	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-301	10:00	00:00	Talhão-328	11:45	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-409	09:25	00:25	Talhão-127	12:50	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-233	08:04	00:00	Talhão-412	08:43	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-12	07:07	00:00	Talhão-448	09:00	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-469	12:00	00:00	Talhão-426	12:42	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-67	07:00	00:00	Talhão-184	08:18	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-148	09:00	00:00	Talhão-200	09:44	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-133	11:00	00:00	Talhão-552	13:49	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-576	10:16	00:00	Talhão-420	13:11	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-180	06:52	00:00	Talhão-287	08:07	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-569	14:00	00:00	Talhão-565	15:57	00:00

3 eixos / nº07	Talhão-463	06:24	00:00	Talhão-56	08:06	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-320	12:00	00:00	Talhão-640	13:04	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-538	13:00	00:00	Talhão-251	15:40	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-173	06:53	00:00	Talhão-495	08:24	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-280	07:00	00:00	Talhão-561	10:18	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-408	13:00	00:00	Talhão-145	16:33	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-89	06:54	00:00	Talhão-284	08:10	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-245	14:03	04:03	Talhão-10	17:46	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-620	09:16	00:00	Talhão-639	11:53	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-99	14:42	00:42	Talhão-358	16:50	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-632	10:52	00:52	Talhão-342	13:04	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-483	07:32	00:32	Talhão-330	08:37	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-514	06:20	00:00	Talhão-637	06:56	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-397	08:18	00:00	Talhão-599	11:02	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-86	12:52	01:52	Talhão-93	13:25	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-208	06:50	00:00	Talhão-522	08:14	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-185	09:35	00:00	Talhão-123	10:16	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-100	14:00	00:00	Talhão-540	16:45	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-207	11:00	00:00	Talhão-504	12:23	00:00
-	-	-	-	Garagem	19:24	01:24

Ho.: Horário

6.4 CENÁRIO 4

No cenário 4, foi avaliada a robustez do modelo para solucionar problemas de grande porte (60 máquinas por dia), que não ocorre atualmente na empresa, mas pode ser realidade em outras empresas do setor. Foi realizada primeiro a minimização do atraso, considerando um veículo prancha para o transporte de cada máquina. A função objetivo foi igual a 27 minutos e o número de veículos igual a 60. A próxima etapa foi minimizar o número de veículos prancha utilizados, do qual foi obtido um valor mínimo de 31. As rotas para cada objetivo podem ser visualizadas na Tabela 19 e Figura 9.

Tabela 19: Rotas dos veículos prancha para o cenário de transporte de 60 máquinas

Tipo / nº do veículo	Rota
Minimizar o atraso	
2 eixos / nº01	Garagem → Talhão-24 → Talhão-468 → Garagem
2 eixos / nº02	Garagem → Talhão-524 → Talhão-21 → Garagem
2 eixos / nº03	Garagem → Talhão-306 → Talhão-229 → Garagem
2 eixos / nº04	Garagem → Talhão-206 → Talhão-248 → Garagem
2 eixos / nº05	Garagem → Talhão-410 → Talhão-296 → Garagem
2 eixos / nº06	Garagem → Talhão-553 → Talhão-72 → Garagem
2 eixos / nº07	Garagem → Talhão-453 → Talhão-363 → Garagem
2 eixos / nº08	Garagem → Talhão-474 → Talhão-52 → Garagem
2 eixos / nº09	Garagem → Talhão-372 → Talhão-463 → Garagem
2 eixos / nº10	Garagem → Talhão-588 → Talhão-35 → Garagem
2 eixos / nº11	Garagem → Talhão-104 → Talhão-67 → Garagem
2 eixos / nº12	Garagem → Talhão-142 → Talhão-409 → Garagem

2 eixos / nº13	Garagem → Talhão-579 → Talhão-478 → Garagem
2 eixos / nº14	Garagem → Talhão-533 → Talhão-371 → Garagem
2 eixos / nº15	Garagem → Talhão-119 → Talhão-315 → Garagem
3 eixos / nº01	Garagem → Talhão-51 → Talhão-82 → Garagem
3 eixos / nº02	Garagem → Talhão-486 → Talhão-238 → Garagem
3 eixos / nº03	Garagem → Talhão-586 → Talhão-199 → Garagem
3 eixos / nº04	Garagem → Talhão-69 → Talhão-555 → Garagem
3 eixos / nº05	Garagem → Talhão-211 → Talhão-471 → Garagem
3 eixos / nº06	Garagem → Talhão-345 → Talhão-589 → Garagem
3 eixos / nº07	Garagem → Talhão-130 → Talhão-230 → Garagem
3 eixos / nº08	Garagem → Talhão-102 → Talhão-94 → Garagem
3 eixos / nº09	Garagem → Talhão-28 → Talhão-172 → Garagem
3 eixos / nº10	Garagem → Talhão-329 → Talhão-16 → Garagem
3 eixos / nº11	Garagem → Talhão-398 → Talhão-169 → Garagem
3 eixos / nº12	Garagem → Talhão-594 → Talhão-12 → Garagem
3 eixos / nº13	Garagem → Talhão-88 → Talhão-73 → Garagem
3 eixos / nº14	Garagem → Talhão-143 → Talhão-480 → Garagem
3 eixos / nº15	Garagem → Talhão-90 → Talhão-357 → Garagem
4 eixos / nº01	Garagem → Talhão-395 → Talhão-457 → Garagem
4 eixos / nº02	Garagem → Talhão-251 → Talhão-239 → Garagem
4 eixos / nº03	Garagem → Talhão-240 → Talhão-293 → Garagem
4 eixos / nº04	Garagem → Talhão-109 → Talhão-86 → Garagem
4 eixos / nº05	Garagem → Talhão-18 → Talhão-233 → Garagem
4 eixos / nº06	Garagem → Talhão-434 → Talhão-443 → Garagem
4 eixos / nº07	Garagem → Talhão-563 → Talhão-408 → Garagem
4 eixos / nº08	Garagem → Talhão-162 → Talhão-367 → Garagem
4 eixos / nº09	Garagem → Talhão-170 → Talhão-350 → Garagem
4 eixos / nº10	Garagem → Talhão-369 → Talhão-390 → Garagem
4 eixos / nº11	Garagem → Talhão-144 → Talhão-328 → Garagem
4 eixos / nº12	Garagem → Talhão-108 → Talhão-175 → Garagem
4 eixos / nº13	Garagem → Talhão-184 → Talhão-528 → Garagem
4 eixos / nº14	Garagem → Talhão-217 → Talhão-566 → Garagem
4 eixos / nº15	Garagem → Talhão-95 → Talhão-158 → Garagem
Plataforma / nº01	Garagem → Talhão-562 → Talhão-20 → Garagem
Plataforma / nº02	Garagem → Talhão-38 → Talhão-245 → Garagem
Plataforma / nº03	Garagem → Talhão-449 → Talhão-407 → Garagem
Plataforma / nº04	Garagem → Talhão-393 → Talhão-297 → Garagem
Plataforma / nº05	Garagem → Talhão-317 → Talhão-354 → Garagem
Plataforma / nº06	Garagem → Talhão-617 → Talhão-178 → Garagem
Plataforma / nº07	Garagem → Talhão-118 → Talhão-543 → Garagem
Plataforma / nº08	Garagem → Talhão-400 → Talhão-228 → Garagem
Plataforma / nº09	Garagem → Talhão-378 → Talhão-572 → Garagem
Plataforma / nº10	Garagem → Talhão-218 → Talhão-541 → Garagem
Plataforma / nº11	Garagem → Talhão-278 → Talhão-302 → Garagem
Plataforma / nº12	Garagem → Talhão-631 → Talhão-321 → Garagem
Plataforma / nº13	Garagem → Talhão-355 → Talhão-257 → Garagem
Plataforma / nº14	Garagem → Talhão-92 → Talhão-610 → Garagem
Plataforma / nº15	Garagem → Talhão-45 → Talhão-259 → Garagem
Minimizar o número de veículos	
2 eixos / nº01	Garagem → Talhão-533 → Talhão-371 → Talhão-372 → Talhão-463 → Talhão-553 → Talhão-72 → Garagem
2 eixos / nº02	Garagem → Talhão-474 → Talhão-52 → Talhão-588 → Talhão-35 → Garagem
2 eixos / nº03	Garagem → Talhão-142 → Talhão-409 → Talhão-410 → Talhão-296 → Garagem
2 eixos / nº04	Garagem → Talhão-306 → Talhão-229 → Garagem
2 eixos / nº05	Garagem → Talhão-24 → Talhão-468 → Talhão-119 → Talhão-315 → Talhão-104 → Talhão-67 → Garagem
2 eixos / nº06	Garagem → Talhão-206 → Talhão-248 → Garagem

2 eixos / nº07	Garagem → Talhão-453 → Talhão-363 → Talhão-524 → Talhão-21 → Garagem
2 eixos / nº08	Garagem → Talhão-579 → Talhão-478 → Garagem
3 eixos / nº01	Garagem → Talhão-586 → Talhão-199 → Talhão-51 → Talhão-82 → Garagem
3 eixos / nº02	Garagem → Talhão-211 → Talhão-471 → Talhão-88 → Talhão-73 → Talhão-90 → Talhão-357 → Garagem
3 eixos / nº03	Garagem → Talhão-398 → Talhão-169 → Garagem
3 eixos / nº04	Garagem → Talhão-329 → Talhão-16 → Talhão-130 → Talhão-230 → Garagem
3 eixos / nº05	Garagem → Talhão-486 → Talhão-238 → Talhão-28 → Talhão-172 → Talhão-102 → Talhão-94 → Garagem
3 eixos / nº06	Garagem → Talhão-345 → Talhão-589 → Talhão-143 → Talhão-480 → Garagem
3 eixos / nº07	Garagem → Talhão-594 → Talhão-12 → Talhão-69 → Talhão-555 → Garagem
4 eixos / nº01	Garagem → Talhão-563 → Talhão-408 → Talhão-95 → Talhão-158 → Garagem
4 eixos / nº02	Garagem → Talhão-184 → Talhão-528 → Talhão-170 → Talhão-350 → Garagem
4 eixos / nº03	Garagem → Talhão-18 → Talhão-233 → Garagem
4 eixos / nº04	Garagem → Talhão-240 → Talhão-293 → Talhão-395 → Talhão-457 → Garagem
4 eixos / nº05	Garagem → Talhão-434 → Talhão-443 → Talhão-217 → Talhão-566 → Talhão-162 → Talhão-367 → Garagem
4 eixos / nº06	Garagem → Talhão-108 → Talhão-175 → Garagem
4 eixos / nº07	Garagem → Talhão-369 → Talhão-390 → Talhão-144 → Talhão-328 → Garagem
4 eixos / nº08	Garagem → Talhão-109 → Talhão-86 → Talhão-251 → Talhão-239 → Garagem
Plataforma / nº01	Garagem → Talhão-617 → Talhão-178 → Talhão-562 → Talhão-20 → Garagem
Plataforma / nº02	Garagem → Talhão-118 → Talhão-543 → Talhão-355 → Talhão-257 → Garagem
Plataforma / nº03	Garagem → Talhão-631 → Talhão-321 → Garagem
Plataforma / nº04	Garagem → Talhão-378 → Talhão-572 → Talhão-393 → Talhão-297 → Garagem
Plataforma / nº05	Garagem → Talhão-278 → Talhão-302 → Talhão-92 → Talhão-610 → Garagem
Plataforma / nº06	Garagem → Talhão-38 → Talhão-245 → Garagem
Plataforma / nº07	Garagem → Talhão-317 → Talhão-354 → Talhão-400 → Talhão-228 → Garagem
Plataforma / nº08	Garagem → Talhão-218 → Talhão-541 → Talhão-449 → Talhão-407 → Talhão-45 → Talhão-259 → Garagem
Minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada	
2 eixos / nº01	Garagem → Talhão-533 → Talhão-371 → Talhão-588 → Talhão-35 → Garagem
2 eixos / nº02	Garagem → Talhão-474 → Talhão-52 → Talhão-410 → Talhão-296 → Garagem
2 eixos / nº03	Garagem → Talhão-142 → Talhão-409 → Garagem
2 eixos / nº04	Garagem → Talhão-306 → Talhão-229 → Garagem
2 eixos / nº05	Garagem → Talhão-24 → Talhão-468 → Talhão-119 → Talhão-315 → Garagem
2 eixos / nº06	Garagem → Talhão-206 → Talhão-248 → Talhão-524 → Talhão-21 → Garagem
2 eixos / nº07	Garagem → Talhão-453 → Talhão-363 → Talhão-372 → Talhão-463 → Talhão-553 → Talhão-72 → Garagem
2 eixos / nº08	Garagem → Talhão-579 → Talhão-478 → Talhão-104 → Talhão-67 → Garagem

3 eixos / nº01	Garagem → Talhão-586 → Talhão-199 → Talhão-130 → Talhão-230 → Garagem
3 eixos / nº02	Garagem → Talhão-211 → Talhão-471 → Talhão-51 → Talhão-82 → Garagem
3 eixos / nº03	Garagem → Talhão-88 → Talhão-73 → Talhão-90 → Talhão-357 → Garagem
3 eixos / nº04	Garagem → Talhão-329 → Talhão-16 → Talhão-398 → Talhão-169 → Garagem
3 eixos / nº05	Garagem → Talhão-486 → Talhão-238 → Talhão-69 → Talhão-555 → Garagem
3 eixos / nº06	Garagem → Talhão-345 → Talhão-589 → Talhão-143 → Talhão-480 → Garagem
3 eixos / nº07	Garagem → Talhão-594 → Talhão-12 → Talhão-28 → Talhão-172 → Talhão- 102 → Talhão-94 → Garagem
4 eixos / nº01	Garagem → Talhão-563 → Talhão-408 → Talhão-95 → Talhão-158 → Talhão-162 → Talhão-367 → Garagem
4 eixos / nº02	Garagem → Talhão-184 → Talhão-528 → Talhão-217 → Talhão-566 → Talhão-144 → Talhão-328 → Garagem
4 eixos / nº03	Garagem → Talhão-18 → Talhão-233 → Talhão-251 → Talhão-239 → Garagem
4 eixos / nº04	Garagem → Talhão-240 → Talhão-293 → Garagem
4 eixos / nº05	Garagem → Talhão-434 → Talhão-443 → Talhão-170 → Talhão-350 → Talhão-395 → Talhão-457 → Garagem
4 eixos / nº06	Garagem → Talhão-108 → Talhão-175 → Garagem
4 eixos / nº07	Garagem → Talhão-369 → Talhão-390 → Garagem
4 eixos / nº08	Garagem → Talhão-109 → Talhão-86 → Garagem
Plataforma / nº01	Garagem → Talhão-617 → Talhão-178 → Talhão-449 → Talhão-407 → Garagem
Plataforma / nº02	Garagem → Talhão-118 → Talhão-543 → Talhão-45 → Talhão-259 → Garagem
Plataforma / nº03	Garagem → Talhão-631 → Talhão-321 → Garagem
Plataforma / nº04	Garagem → Talhão-378 → Talhão-572 → Garagem
Plataforma / nº05	Garagem → Talhão-278 → Talhão-302 → Talhão-355 → Talhão-257 → Garagem
Plataforma / nº06	Garagem → Talhão-38 → Talhão-245 → Talhão-400 → Talhão-228 → Garagem
Plataforma / nº07	Garagem → Talhão-317 → Talhão-354 → Talhão-92 → Talhão-610 → Garagem
Plataforma / nº08	Garagem → Talhão-218 → Talhão-541 → Talhão-562 → Talhão-20 → Talhão-393 → Talhão-297 → Garagem

→ Veículo prancha vazio

→ Veículo prancha carregado

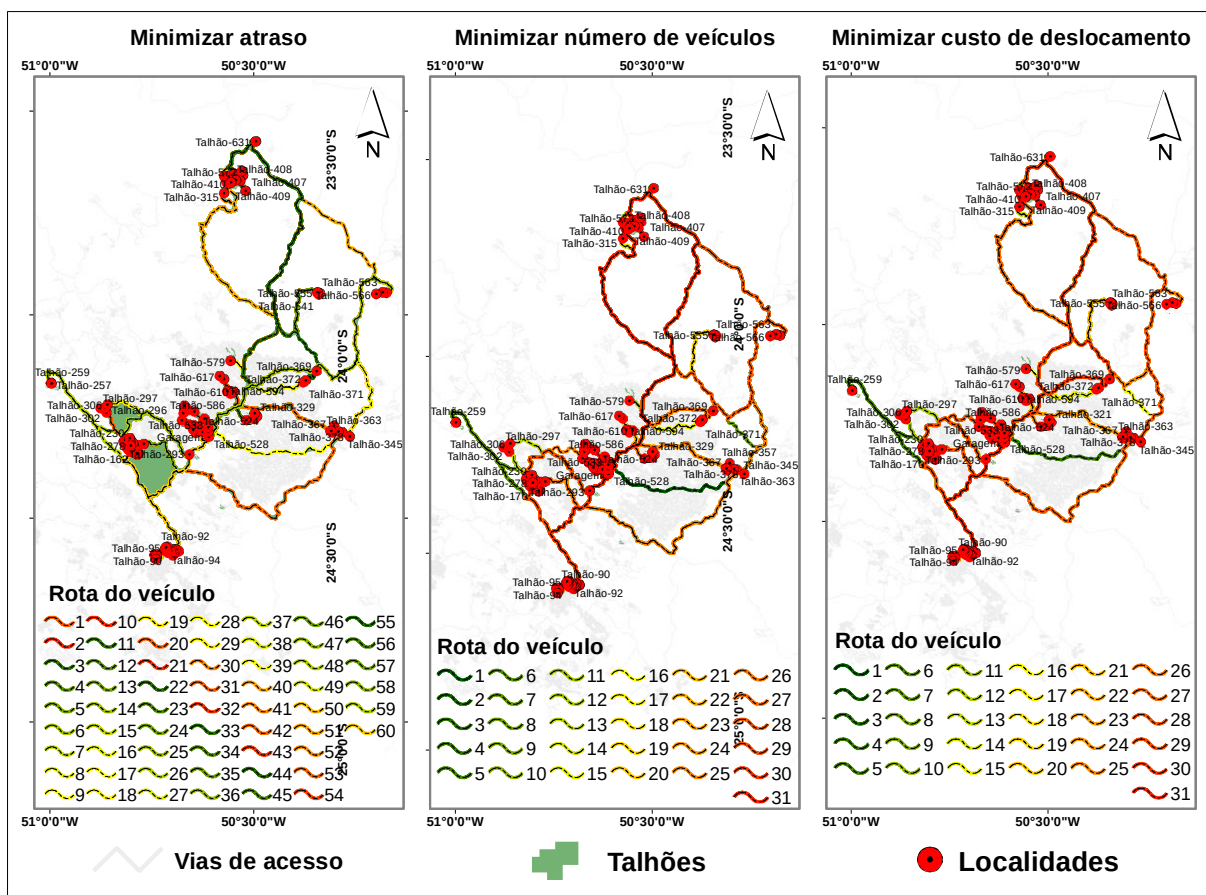


Figura 9: Espacialização do cenário de transporte de 60 máquinas.

Os horários de atendimento de cada talhão, assim como os horários de saída e retorno à garagem se encontram na Tabela 20. Nota-se que ocorreram atrasos somente no retorno à garagem. Nesse caso, os veículos pranchas que tiveram atrasos retornaram à garagem no dia seguinte, já que a legislação de trânsito brasileira não permite que veículos longos se locomovam à noite.

Tabela 20: Horários de atendimento dos talhões para o cenário de transporte de 60 máquinas

		Coleta		Entrega		
Minimizar o atraso						
Tipo / nº do veículo	Origem	Ho. de atendimento	Atraso	Destino	Ho. de atendimento	Atraso
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-24	06:48	00:00	Talhão-468	08:22	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-524	10:00	00:00	Talhão-21	10:50	00:00
2 eixos / nº03	Talhão-306	06:51	00:00	Talhão-229	08:44	00:00
2 eixos / nº04	Talhão-206	06:52	00:00	Talhão-248	08:14	00:00
2 eixos / nº05	Talhão-410	11:30	00:00	Talhão-296	14:59	00:00
2 eixos / nº06	Talhão-553	11:30	00:00	Talhão-72	13:30	00:00
2 eixos / nº07	Talhão-453	06:11	00:00	Talhão-363	08:11	00:00
2 eixos / nº08	Talhão-474	06:12	00:00	Talhão-52	09:14	00:00
2 eixos / nº09	Talhão-372	09:30	00:00	Talhão-463	10:58	00:00

2 eixos / nº10	Talhão-588	12:00	00:00	Talhão-35	12:33	00:00
2 eixos / nº11	Talhão-104	13:00	00:00	Talhão-67	14:28	00:00
2 eixos / nº12	Talhão-142	06:54	00:00	Talhão-409	10:28	00:00
2 eixos / nº13	Talhão-579	06:36	00:00	Talhão-478	08:46	00:00
2 eixos / nº14	Talhão-533	06:09	00:00	Talhão-371	07:48	00:00
2 eixos / nº15	Talhão-119	10:30	00:00	Talhão-315	11:15	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-51	09:30	00:00	Talhão-82	11:17	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-486	06:20	00:00	Talhão-238	07:24	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-586	06:24	00:00	Talhão-199	08:12	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-69	09:00	00:00	Talhão-555	12:27	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-211	06:55	00:00	Talhão-471	08:40	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-345	07:12	00:00	Talhão-589	09:31	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-130	10:00	00:00	Talhão-230	13:23	00:00
3 eixos / nº08	Talhão-102	10:30	00:00	Talhão-94	12:01	00:00
3 eixos / nº09	Talhão-28	09:30	00:00	Talhão-172	10:04	00:00
3 eixos / nº10	Talhão-329	06:24	00:00	Talhão-16	07:44	00:00
3 eixos / nº11	Talhão-398	10:30	00:00	Talhão-169	14:05	00:00
3 eixos / nº12	Talhão-594	06:32	00:00	Talhão-12	07:46	00:00
3 eixos / nº13	Talhão-88	09:30	00:00	Talhão-73	10:03	00:00
3 eixos / nº14	Talhão-143	11:30	00:00	Talhão-480	12:45	00:00
3 eixos / nº15	Talhão-90	10:00	00:00	Talhão-357	11:48	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-395	13:30	00:00	Talhão-457	17:07	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-251	12:00	00:00	Talhão-239	14:52	00:00
4 eixos / nº03	Talhão-240	08:05	00:00	Talhão-293	10:27	00:00
4 eixos / nº04	Talhão-109	06:55	00:00	Talhão-86	10:21	00:00
4 eixos / nº05	Talhão-18	07:07	00:00	Talhão-233	10:47	00:00
4 eixos / nº06	Talhão-434	06:18	00:00	Talhão-443	07:02	00:00
4 eixos / nº07	Talhão-563	08:09	00:00	Talhão-408	09:58	00:00
4 eixos / nº08	Talhão-162	13:30	00:00	Talhão-367	14:52	00:00
4 eixos / nº09	Talhão-170	08:30	00:00	Talhão-350	11:54	00:00
4 eixos / nº10	Talhão-369	07:07	00:00	Talhão-390	08:30	00:00
4 eixos / nº11	Talhão-144	11:30	00:00	Talhão-328	12:56	00:00
4 eixos / nº12	Talhão-108	06:53	00:00	Talhão-175	08:41	00:00
4 eixos / nº13	Talhão-184	06:45	00:00	Talhão-528	07:27	00:00
4 eixos / nº14	Talhão-217	08:30	00:00	Talhão-566	09:58	00:00
4 eixos / nº15	Talhão-95	12:30	00:00	Talhão-158	13:54	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-562	10:00	00:00	Talhão-20	10:39	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-38	07:06	00:00	Talhão-245	08:38	00:00
Plataforma / nº03	Talhão-449	08:30	00:00	Talhão-407	09:59	00:00
Plataforma / nº04	Talhão-393	13:00	00:00	Talhão-297	16:27	00:00
Plataforma / nº05	Talhão-317	06:30	00:00	Talhão-354	08:32	00:00
Plataforma / nº06	Talhão-617	06:34	00:00	Talhão-178	07:39	00:00
Plataforma / nº07	Talhão-118	06:50	00:00	Talhão-543	08:02	00:00
Plataforma / nº08	Talhão-400	12:00	00:00	Talhão-228	14:28	00:00
Plataforma / nº09	Talhão-378	07:15	00:00	Talhão-572	09:30	00:00
Plataforma / nº10	Talhão-218	06:50	00:00	Talhão-541	07:28	00:00
Plataforma / nº11	Talhão-278	06:51	00:00	Talhão-302	07:33	00:00
Plataforma / nº12	Talhão-631	07:54	00:00	Talhão-321	11:08	00:00
Plataforma / nº13	Talhão-355	09:30	00:00	Talhão-257	11:15	00:00
Plataforma / nº14	Talhão-92	08:30	00:00	Talhão-610	10:17	00:00
Plataforma / nº15	Talhão-45	14:00	00:00	Talhão-259	15:28	00:00
-	-	-	-	Garagem	18:27	00:27
Minimizar o número de veículos						
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-533	06:09	00:00	Talhão-371	07:48	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-553	12:30	00:00	Talhão-72	14:30	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-372	09:30	00:00	Talhão-463	11:12	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-588	13:00	00:00	Talhão-35	13:33	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-474	06:12	00:00	Talhão-52	09:14	00:00
2 eixos / nº03	Talhão-410	12:30	00:00	Talhão-296	15:59	00:00

2 eixos / nº03	Talhão-142	06:54	00:00	Talhão-409	10:28	00:00
2 eixos / nº04	Talhão-306	06:51	00:00	Talhão-229	08:44	00:00
2 eixos / nº05	Talhão-119	10:30	00:00	Talhão-315	11:15	00:00
2 eixos / nº05	Talhão-24	06:48	00:00	Talhão-468	08:22	00:00
2 eixos / nº05	Talhão-104	14:00	00:00	Talhão-67	15:28	00:00
2 eixos / nº06	Talhão-206	06:52	00:00	Talhão-248	08:14	00:00
2 eixos / nº07	Talhão-524	11:00	00:00	Talhão-21	11:50	00:00
2 eixos / nº07	Talhão-453	06:11	00:00	Talhão-363	08:11	00:00
2 eixos / nº08	Talhão-579	06:36	00:00	Talhão-478	08:46	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-586	06:24	00:00	Talhão-199	08:12	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-51	10:30	00:00	Talhão-82	12:17	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-211	06:55	00:00	Talhão-471	08:40	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-90	11:00	00:00	Talhão-357	12:48	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-88	09:30	00:00	Talhão-73	10:23	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-398	11:30	00:00	Talhão-169	15:05	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-130	11:00	00:00	Talhão-230	14:23	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-329	06:24	00:00	Talhão-16	07:44	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-486	06:20	00:00	Talhão-238	07:24	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-102	11:30	00:00	Talhão-94	13:01	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-28	09:30	00:00	Talhão-172	10:26	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-345	07:12	00:00	Talhão-589	09:31	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-143	12:30	00:00	Talhão-480	13:45	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-69	10:00	00:00	Talhão-555	13:27	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-594	06:32	00:00	Talhão-12	07:46	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-563	08:09	00:00	Talhão-408	09:58	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-95	12:30	00:00	Talhão-158	13:56	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-184	06:45	00:00	Talhão-528	07:27	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-170	08:30	00:00	Talhão-350	12:24	00:00
4 eixos / nº03	Talhão-18	07:07	00:00	Talhão-233	10:47	00:00
4 eixos / nº04	Talhão-240	08:05	00:00	Talhão-293	10:27	00:00
4 eixos / nº04	Talhão-395	13:30	00:00	Talhão-457	17:07	00:00
4 eixos / nº05	Talhão-162	14:30	00:00	Talhão-367	15:52	00:00
4 eixos / nº05	Talhão-217	08:30	00:00	Talhão-566	10:10	00:00
4 eixos / nº05	Talhão-434	06:18	00:00	Talhão-443	07:02	00:00
4 eixos / nº06	Talhão-108	06:53	00:00	Talhão-175	09:18	00:00
4 eixos / nº07	Talhão-144	11:30	00:00	Talhão-328	13:05	00:00
4 eixos / nº07	Talhão-369	07:07	00:00	Talhão-390	08:30	00:00
4 eixos / nº08	Talhão-251	13:00	00:00	Talhão-239	15:52	00:00
4 eixos / nº08	Talhão-109	06:55	00:00	Talhão-86	10:56	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-617	06:34	00:00	Talhão-178	07:39	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-562	10:16	00:00	Talhão-20	10:55	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-118	06:50	00:00	Talhão-543	08:02	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-355	10:30	00:00	Talhão-257	12:15	00:00
Plataforma / nº03	Talhão-631	07:54	00:00	Talhão-321	11:44	00:00
Plataforma / nº04	Talhão-378	07:15	00:00	Talhão-572	09:30	00:00
Plataforma / nº04	Talhão-393	13:43	00:00	Talhão-297	17:10	00:00
Plataforma / nº05	Talhão-278	06:51	00:00	Talhão-302	07:33	00:00
Plataforma / nº05	Talhão-92	09:30	00:00	Talhão-610	11:17	00:00
Plataforma / nº06	Talhão-38	07:06	00:00	Talhão-245	08:38	00:00
Plataforma / nº07	Talhão-400	13:00	00:00	Talhão-228	15:28	00:00
Plataforma / nº07	Talhão-317	06:30	00:00	Talhão-354	08:32	00:00
Plataforma / nº08	Talhão-449	08:53	00:00	Talhão-407	10:22	00:00
Plataforma / nº08	Talhão-45	15:00	00:00	Talhão-259	16:28	00:00
Plataforma / nº08	Talhão-218	06:50	00:00	Talhão-541	07:28	00:00
-	-	-	-	Garagem	18:27	00:27
Minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada						
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
2 eixos / nº01	Talhão-588	13:00	00:00	Talhão-35	13:33	00:00
2 eixos / nº01	Talhão-533	06:09	00:00	Talhão-371	07:48	00:00
2 eixos / nº02	Talhão-410	12:30	00:00	Talhão-296	15:59	00:00

2 eixos / nº02	Talhão-474	06:12	00:00	Talhão-52	09:14	00:00
2 eixos / nº03	Talhão-142	06:54	00:00	Talhão-409	10:28	00:00
2 eixos / nº04	Talhão-306	06:51	00:00	Talhão-229	08:44	00:00
2 eixos / nº05	Talhão-119	10:30	00:00	Talhão-315	11:15	00:00
2 eixos / nº05	Talhão-24	06:48	00:00	Talhão-468	08:22	00:00
2 eixos / nº06	Talhão-524	11:00	00:00	Talhão-21	11:50	00:00
2 eixos / nº06	Talhão-206	06:52	00:00	Talhão-248	08:52	00:00
2 eixos / nº07	Talhão-553	12:30	00:00	Talhão-72	14:30	00:00
2 eixos / nº07	Talhão-453	06:11	00:00	Talhão-363	08:11	00:00
2 eixos / nº07	Talhão-372	09:39	00:00	Talhão-463	11:12	00:00
2 eixos / nº08	Talhão-104	14:00	00:00	Talhão-67	15:28	00:00
2 eixos / nº08	Talhão-579	06:36	00:00	Talhão-478	08:46	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-586	06:24	00:00	Talhão-199	08:12	00:00
3 eixos / nº01	Talhão-130	11:00	00:00	Talhão-230	14:23	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-51	10:30	00:00	Talhão-82	12:17	00:00
3 eixos / nº02	Talhão-211	06:55	00:00	Talhão-471	08:40	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-90	11:00	00:00	Talhão-357	12:48	00:00
3 eixos / nº03	Talhão-88	09:30	00:00	Talhão-73	10:23	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-329	06:24	00:00	Talhão-16	07:44	00:00
3 eixos / nº04	Talhão-398	11:30	00:00	Talhão-169	15:05	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-486	06:20	00:00	Talhão-238	07:24	00:00
3 eixos / nº05	Talhão-69	10:00	00:00	Talhão-555	13:27	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-345	07:12	00:00	Talhão-589	09:31	00:00
3 eixos / nº06	Talhão-143	12:30	00:00	Talhão-480	13:45	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-102	11:30	00:00	Talhão-94	13:01	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-28	09:30	00:00	Talhão-172	10:26	00:00
3 eixos / nº07	Talhão-594	06:32	00:00	Talhão-12	07:46	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-563	08:09	00:00	Talhão-408	09:58	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-162	14:30	00:00	Talhão-367	15:52	00:00
4 eixos / nº01	Talhão-95	12:30	00:00	Talhão-158	13:56	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-144	11:30	00:00	Talhão-328	13:05	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-184	06:45	00:00	Talhão-528	07:27	00:00
4 eixos / nº02	Talhão-217	08:30	00:00	Talhão-566	10:10	00:00
4 eixos / nº03	Talhão-251	13:00	00:00	Talhão-239	15:52	00:00
4 eixos / nº03	Talhão-18	07:07	00:00	Talhão-233	10:47	00:00
4 eixos / nº04	Talhão-240	08:05	00:00	Talhão-293	10:27	00:00
4 eixos / nº05	Talhão-434	06:18	00:00	Talhão-443	07:04	00:00
4 eixos / nº05	Talhão-170	08:30	00:00	Talhão-350	12:13	00:00
4 eixos / nº05	Talhão-395	13:30	00:00	Talhão-457	17:07	00:00
4 eixos / nº06	Talhão-108	06:53	00:00	Talhão-175	09:18	00:00
4 eixos / nº07	Talhão-369	07:07	00:00	Talhão-390	08:30	00:00
4 eixos / nº08	Talhão-109	06:55	00:00	Talhão-86	10:56	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-449	08:30	00:00	Talhão-407	10:11	00:00
Plataforma / nº01	Talhão-617	06:34	00:00	Talhão-178	07:39	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-118	06:50	00:00	Talhão-543	08:02	00:00
Plataforma / nº02	Talhão-45	15:00	00:00	Talhão-259	16:28	00:00
Plataforma / nº03	Talhão-631	07:54	00:00	Talhão-321	11:44	00:00
Plataforma / nº04	Talhão-378	07:15	00:00	Talhão-572	09:30	00:00
Plataforma / nº05	Talhão-278	06:51	00:00	Talhão-302	07:33	00:00
Plataforma / nº05	Talhão-355	10:30	00:00	Talhão-257	12:15	00:00
Plataforma / nº06	Talhão-400	13:00	00:00	Talhão-228	15:28	00:00
Plataforma / nº06	Talhão-38	07:06	00:00	Talhão-245	08:38	00:00
Plataforma / nº07	Talhão-92	09:30	00:00	Talhão-610	11:17	00:00
Plataforma / nº07	Talhão-317	06:30	00:00	Talhão-354	08:32	00:00
Plataforma / nº08	Talhão-218	06:50	00:00	Talhão-541	07:28	00:00
Plataforma / nº08	Talhão-562	10:45	00:00	Talhão-20	11:24	00:00
Plataforma / nº08	Talhão-393	13:43	00:00	Talhão-297	17:10	00:00
-	-	-	-	Garagem	18:27	00:27

Ho.: Horário

Com base nos resultados obtidos, observa-se que o modelo disponibiliza para o gestor uma série de possibilidades comuns a uma empresa do setor florestal, como: encontrar a rota de transporte que tenha o menor atraso e menor distância ponderada pela qualidade da estrada, situações em que a empresa necessite atender a uma alta demanda da indústria e em ocasiões em que a empresa possui menor demanda da indústria e opte por reduzir o número de veículos aceitando atrasos maiores. De qualquer forma, o modelo gera essas informações e possibilita ao gestor tomar decisões mais assertivas, além de facilitar o planejamento e uso por mais funcionários da empresa, já que um método científico é mais facilmente reproduzido. Para todos os cenários, o tempo de solução pelo método exato foi inferior a três minutos, sendo um método viável do ponto de vista de tempo de solução.

Como propostas de trabalho futuros, sugere-se pesquisas no sentido de obter-se: o custo monetário para cada tipo de veículo, em cada tipo de estrada florestal; calcular o custo fixo de cada máquina como forma de saber o quanto custa em termos monetários o atraso; e, o custo do fretamento de veículos pranchas. Dessa forma, é possível realizar uma análise econômica do transporte de máquinas florestais nos diferentes cenários.

7 CONCLUSÕES

O modelo proposto possibilita representar de forma simplificada a realidade do transporte de máquinas florestais, podendo auxiliar os gestores florestais na tomada de decisão para a redução de custos e utilização eficiente dos fatores de produção.

O modelo de otimização do transporte de máquinas florestais possibilitou encontrar uma solução ótima para determinar a rota de transporte com menor distância ponderada pela qualidade da estrada e minimizar o número de veículos pranchas utilizados no transporte das máquinas. Essas soluções têm relação direta com os custos associados ao transporte de máquinas florestais.

O modelo de otimização minimizou os atrasos em situações de alta demanda da empresa. Nessas circunstâncias, o gestor tem a opção de decidir por reduzir os atrasos independentemente do número de veículos necessários para o transporte das máquinas. Essa decisão deve ser tomada considerando aspectos econômicos e técnicos.

O modelo proposto apresentou eficácia e eficiência, tornando possível obter a melhor solução possível em cada situação em um tempo aceitável para as dimensões reais da empresa analisada, podendo ser utilizado no transporte de até 60 máquinas diariamente.

8 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. M.; PEDRO FILHO, F. S. Processo decisório aplicado na logística de transporte inter-modal marítimo-rodoviário. **Revista intercienceplace**, v. 3, n. 12, p. 1–19, 2010.
- ANDERSSON, D. **Approaches to integrated strategic/tactical forest planning**. 2005. Licentiate thesis – Swedish University of Agricultural Sciences. Umeå, 2005.
- ARNESEN, M. J.; GJESTVANG, M.; WANG, X.; FAGERHOLT, K.; THUN, K.; RAKKE, J. G. A traveling salesman problem with pickups and deliveries, time windows and draft limits: Case study from chemical shipping. **Computers & Operations Research**, v. 77, p. 20–31, 2017.
- BAE, H.; MOON, I. Multi-depot vehicle routing problem with time windows considering delivery and installation vehicles. **Applied Mathematical Modelling**, v. 40, n. 13, p. 6536–6549, 2016.
- BARROS JUNIOR, A. A. **Modelagem do problema de roteamento no planejamento do inventário florestal**. 2017. 87f. Tese (doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2017.
- BELFIORE, P.; YOSHIZAKI, H. T. Y. Heuristic methods for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and split deliveries. **Computers & Industrial Engineering**, v. 64, n. 2, p. 589–601, 2013.
- BELFIORE, P.; YOSHIZAKI, H.T.Y. A scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time Windows and Split deliveries in Brazil. **European Journal of Operational Research**, v. 199, n. 3, p. 750–758, 2009.
- BENT, R.; HENTENRYCK, P. V. A two-stage hybrid algorithm for pickup and delivery vehicle routing problems with time windows. **Computers & Operations Research**, v. 33, p. 875–893, 2006.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest Management and Planning**. Academic Press, 2009, 342p.
- CALVETE, H. I.; GALE, C.; OLIVEROS, M. A goal programming approach to vehicle routing problems with soft time windows. **European Journal of Operational Research**, v.177, n.3, p.1720–1733, 2007.
- CHEN, Y.-Y. Fuzzy flexible delivery and pickup problem with time windows. **Procedia Computer Science**, v. 17, p. 379–386, 2013.
- CHERKESLY, M.; DESAULNIERS, G.; IRNICH, S.; LAPORTE, G. Branch-price-and-cut algorithms for the pickup and delivery problem with time windows and multiple stacks. **European Journal of Operational Research**, v. 250, n. 3, p. 782–793, 2016.

CHERKESLY, M.; DESAULNIERS, G.; LAPORTE, G. A population-based metaheuristic for the pickup and delivery problem with time windows and LIFO loading. **Computers & Operations Research**, v. 62, p. 23–35, 2015.

CORDEAU, J. F. A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem. **Operations Research**, v. 54, n. 3, p. 573–586, 2006.

CORDEAU, J. F.; LAPORTE, I. M.; GONZÁLEZ, G, SALAZAR, J. J. A branch-and-cut algorithm for the pickup and delivery traveling salesman problem with lifo loading. **Networks**, v. 55, n. 1, p. 46–59, 2010.

CORDEAU, J.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G. A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. **Networks**, v. 30, n. 2, p.105–119, 1997.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. São Paulo: Atlas, 2006.

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. **Management Science**. v. 6, n. 1, p. 80–91, 1959.

DENG, A.; MAO, C.; ZHOU, Y. Optimizing research of an improved simulated annealing algorithm to soft time windows vehicle routing problem with pick-up and delivery. **Systems Engineering - Theory & Practice**, v. 29, n. 5, p. 186–192, 2009.

DESROSIERS, J. E DUMAS, Y. The shortest path for the construction of vehicle routes with pick-up, delivery and time constraints. Eiselt, H. e Pederzoli, G., editors, **Advances in Optimization and Control**, Springer, Heidelberg Berlin, p. 144–157, 1988.

DUMAS, Y.; DESROSIERS, J. E SOUMIS, F. The pickup and delivery problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, v. 54, p. 7–22, 1991.

ERBAO, C.; MINGYONG, L.; KAI, N. A differential evolution & amp; genetic algorithm for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up and time windows. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 41, n. 2, p. 10576–10581, 2008.

FABRI, A.; RECHT, P. On dynamic pickup and delivery vehicle routing with several time windows and waiting times. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 40, n. 4, p. 335–350, 2006.

FRANCIS, P.; SMILOWITZ, K.; TZUR, M. The period vehicle routing problem and its extensions. **The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges**, Boston, US, p. 73–102, 2008.

GÉLINAS, S.; DESROCHERS, M.; DESROSIERS, J. E SOLOMON, M. M. A new branching strategy for time constrained routing problems with application to backhauling. **Annals of Operations Research**, v. 61, n. 1, p. 91–109, 1995.

GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; SÉGUIN, R. Stochastic vehicle routing. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 88, n. 1, p. 3–12, 1996.

- GHIANI, G.; GUERRIERO, F.; LAPORTE, G.; MUSMANNO, R. Real-time vehicle routing: solution concepts, algorithms and parallel computing strategies. **European Journal of Operational Research**, v. 151, n. 1, p. 1–11, 2003.
- GHILAS, V.; DEMIR, E.; WOENSEL, T. Van. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows and scheduled lines. **Computers & Operations Research**, v. 72, p. 12–30, 2016a.
- GHILAS, V.; DEMIR, E.; WOENSEL, T. Van. A scenario-based planning for the pickup and delivery problem with time windows, scheduled lines and stochastic demands. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 91, p. 34–51, 2016b.
- GOLDBARG, M. C.; GOLDBARG, E. G. LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Meta-Heurísticas: Algoritmos e aplicações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. 392 p.
- GOMIDE, L. R. **Planejamento florestal espacial**. 2009. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- GRIFFIN, R. W. **Introdução à administração**. São Paulo: Ática, 2007, 568 p.
- GRUNIG, J. E. **Excellence in public relations and communication management**. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1992. 666 p.
- GUNN, E. A. **Some aspects of hierarchical production planning in forest management**, *in* Buford (1991), p. 54–62.
- GUTIÉRREZ-JARPA, G.; DESAULNIERS, G.; LAPORTE, G.; MARIANOV, V. A branch-and-price algorithm for the Vehicle Routing Problem with Deliveries, Selective Pickups and Time Windows. **European Journal of Operational Research**, v. 206, n. 2, p. 341–349, 2010.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. São Paulo: AMGH, 2013. 1028p.
- HOSNY, M. I.; MUMFORD, C. L. Constructing initial solutions for the multiple vehicle pickup and delivery problem with time windows. **Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences**, v. 24, n. 1, p. 59–69, 2012.
- IASSINOVSKAIA, G.; LIMBOURG, S.; RIANE, F. The inventory-routing problem of returnable transport items with time windows and simultaneous pickup and delivery in closed-loop supply chains. **International Journal of Production Economics**, 2016.
- KESKIN, M.; ÇATAY, B. Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 65, p. 111–127, 2016.
- KUNSCH, M.; M.; K. **Planejamento de Relações Públicas na Comunicação Integrada**. 4.ed. revisada, atualizada e ampliada. São Paulo: Summus, 2003.

LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J. Y.; SEMET, F. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. **International Transactions in Operational Research**, v. 7, n. 5, p. 285–300, 2000.

LI, Y.; CHEN, H.; PRINS, C. Adaptive large neighborhood search for the pickup and delivery problem with time windows, profits, and reserved requests. **European Journal of Operational Research**, v. 252, n. 1, p. 27–38, 2016.

LIN, C. K. Y. A cooperative strategy for a vehicle routing problem with pickup and delivery time windows. **Computers & Industrial Engineering**, v. 55, n. 4, p. 766–782, 2008.

LIN, C. K. Y. A vehicle routing problem with pickup and delivery time windows, and coordination of transportable resources. **Computers & Operations Research**, v. 38, n. 11, p. 1596–1609, 2011.

LIU, R.; XIE, X.; AUGUSTO, V.; RODRIGUEZ, C. Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care. **European Journal of Operational Research**, v. 230, n. 3, p. 475–486, 2013.

LU, C.-C.; YU, V. F. Data envelopment analysis for evaluating the efficiency of genetic algorithms on solving the vehicle routing problem with soft time windows. **Computers & Industrial Engineering**, v. 63, n. 2, p. 520–529, 2012.

LU, Q.; DESSOUKY, M. M. An exact algorithm for the multiple vehicle pick-up and delivery problem. **Transportation Science**, v. 38, n. 4, p. 503–514, 2004.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C. C. (Org.). **Colheita florestal**. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 2014. 543 p.

MAHMOUDI, M.; ZHOU, X. Finding optimal solutions for vehicle routing problem with pickup and delivery services with time windows: A dynamic programming approach based on state–space–time network representations. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 89, p. 19–42, 2016.

MÄNNEL, D.; BORTFELDT, A. A hybrid algorithm for the vehicle routing problem with pickup and delivery and three-dimensional loading constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 254, n. 3, p. 840–858, 2016.

MARCATTI, G. E. **Caminhamento ótimo para acesso às parcelas de inventário florestal**. 2013. 32f. (Dissertação em ciências florestais) – Universidade Federal de Viçosa, 2013.

MATOUSEK, J.; GÄRTNER, B. **Understanding and using linear programming**. Springer, 2007, 222p.

MCNABB, M. E.; WEIR, J. D.; HILL, R. R.; HALL, S. N. Testing local search move operators on the vehicle routing problem with split deliveries and time windows. **Computers & Operations Research**, v. 56, p. 93–109, 2015.

MINGOZZI, A.; GIORGI, S. An exact method for the vehicle routing problem with bachauls, **Transportation Science**, v. 33, n. 3, p. 315–329, 1999.

MINGYONG, L.; ERBAO, C. An improved differential evolution algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries and time windows. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 23, n. 2, p. 188–195, 2010.

MONTANÉ, F. A. T. A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service. **Computers & Operations Research**, V. 33, n. 3, p. 595–619, 2006.

NGUYEN, P. K.; CRAINIC, T. G.; TOULOUSE, M. A tabu search for Time-dependent Multi-zone Multi-trip Vehicle Routing Problem with Time Windows. **European Journal of Operational Research**, v. 231, n. 1, p. 43–56, 2013.

ÖZDEMIREL, A.; GÖKGÜR, B.; ELIYI, D. T. An assignment and routing problem with time windows and capacity restriction. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 54, p. 149–158, 2012.

PARRAGH, S.; DOERNER, K. E HARTL, R. A survey on pickup and delivery problems part ii: Transportation between pickup and delivery locations. **Journal für Betriebswirtschaft**, v. 58, n. 2, p. 81–117, 2008.

PILLAC V.; GENDREAU, M.; GUÉRET, C.; MEDAGUIA, A. L. A review of dynamic vehicle routing problems. **European Journal of Operational Research**. v. 225, p. 1–11, 2013.

POLAT, O.; KALAYCI, C. B.; KULAK, O.; GÜNTHER, H.-O. A perturbation based variable neighborhood search heuristic for solving the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery with time limit. **European Journal of Operational Research**, v. 242, n. 2, p. 369–382, 2015.

PUREZA, V.; LARAZIN, D.F. Um estudo de impactos do roteamento dinâmico de veículos em atividades de prestação de serviços. **Revista Produção**, v. 20, n. 4, 589–600, 2010.

ROPKE, S. E CORDEAU, J. F. Branch-and-cut-and-price for the pickup and delivery problem with time windows. **Transportation Science**, v. 43, n. 3, p. 267–286, 2009.

ROPKE, S.; CORDEAU, J. F. E LAPORTE, G. Models and branch-and-cut algorithms for pickup and delivery problems with time windows. **Networks**, v. 49, n. 4, p. 258–272, 2007.

RULAND, K.S. E. RODIN, E.Y. The pickup and delivery problem: faces and branch-and cut algorithm. **Computers and Mathematics with Applications**, v. 33, p. 1–13, 1997.

RUSSELL, R. A.; CHIANG, W. C. Scatter search for the vehicle routing problem with time Windows. **European Journal of Operational Research**, v. 169, n. 2, p. 606–622, 2006.

SEDGEWICK, R. **Algorithms in c++**. 3^a ed. Pearson Education. 1998. 752p.

SESSIONS, J., BETTINGER, P. Hierarchical planning: Pathway to the future? In: Proceedings of the first international precision forestry cooperative symposium. **Proceedings...**Washington. 2001. p.185-190.

TARANTILIS, C. D.; IOANNOU, G.; PRASTACOS, G. Advanced vehicle routing algorithms for complex operations management problems. **Journal of food engineering**, v. 70, pp. 45–471, 2005.

VEENSTRA, M.; CHERKESLY, M.; DESAULNIERS, G.; LAPORTE, G. The pickup and delivery problem with time windows and handling operations. **Computers & Operations Research**, v. 77, p. 127–140, 2017.

WANG, C.; MU, D.; ZHAO, F.; SUTHERLAND, J. W. A parallel simulated annealing method for the vehicle routing problem with simultaneous pickup–delivery and time windows. **Computers & Industrial Engineering**, v. 83, p. 111–122, 2015.

WANG, H.-F.; CHEN, Y.-Y. A coevolutionary algorithm for the flexible delivery and pickup problem with time windows. **International Journal of Production Economics**, v. 141, n. 1, p. 4–13, 2013.

WANG, H.-F.; CHEN, Y.-Y. A genetic algorithm for the simultaneous delivery and pickup problems with time window. **Computers & Industrial Engineering**, v. 62, n. 1, p. 84–95, 2012.

YAN, S.; CHU, J. C.; HSIAO, F.-Y.; HUANG, H.-J. A planning model and solution algorithm for multi-trip split-delivery vehicle routing and scheduling problems with time windows. **Computers & Industrial Engineering**, v. 87, p. 383–393, 2015.

Foi utilizada uma matriz com o tempo gasto no deslocamento de um local a outro, considerando a velocidade média dos veículos pranchas em cada tipo de estrada (Tabela 23).

Tabela 23: Tabela do tempo gasto em deslocamento (minutos)

		0	10	16	75	82	133	418	478	490	491	570	643
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	999	68	67	52	53	55	136	23	18	20	127	0
10	1		999	2	18	18	64	201	87	83	85	191	68
16	2			999	18	18	63	201	87	81	84	190	67
75	3				999	1	48	186	72	66	68	176	52
82	4					999	48	186	72	66	68	176	53
133	5						999	189	75	69	72	178	55
418	6							999	147	142	144	13	136
478	7								999	10	7	136	23
490	8									999	7	132	18
491	9										999	134	20
570	10											999	127
643	11												999

O problema de otimização do transporte de máquinas de colheita florestal consiste em obter rotas de menor custo ou distância para coletar máquinas de um local i e levar para outro local j , pelo veículo k , em horários de coleta específicos. Esse problema possui características semelhantes com a classe de problemas de roteamento de veículos com coleta e/ou entrega e janela de tempo e frota heterogênea. Desse modo, o problema de otimização do transporte de máquinas florestais será descrito pelo modelo matemático proposto a seguir:

Função objetivo

Os objetivos do modelo são compostos por três termos (42), nos quais o primeiro termo tem como função minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada total da rota, o segundo termo tem a função de minimizar o atraso no horário de atendimento dos talhões e das garagens, já o terceiro termo tem a incumbência de minimizar o número de veículos necessários para realizar o transporte das máquinas. As constantes ω_1 , ω_2 e ω_3 são pesos especificados pelo tomador de decisões como

forma de priorizar o que é mais importante em uma determinada situação. Neste trabalho foi atribuído peso 0 ou 1, ou seja, só considera ou não um termo da equação.

$$\omega_1 \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \sum_{k \in K} c_{i,j}^k x_{i,j}^k + \omega_2 \sum_{i \in N} A_i + \omega_3 \sum_{j \in P} \sum_{k \in K} x_{g_k, j}^k \quad (42)$$

$$\begin{aligned} & \omega_1 (23070X_{0_1_1} + 23070X_{0_1_2} + 23070X_{0_1_3} + 23070X_{0_1_4} + 23070X_{0_1_5} + \\ & 22961X_{0_2_1} + 22961X_{0_2_2} + 22961X_{0_2_3} + 22961X_{0_2_4} + 22961X_{0_2_5} + \\ & 17631X_{0_3_1} + 17631X_{0_3_2} + 17631X_{0_3_3} + 17631X_{0_3_4} + 17631X_{0_3_5} + \\ & 17605X_{0_4_1} + 17605X_{0_4_2} + 17605X_{0_4_3} + 17605X_{0_4_4} + 17605X_{0_4_5} + \\ & 18658X_{0_5_1} + 18658X_{0_5_2} + 18658X_{0_5_3} + 18658X_{0_5_4} + 18658X_{0_5_5} + \\ & 46233X_{0_6_1} + 46233X_{0_6_2} + 46233X_{0_6_3} + 46233X_{0_6_4} + 46233X_{0_6_5} + 7806X_{0_7_1} \\ & + 7806X_{0_7_2} + 7806X_{0_7_3} + 7806X_{0_7_4} + 7806X_{0_7_5} + 5974X_{0_8_1} + 5974X_{0_8_2} + \\ & 5974X_{0_8_3} + 5974X_{0_8_4} + 5974X_{0_8_5} + 6850X_{0_9_1} + 6850X_{0_9_2} + 6850X_{0_9_3} + \\ & 6850X_{0_9_4} + 6850X_{0_9_5} + 42545X_{0_10_1} + 42545X_{0_10_2} + 42545X_{0_10_3} + \\ & 42545X_{0_10_4} + 42545X_{0_10_5} + 0X_{0_11_1} + 0X_{0_11_2} + 0X_{0_11_3} + 0X_{0_11_4} + \\ & 0X_{0_11_5} + 23070X_{1_0_1} + 23070X_{1_0_2} + 23070X_{1_0_3} + 23070X_{1_0_4} + 23070X_{1_0_5} + \\ & 839X_{1_2_1} + 839X_{1_2_2} + 839X_{1_2_3} + 839X_{1_2_4} + 839X_{1_2_5} + 6126X_{1_3_1} + \\ & 6126X_{1_3_2} + 6126X_{1_3_3} + 6126X_{1_3_4} + 6126X_{1_3_5} + 6101X_{1_4_1} + 6101X_{1_4_2} + \\ & 6101X_{1_4_3} + 6101X_{1_4_4} + 6101X_{1_4_5} + 21790X_{1_5_1} + 21790X_{1_5_2} + 21790X_{1_5_3} + \\ & 21790X_{1_5_4} + 21790X_{1_5_5} + 68428X_{1_6_1} + 68428X_{1_6_2} + 68428X_{1_6_3} + \\ & 68428X_{1_6_4} + 68428X_{1_6_5} + 29893X_{1_7_1} + 29893X_{1_7_2} + 29893X_{1_7_3} + \\ & 29893X_{1_7_4} + 29893X_{1_7_5} + 28061X_{1_8_1} + 28061X_{1_8_2} + 28061X_{1_8_3} + \\ & 28061X_{1_8_4} + 28061X_{1_8_5} + 28937X_{1_9_1} + 28937X_{1_9_2} + 28937X_{1_9_3} + \\ & 28937X_{1_9_4} + 28937X_{1_9_5} + 64740X_{1_10_1} + 64740X_{1_10_2} + 64740X_{1_10_3} + \\ & 64740X_{1_10_4} + 64740X_{1_10_5} + 23070X_{1_11_1} + 23070X_{1_11_2} + 23070X_{1_11_3} + \\ & 23070X_{1_11_4} + 23070X_{1_11_5} + 22961X_{2_0_1} + 22961X_{2_0_2} + 22961X_{2_0_3} + \\ & 22961X_{2_0_4} + 22961X_{2_0_5} + 839X_{2_1_1} + 839X_{2_1_2} + 839X_{2_1_3} + 839X_{2_1_4} + \\ & 839X_{2_1_5} + 6017X_{2_3_1} + 6017X_{2_3_2} + 6017X_{2_3_3} + 6017X_{2_3_4} + 6017X_{2_3_5} + \\ & 5992X_{2_4_1} + 5992X_{2_4_2} + 5992X_{2_4_3} + 5992X_{2_4_4} + 5992X_{2_4_5} + 21681X_{2_5_1} + \\ & 21681X_{2_5_2} + 21681X_{2_5_3} + 21681X_{2_5_4} + 21681X_{2_5_5} + 68319X_{2_6_1} + \\ & 68319X_{2_6_2} + 68319X_{2_6_3} + 68319X_{2_6_4} + 68319X_{2_6_5} + 29784X_{2_7_1} + \\ & 29784X_{2_7_2} + 29784X_{2_7_3} + 29784X_{2_7_4} + 29784X_{2_7_5} + 27952X_{2_8_1} + \\ & 27952X_{2_8_2} + 27952X_{2_8_3} + 27952X_{2_8_4} + 27952X_{2_8_5} + 28828X_{2_9_1} + \\ & 28828X_{2_9_2} + 28828X_{2_9_3} + 28828X_{2_9_4} + 28828X_{2_9_5} + 64631X_{2_10_1} + \\ & 64631X_{2_10_2} + 64631X_{2_10_3} + 64631X_{2_10_4} + 64631X_{2_10_5} + 22961X_{2_11_1} + \\ & 22961X_{2_11_2} + 22961X_{2_11_3} + 22961X_{2_11_4} + 22961X_{2_11_5} + 17631X_{3_0_1} + \\ & 17631X_{3_0_2} + 17631X_{3_0_3} + 17631X_{3_0_4} + 17631X_{3_0_5} + 6126X_{3_1_1} + 6126X_{3_1_2} \end{aligned}$$

+ 6126X_3_1_3 + 6126X_3_1_4 + 6126X_3_1_5 + 6017X_3_2_1 + 6017X_3_2_2 + 6017X_3_2_3 +
 6017X_3_2_4 + 6017X_3_2_5 + 390X_3_4_1 + 390X_3_4_2 + 390X_3_4_3 + 390X_3_4_4 +
 390X_3_4_5 + 16351X_3_5_1 + 16351X_3_5_2 + 16351X_3_5_3 + 16351X_3_5_4 + 16351X_3_5_5
 + 62988X_3_6_1 + 62988X_3_6_2 + 62988X_3_6_3 + 62988X_3_6_4 + 62988X_3_6_5 +
 24453X_3_7_1 + 24453X_3_7_2 + 24453X_3_7_3 + 24453X_3_7_4 + 24453X_3_7_5 +
 22621X_3_8_1 + 22621X_3_8_2 + 22621X_3_8_3 + 22621X_3_8_4 + 22621X_3_8_5 +
 23498X_3_9_1 + 23498X_3_9_2 + 23498X_3_9_3 + 23498X_3_9_4 + 23498X_3_9_5 +
 59300X_3_10_1 + 59300X_3_10_2 + 59300X_3_10_3 + 59300X_3_10_4 + 59300X_3_10_5 +
 17631X_3_11_1 + 17631X_3_11_2 + 17631X_3_11_3 + 17631X_3_11_4 + 17631X_3_11_5 +
 17605X_4_0_1 + 17605X_4_0_2 + 17605X_4_0_3 + 17605X_4_0_4 + 17605X_4_0_5 + 6101X_4_1_1
 + 6101X_4_1_2 + 6101X_4_1_3 + 6101X_4_1_4 + 6101X_4_1_5 + 5992X_4_2_1 + 5992X_4_2_2 +
 5992X_4_2_3 + 5992X_4_2_4 + 5992X_4_2_5 + 390X_4_3_1 + 390X_4_3_2 + 390X_4_3_3 +
 390X_4_3_4 + 390X_4_3_5 + 16325X_4_5_1 + 16325X_4_5_2 + 16325X_4_5_3 + 16325X_4_5_4 +
 16325X_4_5_5 + 62963X_4_6_1 + 62963X_4_6_2 + 62963X_4_6_3 + 62963X_4_6_4 +
 62963X_4_6_5 + 24428X_4_7_1 + 24428X_4_7_2 + 24428X_4_7_3 + 24428X_4_7_4 +
 24428X_4_7_5 + 22596X_4_8_1 + 22596X_4_8_2 + 22596X_4_8_3 + 22596X_4_8_4 +
 22596X_4_8_5 + 23472X_4_9_1 + 23472X_4_9_2 + 23472X_4_9_3 + 23472X_4_9_4 +
 23472X_4_9_5 + 59274X_4_10_1 + 59274X_4_10_2 + 59274X_4_10_3 + 59274X_4_10_4 +
 59274X_4_10_5 + 17605X_4_11_1 + 17605X_4_11_2 + 17605X_4_11_3 + 17605X_4_11_4 +
 17605X_4_11_5 + 18658X_5_0_1 + 18658X_5_0_2 + 18658X_5_0_3 + 18658X_5_0_4 +
 18658X_5_0_5 + 21790X_5_1_1 + 21790X_5_1_2 + 21790X_5_1_3 + 21790X_5_1_4 +
 21790X_5_1_5 + 21681X_5_2_1 + 21681X_5_2_2 + 21681X_5_2_3 + 21681X_5_2_4 +
 21681X_5_2_5 + 16351X_5_3_1 + 16351X_5_3_2 + 16351X_5_3_3 + 16351X_5_3_4 +
 16351X_5_3_5 + 16325X_5_4_1 + 16325X_5_4_2 + 16325X_5_4_3 + 16325X_5_4_4 +
 16325X_5_4_5 + 64016X_5_6_1 + 64016X_5_6_2 + 64016X_5_6_3 + 64016X_5_6_4 +
 64016X_5_6_5 + 25481X_5_7_1 + 25481X_5_7_2 + 25481X_5_7_3 + 25481X_5_7_4 +
 25481X_5_7_5 + 23648X_5_8_1 + 23648X_5_8_2 + 23648X_5_8_3 + 23648X_5_8_4 +
 23648X_5_8_5 + 24525X_5_9_1 + 24525X_5_9_2 + 24525X_5_9_3 + 24525X_5_9_4 +
 24525X_5_9_5 + 60327X_5_10_1 + 60327X_5_10_2 + 60327X_5_10_3 + 60327X_5_10_4 +
 60327X_5_10_5 + 18658X_5_11_1 + 18658X_5_11_2 + 18658X_5_11_3 + 18658X_5_11_4 +
 18658X_5_11_5 + 46233X_6_0_1 + 46233X_6_0_2 + 46233X_6_0_3 + 46233X_6_0_4 +
 46233X_6_0_5 + 68428X_6_1_1 + 68428X_6_1_2 + 68428X_6_1_3 + 68428X_6_1_4 +
 68428X_6_1_5 + 68319X_6_2_1 + 68319X_6_2_2 + 68319X_6_2_3 + 68319X_6_2_4 +
 68319X_6_2_5 + 62988X_6_3_1 + 62988X_6_3_2 + 62988X_6_3_3 + 62988X_6_3_4 +
 62988X_6_3_5 + 62963X_6_4_1 + 62963X_6_4_2 + 62963X_6_4_3 + 62963X_6_4_4 +
 62963X_6_4_5 + 64016X_6_5_1 + 64016X_6_5_2 + 64016X_6_5_3 + 64016X_6_5_4 +
 64016X_6_5_5 + 50102X_6_7_1 + 50102X_6_7_2 + 50102X_6_7_3 + 50102X_6_7_4 +
 50102X_6_7_5 + 48270X_6_8_1 + 48270X_6_8_2 + 48270X_6_8_3 + 48270X_6_8_4 +
 48270X_6_8_5 + 49146X_6_9_1 + 49146X_6_9_2 + 49146X_6_9_3 + 49146X_6_9_4 +
 49146X_6_9_5 + 4201X_6_10_1 + 4201X_6_10_2 + 4201X_6_10_3 + 4201X_6_10_4 +

4201X_6_10_5 + 46233X_6_11_1 + 46233X_6_11_2 + 46233X_6_11_3 + 46233X_6_11_4 +
 46233X_6_11_5 + 7806X_7_0_1 + 7806X_7_0_2 + 7806X_7_0_3 + 7806X_7_0_4 + 7806X_7_0_5 +
 29893X_7_1_1 + 29893X_7_1_2 + 29893X_7_1_3 + 29893X_7_1_4 + 29893X_7_1_5 +
 29784X_7_2_1 + 29784X_7_2_2 + 29784X_7_2_3 + 29784X_7_2_4 + 29784X_7_2_5 +
 24453X_7_3_1 + 24453X_7_3_2 + 24453X_7_3_3 + 24453X_7_3_4 + 24453X_7_3_5 +
 24428X_7_4_1 + 24428X_7_4_2 + 24428X_7_4_3 + 24428X_7_4_4 + 24428X_7_4_5 +
 25481X_7_5_1 + 25481X_7_5_2 + 25481X_7_5_3 + 25481X_7_5_4 + 25481X_7_5_5 +
 50102X_7_6_1 + 50102X_7_6_2 + 50102X_7_6_3 + 50102X_7_6_4 + 50102X_7_6_5 + 3140X_7_8_1
 + 3140X_7_8_2 + 3140X_7_8_3 + 3140X_7_8_4 + 3140X_7_8_5 + 2097X_7_9_1 + 2097X_7_9_2 +
 2097X_7_9_3 + 2097X_7_9_4 + 2097X_7_9_5 + 46413X_7_10_1 + 46413X_7_10_2 +
 46413X_7_10_3 + 46413X_7_10_4 + 46413X_7_10_5 + 7806X_7_11_1 + 7806X_7_11_2 +
 7806X_7_11_3 + 7806X_7_11_4 + 7806X_7_11_5 + 5974X_8_0_1 + 5974X_8_0_2 + 5974X_8_0_3 +
 5974X_8_0_4 + 5974X_8_0_5 + 28061X_8_1_1 + 28061X_8_1_2 + 28061X_8_1_3 + 28061X_8_1_4
 + 28061X_8_1_5 + 27952X_8_2_1 + 27952X_8_2_2 + 27952X_8_2_3 + 27952X_8_2_4 +
 27952X_8_2_5 + 22621X_8_3_1 + 22621X_8_3_2 + 22621X_8_3_3 + 22621X_8_3_4 +
 22621X_8_3_5 + 22596X_8_4_1 + 22596X_8_4_2 + 22596X_8_4_3 + 22596X_8_4_4 +
 22596X_8_4_5 + 23648X_8_5_1 + 23648X_8_5_2 + 23648X_8_5_3 + 23648X_8_5_4 +
 23648X_8_5_5 + 48270X_8_6_1 + 48270X_8_6_2 + 48270X_8_6_3 + 48270X_8_6_4 +
 48270X_8_6_5 + 3140X_8_7_1 + 3140X_8_7_2 + 3140X_8_7_3 + 3140X_8_7_4 + 3140X_8_7_5 +
 1932X_8_9_1 + 1932X_8_9_2 + 1932X_8_9_3 + 1932X_8_9_4 + 1932X_8_9_5 + 44581X_8_10_1 +
 44581X_8_10_2 + 44581X_8_10_3 + 44581X_8_10_4 + 44581X_8_10_5 + 5974X_8_11_1 +
 5974X_8_11_2 + 5974X_8_11_3 + 5974X_8_11_4 + 5974X_8_11_5 + 6850X_9_0_1 + 6850X_9_0_2
 + 6850X_9_0_3 + 6850X_9_0_4 + 6850X_9_0_5 + 28937X_9_1_1 + 28937X_9_1_2 + 28937X_9_1_3
 + 28937X_9_1_4 + 28937X_9_1_5 + 28828X_9_2_1 + 28828X_9_2_2 + 28828X_9_2_3 +
 28828X_9_2_4 + 28828X_9_2_5 + 23498X_9_3_1 + 23498X_9_3_2 + 23498X_9_3_3 +
 23498X_9_3_4 + 23498X_9_3_5 + 23472X_9_4_1 + 23472X_9_4_2 + 23472X_9_4_3 +
 23472X_9_4_4 + 23472X_9_4_5 + 24525X_9_5_1 + 24525X_9_5_2 + 24525X_9_5_3 +
 24525X_9_5_4 + 24525X_9_5_5 + 49146X_9_6_1 + 49146X_9_6_2 + 49146X_9_6_3 +
 49146X_9_6_4 + 49146X_9_6_5 + 2097X_9_7_1 + 2097X_9_7_2 + 2097X_9_7_3 + 2097X_9_7_4 +
 2097X_9_7_5 + 1932X_9_8_1 + 1932X_9_8_2 + 1932X_9_8_3 + 1932X_9_8_4 + 1932X_9_8_5 +
 45458X_9_10_1 + 45458X_9_10_2 + 45458X_9_10_3 + 45458X_9_10_4 + 45458X_9_10_5 +
 6850X_9_11_1 + 6850X_9_11_2 + 6850X_9_11_3 + 6850X_9_11_4 + 6850X_9_11_5 +
 42545X_10_0_1 + 42545X_10_0_2 + 42545X_10_0_3 + 42545X_10_0_4 + 42545X_10_0_5 +
 64740X_10_1_1 + 64740X_10_1_2 + 64740X_10_1_3 + 64740X_10_1_4 + 64740X_10_1_5 +
 64631X_10_2_1 + 64631X_10_2_2 + 64631X_10_2_3 + 64631X_10_2_4 + 64631X_10_2_5 +
 59300X_10_3_1 + 59300X_10_3_2 + 59300X_10_3_3 + 59300X_10_3_4 + 59300X_10_3_5 +
 59274X_10_4_1 + 59274X_10_4_2 + 59274X_10_4_3 + 59274X_10_4_4 + 59274X_10_4_5 +
 60327X_10_5_1 + 60327X_10_5_2 + 60327X_10_5_3 + 60327X_10_5_4 + 60327X_10_5_5 +
 4201X_10_6_1 + 4201X_10_6_2 + 4201X_10_6_3 + 4201X_10_6_4 + 4201X_10_6_5 +
 46413X_10_7_1 + 46413X_10_7_2 + 46413X_10_7_3 + 46413X_10_7_4 + 46413X_10_7_5 +

$$\begin{aligned}
& 44581X_{10_8_1} + 44581X_{10_8_2} + 44581X_{10_8_3} + 44581X_{10_8_4} + 44581X_{10_8_5} + \\
& 45458X_{10_9_1} + 45458X_{10_9_2} + 45458X_{10_9_3} + 45458X_{10_9_4} + 45458X_{10_9_5} + \\
& 42545X_{10_11_1} + 42545X_{10_11_2} + 42545X_{10_11_3} + 42545X_{10_11_4} + 42545X_{10_11_5} + \\
& 0X_{11_0_1} + 0X_{11_0_2} + 0X_{11_0_3} + 0X_{11_0_4} + 0X_{11_0_5} + 23070X_{11_1_1} + \\
& 23070X_{11_1_2} + 23070X_{11_1_3} + 23070X_{11_1_4} + 23070X_{11_1_5} + 22961X_{11_2_1} + \\
& 22961X_{11_2_2} + 22961X_{11_2_3} + 22961X_{11_2_4} + 22961X_{11_2_5} + 17631X_{11_3_1} + \\
& 17631X_{11_3_2} + 17631X_{11_3_3} + 17631X_{11_3_4} + 17631X_{11_3_5} + 17605X_{11_4_1} + \\
& 17605X_{11_4_2} + 17605X_{11_4_3} + 17605X_{11_4_4} + 17605X_{11_4_5} + 18658X_{11_5_1} + \\
& 18658X_{11_5_2} + 18658X_{11_5_3} + 18658X_{11_5_4} + 18658X_{11_5_5} + 46233X_{11_6_1} + \\
& 46233X_{11_6_2} + 46233X_{11_6_3} + 46233X_{11_6_4} + 46233X_{11_6_5} + 7806X_{11_7_1} + \\
& 7806X_{11_7_2} + 7806X_{11_7_3} + 7806X_{11_7_4} + 7806X_{11_7_5} + 5974X_{11_8_1} + \\
& 5974X_{11_8_2} + 5974X_{11_8_3} + 5974X_{11_8_4} + 5974X_{11_8_5} + 6850X_{11_9_1} + \\
& 6850X_{11_9_2} + 6850X_{11_9_3} + 6850X_{11_9_4} + 6850X_{11_9_5} + 42545X_{11_10_1} + \\
& 42545X_{11_10_2} + 42545X_{11_10_3} + 42545X_{11_10_4} + 42545X_{11_10_5} + \omega_2(A_0 + A_1 + A_2 \\
& + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9 + A_{10} + A_{11}) + \omega_3(X_{0_1_1} + X_{0_1_2} + X_{0_1_3} + \\
& X_{0_1_4} + X_{0_1_5} + X_{0_2_1} + X_{0_2_2} + X_{0_2_3} + X_{0_2_4} + X_{0_2_5} + X_{0_3_1} + X_{0_3_2} \\
& + X_{0_3_3} + X_{0_3_4} + X_{0_3_5} + X_{0_4_1} + X_{0_4_2} + X_{0_4_3} + X_{0_4_4} + X_{0_4_5} + X_{0_5_1} \\
& + X_{0_5_2} + X_{0_5_3} + X_{0_5_4} + X_{0_5_5})
\end{aligned}$$

Restrições que garantem que os veículos pranchas saiam da garagem de origem e retornem da garagem de destino

As restrições (43) e (44) garantem que os caminhões saiam da garagem de origem para um talhão de coleta e retornem para a garagem de destino de um talhão de entrega no final da rota.

$$\sum_{j \in \left\{ \mathcal{P} \cup \left\{ g_k^+ \right\} \right\}} x_{g_k^-, j}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (43)$$

$$\begin{aligned}
X_{0_1_1} + X_{0_2_1} + X_{0_3_1} + X_{0_4_1} + X_{0_5_1} + X_{0_11_1} &= 1 \\
X_{0_1_2} + X_{0_2_2} + X_{0_3_2} + X_{0_4_2} + X_{0_5_2} + X_{0_11_2} &= 1 \\
X_{0_1_3} + X_{0_2_3} + X_{0_3_3} + X_{0_4_3} + X_{0_5_3} + X_{0_11_3} &= 1 \\
X_{0_1_4} + X_{0_2_4} + X_{0_3_4} + X_{0_4_4} + X_{0_5_4} + X_{0_11_4} &= 1 \\
X_{0_1_5} + X_{0_2_5} + X_{0_3_5} + X_{0_4_5} + X_{0_5_5} + X_{0_11_5} &= 1
\end{aligned}$$

$$\sum_{i \in \{P \cup \{g_k^-\}\}} x_{i, \{g_k^+\}}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (44)$$

$$\begin{aligned} X_{0_11_1} + X_{6_11_1} + X_{7_11_1} + X_{8_11_1} + X_{9_11_1} + X_{10_11_1} &= 1 \\ X_{0_11_2} + X_{6_11_2} + X_{7_11_2} + X_{8_11_2} + X_{9_11_2} + X_{10_11_2} &= 1 \\ X_{0_11_3} + X_{6_11_3} + X_{7_11_3} + X_{8_11_3} + X_{9_11_3} + X_{10_11_3} &= 1 \\ X_{0_11_4} + X_{6_11_4} + X_{7_11_4} + X_{8_11_4} + X_{9_11_4} + X_{10_11_4} &= 1 \\ X_{0_11_5} + X_{6_11_5} + X_{7_11_5} + X_{8_11_5} + X_{9_11_5} + X_{10_11_5} &= 1 \end{aligned}$$

Restrição tem a função de assegurar que cada solicitação de transporte seja atendida somente uma vez e por um único veículo

A restrição (45) tem a função de assegurar que cada solicitação de transporte seja atendida somente uma vez e por um único veículo.

$$\sum_{j \in \{P \cup D\}_{j \neq i}} \sum_{k \in K} x_{i,j}^k = 1 \quad \forall i \in P \quad (45)$$

$$\begin{aligned} X_{1_2_1} + X_{1_2_2} + X_{1_2_3} + X_{1_2_4} + X_{1_2_5} + X_{1_3_1} + X_{1_3_2} + X_{1_3_3} + X_{1_3_4} \\ + X_{1_3_5} + X_{1_4_1} + X_{1_4_2} + X_{1_4_3} + X_{1_4_4} + X_{1_4_5} + X_{1_5_1} + X_{1_5_2} + X_{1_5_3} \\ + X_{1_5_4} + X_{1_5_5} + X_{1_6_1} + X_{1_6_2} + X_{1_6_3} + X_{1_6_4} + X_{1_6_5} + X_{1_7_1} + X_{1_7_2} \\ + X_{1_7_3} + X_{1_7_4} + X_{1_7_5} + X_{1_8_1} + X_{1_8_2} + X_{1_8_3} + X_{1_8_4} + X_{1_8_5} + X_{1_9_1} \\ + X_{1_9_2} + X_{1_9_3} + X_{1_9_4} + X_{1_9_5} + X_{1_10_1} + X_{1_10_2} + X_{1_10_3} + X_{1_10_4} + \\ X_{1_10_5} &= 1 \\ X_{2_1_1} + X_{2_1_2} + X_{2_1_3} + X_{2_1_4} + X_{2_1_5} + X_{2_3_1} + X_{2_3_2} + X_{2_3_3} + X_{2_3_4} \\ + X_{2_3_5} + X_{2_4_1} + X_{2_4_2} + X_{2_4_3} + X_{2_4_4} + X_{2_4_5} + X_{2_5_1} + X_{2_5_2} + X_{2_5_3} \\ + X_{2_5_4} + X_{2_5_5} + X_{2_6_1} + X_{2_6_2} + X_{2_6_3} + X_{2_6_4} + X_{2_6_5} + X_{2_7_1} + X_{2_7_2} \\ + X_{2_7_3} + X_{2_7_4} + X_{2_7_5} + X_{2_8_1} + X_{2_8_2} + X_{2_8_3} + X_{2_8_4} + X_{2_8_5} + X_{2_9_1} \\ + X_{2_9_2} + X_{2_9_3} + X_{2_9_4} + X_{2_9_5} + X_{2_10_1} + X_{2_10_2} + X_{2_10_3} + X_{2_10_4} + \\ X_{2_10_5} &= 1 \\ X_{3_1_1} + X_{3_1_2} + X_{3_1_3} + X_{3_1_4} + X_{3_1_5} + X_{3_2_1} + X_{3_2_2} + X_{3_2_3} + X_{3_2_4} \\ + X_{3_2_5} + X_{3_4_1} + X_{3_4_2} + X_{3_4_3} + X_{3_4_4} + X_{3_4_5} + X_{3_5_1} + X_{3_5_2} + X_{3_5_3} \\ + X_{3_5_4} + X_{3_5_5} + X_{3_6_1} + X_{3_6_2} + X_{3_6_3} + X_{3_6_4} + X_{3_6_5} + X_{3_7_1} + X_{3_7_2} \\ + X_{3_7_3} + X_{3_7_4} + X_{3_7_5} + X_{3_8_1} + X_{3_8_2} + X_{3_8_3} + X_{3_8_4} + X_{3_8_5} + X_{3_9_1} \\ + X_{3_9_2} + X_{3_9_3} + X_{3_9_4} + X_{3_9_5} + X_{3_10_1} + X_{3_10_2} + X_{3_10_3} + X_{3_10_4} + \\ X_{3_10_5} &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&X_{4_1_1} + X_{4_1_2} + X_{4_1_3} + X_{4_1_4} + X_{4_1_5} + X_{4_2_1} + X_{4_2_2} + X_{4_2_3} + X_{4_2_4} \\
&+ X_{4_2_5} + X_{4_3_1} + X_{4_3_2} + X_{4_3_3} + X_{4_3_4} + X_{4_3_5} + X_{4_5_1} + X_{4_5_2} + X_{4_5_3} \\
&+ X_{4_5_4} + X_{4_5_5} + X_{4_6_1} + X_{4_6_2} + X_{4_6_3} + X_{4_6_4} + X_{4_6_5} + X_{4_7_1} + X_{4_7_2} \\
&+ X_{4_7_3} + X_{4_7_4} + X_{4_7_5} + X_{4_8_1} + X_{4_8_2} + X_{4_8_3} + X_{4_8_4} + X_{4_8_5} + X_{4_9_1} \\
&+ X_{4_9_2} + X_{4_9_3} + X_{4_9_4} + X_{4_9_5} + X_{4_10_1} + X_{4_10_2} + X_{4_10_3} + X_{4_10_4} + \\
&X_{4_10_5} = 1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&X_{5_1_1} + X_{5_1_2} + X_{5_1_3} + X_{5_1_4} + X_{5_1_5} + X_{5_2_1} + X_{5_2_2} + X_{5_2_3} + X_{5_2_4} \\
&+ X_{5_2_5} + X_{5_3_1} + X_{5_3_2} + X_{5_3_3} + X_{5_3_4} + X_{5_3_5} + X_{5_4_1} + X_{5_4_2} + X_{5_4_3} \\
&+ X_{5_4_4} + X_{5_4_5} + X_{5_6_1} + X_{5_6_2} + X_{5_6_3} + X_{5_6_4} + X_{5_6_5} + X_{5_7_1} + X_{5_7_2} \\
&+ X_{5_7_3} + X_{5_7_4} + X_{5_7_5} + X_{5_8_1} + X_{5_8_2} + X_{5_8_3} + X_{5_8_4} + X_{5_8_5} + X_{5_9_1} \\
&+ X_{5_9_2} + X_{5_9_3} + X_{5_9_4} + X_{5_9_5} + X_{5_10_1} + X_{5_10_2} + X_{5_10_3} + X_{5_10_4} + \\
&X_{5_10_5} = 1
\end{aligned}$$

Restrição que garante que os nós de coleta e entrega sejam atendidos pelo mesmo veículo

A restrição (46) garante que os nós de coleta e entrega sejam atendidos pelo mesmo veículo. Dessa forma, a máquina que está no talhão i deve ir para o talhão $n + i$, ou seja, a máquina que está no nó 1 deve ir para o nó 5, a do nó 2 para o 6, a do nó 3 para o 7, a do nó 4 para o 8 e a do nó 5 para o nó 10. Se uma máquina for do nó 1 para o nó 5 utilizando o veículo 1, logo ela deve ser recebida no nó 5 vindo do nó 1 pelo veículo 1 para que essa soma seja 0. Note que todas as possibilidades são consideradas.

$$\sum_{\substack{j \in \{PUD\} \\ j \neq i}} x_{i,j}^k - \sum_{\substack{j \in \{PUDU\} \\ j \neq i; j \neq n+i}} \left\{ g_k^+ \right\} x_{n+i,j}^k = 0 \quad \forall i \in P, k \in K \quad (46)$$

$$\begin{aligned}
&X_{1_2_1} + X_{1_3_1} + X_{1_4_1} + X_{1_5_1} + X_{1_6_1} + X_{1_7_1} + X_{1_8_1} + X_{1_9_1} + X_{1_10_1} \\
&- X_{6_2_1} - X_{6_3_1} - X_{6_4_1} - X_{6_5_1} - X_{6_7_1} - X_{6_8_1} - X_{6_9_1} - X_{6_10_1} - X_{6_11_1} \\
&= 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&X_{1_2_2} + X_{1_3_2} + X_{1_4_2} + X_{1_5_2} + X_{1_6_2} + X_{1_7_2} + X_{1_8_2} + X_{1_9_2} + X_{1_10_2} \\
&- X_{6_2_2} - X_{6_3_2} - X_{6_4_2} - X_{6_5_2} - X_{6_7_2} - X_{6_8_2} - X_{6_9_2} - X_{6_10_2} - X_{6_11_2} \\
&= 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{1_2_3} + X_{1_3_3} + X_{1_4_3} + X_{1_5_3} + X_{1_6_3} + X_{1_7_3} + X_{1_8_3} + X_{1_9_3} + X_{1_10_3} \\
& - X_{6_2_3} - X_{6_3_3} - X_{6_4_3} - X_{6_5_3} - X_{6_7_3} - X_{6_8_3} - X_{6_9_3} - X_{6_10_3} - X_{6_11_3} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{1_2_4} + X_{1_3_4} + X_{1_4_4} + X_{1_5_4} + X_{1_6_4} + X_{1_7_4} + X_{1_8_4} + X_{1_9_4} + X_{1_10_4} \\
& - X_{6_2_4} - X_{6_3_4} - X_{6_4_4} - X_{6_5_4} - X_{6_7_4} - X_{6_8_4} - X_{6_9_4} - X_{6_10_4} - X_{6_11_4} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{1_2_5} + X_{1_3_5} + X_{1_4_5} + X_{1_5_5} + X_{1_6_5} + X_{1_7_5} + X_{1_8_5} + X_{1_9_5} + X_{1_10_5} \\
& - X_{6_2_5} - X_{6_3_5} - X_{6_4_5} - X_{6_5_5} - X_{6_7_5} - X_{6_8_5} - X_{6_9_5} - X_{6_10_5} - X_{6_11_5} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{2_1_1} + X_{2_3_1} + X_{2_4_1} + X_{2_5_1} + X_{2_6_1} + X_{2_7_1} + X_{2_8_1} + X_{2_9_1} + X_{2_10_1} \\
& - X_{7_1_1} - X_{7_3_1} - X_{7_4_1} - X_{7_5_1} - X_{7_6_1} - X_{7_8_1} - X_{7_9_1} - X_{7_10_1} - X_{7_11_1} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{2_1_2} + X_{2_3_2} + X_{2_4_2} + X_{2_5_2} + X_{2_6_2} + X_{2_7_2} + X_{2_8_2} + X_{2_9_2} + X_{2_10_2} \\
& - X_{7_1_2} - X_{7_3_2} - X_{7_4_2} - X_{7_5_2} - X_{7_6_2} - X_{7_8_2} - X_{7_9_2} - X_{7_10_2} - X_{7_11_2} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{2_1_3} + X_{2_3_3} + X_{2_4_3} + X_{2_5_3} + X_{2_6_3} + X_{2_7_3} + X_{2_8_3} + X_{2_9_3} + X_{2_10_3} \\
& - X_{7_1_3} - X_{7_3_3} - X_{7_4_3} - X_{7_5_3} - X_{7_6_3} - X_{7_8_3} - X_{7_9_3} - X_{7_10_3} - X_{7_11_3} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{2_1_4} + X_{2_3_4} + X_{2_4_4} + X_{2_5_4} + X_{2_6_4} + X_{2_7_4} + X_{2_8_4} + X_{2_9_4} + X_{2_10_4} \\
& - X_{7_1_4} - X_{7_3_4} - X_{7_4_4} - X_{7_5_4} - X_{7_6_4} - X_{7_8_4} - X_{7_9_4} - X_{7_10_4} - X_{7_11_4} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{2_1_5} + X_{2_3_5} + X_{2_4_5} + X_{2_5_5} + X_{2_6_5} + X_{2_7_5} + X_{2_8_5} + X_{2_9_5} + X_{2_10_5} \\
& - X_{7_1_5} - X_{7_3_5} - X_{7_4_5} - X_{7_5_5} - X_{7_6_5} - X_{7_8_5} - X_{7_9_5} - X_{7_10_5} - X_{7_11_5} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{3_1_1} + X_{3_2_1} + X_{3_4_1} + X_{3_5_1} + X_{3_6_1} + X_{3_7_1} + X_{3_8_1} + X_{3_9_1} + X_{3_10_1} \\
& - X_{8_1_1} - X_{8_2_1} - X_{8_4_1} - X_{8_5_1} - X_{8_6_1} - X_{8_7_1} - X_{8_9_1} - X_{8_10_1} - X_{8_11_1} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{3_1_2} + X_{3_2_2} + X_{3_4_2} + X_{3_5_2} + X_{3_6_2} + X_{3_7_2} + X_{3_8_2} + X_{3_9_2} + X_{3_10_2} \\
& - X_{8_1_2} - X_{8_2_2} - X_{8_4_2} - X_{8_5_2} - X_{8_6_2} - X_{8_7_2} - X_{8_9_2} - X_{8_10_2} - X_{8_11_2} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{3_1_3} + X_{3_2_3} + X_{3_4_3} + X_{3_5_3} + X_{3_6_3} + X_{3_7_3} + X_{3_8_3} + X_{3_9_3} + X_{3_10_3} \\
& - X_{8_1_3} - X_{8_2_3} - X_{8_4_3} - X_{8_5_3} - X_{8_6_3} - X_{8_7_3} - X_{8_9_3} - X_{8_10_3} - X_{8_11_3} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{3_1_4} + X_{3_2_4} + X_{3_4_4} + X_{3_5_4} + X_{3_6_4} + X_{3_7_4} + X_{3_8_4} + X_{3_9_4} + X_{3_10_4} \\
& - X_{8_1_4} - X_{8_2_4} - X_{8_4_4} - X_{8_5_4} - X_{8_6_4} - X_{8_7_4} - X_{8_9_4} - X_{8_10_4} - X_{8_11_4} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{3_1_5} + X_{3_2_5} + X_{3_4_5} + X_{3_5_5} + X_{3_6_5} + X_{3_7_5} + X_{3_8_5} + X_{3_9_5} + X_{3_10_5} \\
& - X_{8_1_5} - X_{8_2_5} - X_{8_4_5} - X_{8_5_5} - X_{8_6_5} - X_{8_7_5} - X_{8_9_5} - X_{8_10_5} - X_{8_11_5} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$X_{4_1_1} + X_{4_2_1} + X_{4_3_1} + X_{4_5_1} + X_{4_6_1} + X_{4_7_1} + X_{4_8_1} + X_{4_9_1} + X_{4_10_1} \\ - X_{9_1_1} - X_{9_2_1} - X_{9_3_1} - X_{9_5_1} - X_{9_6_1} - X_{9_7_1} - X_{9_8_1} - X_{9_10_1} - X_{9_11_1} \\ = 0$$

$$X_{4_1_2} + X_{4_2_2} + X_{4_3_2} + X_{4_5_2} + X_{4_6_2} + X_{4_7_2} + X_{4_8_2} + X_{4_9_2} + X_{4_10_2} \\ - X_{9_1_2} - X_{9_2_2} - X_{9_3_2} - X_{9_5_2} - X_{9_6_2} - X_{9_7_2} - X_{9_8_2} - X_{9_10_2} - X_{9_11_2} \\ = 0$$

$$X_{4_1_3} + X_{4_2_3} + X_{4_3_3} + X_{4_5_3} + X_{4_6_3} + X_{4_7_3} + X_{4_8_3} + X_{4_9_3} + X_{4_10_3} \\ - X_{9_1_3} - X_{9_2_3} - X_{9_3_3} - X_{9_5_3} - X_{9_6_3} - X_{9_7_3} - X_{9_8_3} - X_{9_10_3} - X_{9_11_3} \\ = 0$$

$$X_{4_1_4} + X_{4_2_4} + X_{4_3_4} + X_{4_5_4} + X_{4_6_4} + X_{4_7_4} + X_{4_8_4} + X_{4_9_4} + X_{4_10_4} \\ - X_{9_1_4} - X_{9_2_4} - X_{9_3_4} - X_{9_5_4} - X_{9_6_4} - X_{9_7_4} - X_{9_8_4} - X_{9_10_4} - X_{9_11_4} \\ = 0$$

$$X_{4_1_5} + X_{4_2_5} + X_{4_3_5} + X_{4_5_5} + X_{4_6_5} + X_{4_7_5} + X_{4_8_5} + X_{4_9_5} + X_{4_10_5} \\ - X_{9_1_5} - X_{9_2_5} - X_{9_3_5} - X_{9_5_5} - X_{9_6_5} - X_{9_7_5} - X_{9_8_5} - X_{9_10_5} - X_{9_11_5} \\ = 0$$

$$X_{5_1_1} + X_{5_2_1} + X_{5_3_1} + X_{5_4_1} + X_{5_6_1} + X_{5_7_1} + X_{5_8_1} + X_{5_9_1} + X_{5_10_1} \\ - X_{10_1_1} - X_{10_2_1} - X_{10_3_1} - X_{10_4_1} - X_{10_6_1} - X_{10_7_1} - X_{10_8_1} - X_{10_9_1} - \\ X_{10_11_1} = 0$$

$$X_{5_1_2} + X_{5_2_2} + X_{5_3_2} + X_{5_4_2} + X_{5_6_2} + X_{5_7_2} + X_{5_8_2} + X_{5_9_2} + X_{5_10_2} \\ - X_{10_1_2} - X_{10_2_2} - X_{10_3_2} - X_{10_4_2} - X_{10_6_2} - X_{10_7_2} - X_{10_8_2} - X_{10_9_2} - \\ X_{10_11_2} = 0$$

$$X_{5_1_3} + X_{5_2_3} + X_{5_3_3} + X_{5_4_3} + X_{5_6_3} + X_{5_7_3} + X_{5_8_3} + X_{5_9_3} + X_{5_10_3} \\ - X_{10_1_3} - X_{10_2_3} - X_{10_3_3} - X_{10_4_3} - X_{10_6_3} - X_{10_7_3} - X_{10_8_3} - X_{10_9_3} - \\ X_{10_11_3} = 0$$

$$X_{5_1_4} + X_{5_2_4} + X_{5_3_4} + X_{5_4_4} + X_{5_6_4} + X_{5_7_4} + X_{5_8_4} + X_{5_9_4} + X_{5_10_4} \\ - X_{10_1_4} - X_{10_2_4} - X_{10_3_4} - X_{10_4_4} - X_{10_6_4} - X_{10_7_4} - X_{10_8_4} - X_{10_9_4} - \\ X_{10_11_4} = 0$$

$$X_{5_1_5} + X_{5_2_5} + X_{5_3_5} + X_{5_4_5} + X_{5_6_5} + X_{5_7_5} + X_{5_8_5} + X_{5_9_5} + X_{5_10_5} \\ - X_{10_1_5} - X_{10_2_5} - X_{10_3_5} - X_{10_4_5} - X_{10_6_5} - X_{10_7_5} - X_{10_8_5} - X_{10_9_5} - \\ X_{10_11_5} = 0$$

Restrições são responsáveis pela contenção de fluxo

As restrições (47) e (48) são responsáveis pela contenção de fluxo, ou seja, o número de máquinas que entra nos veículos de transporte é igual ao número que sai desses veículos. Esta restrição evita que os veículos fiquem parados em um nó qualquer.

$$\sum_{j \in \left\{ \begin{smallmatrix} P \cup D \cup \{g_k\} \\ j \neq i; j \neq n+i \end{smallmatrix} \right\}} x_{j,i}^k - \sum_{j \in \left\{ \begin{smallmatrix} P \cup D \\ j \neq i \end{smallmatrix} \right\}} x_{i,j}^k = 0 \quad \forall i \in P, k \in K \quad (47)$$

$$X_{2_1_1} + X_{3_1_1} + X_{4_1_1} + X_{5_1_1} + X_{7_1_1} + X_{8_1_1} + X_{9_1_1} + X_{10_1_1} + X_{0_1_1} - X_{1_2_1} - X_{1_3_1} - X_{1_4_1} - X_{1_5_1} - X_{1_6_1} - X_{1_7_1} - X_{1_8_1} - X_{1_9_1} - X_{1_10_1} = 0$$

$$X_{2_1_2} + X_{3_1_2} + X_{4_1_2} + X_{5_1_2} + X_{7_1_2} + X_{8_1_2} + X_{9_1_2} + X_{10_1_2} + X_{0_1_2} - X_{1_2_2} - X_{1_3_2} - X_{1_4_2} - X_{1_5_2} - X_{1_6_2} - X_{1_7_2} - X_{1_8_2} - X_{1_9_2} - X_{1_10_2} = 0$$

$$X_{2_1_3} + X_{3_1_3} + X_{4_1_3} + X_{5_1_3} + X_{7_1_3} + X_{8_1_3} + X_{9_1_3} + X_{10_1_3} + X_{0_1_3} - X_{1_2_3} - X_{1_3_3} - X_{1_4_3} - X_{1_5_3} - X_{1_6_3} - X_{1_7_3} - X_{1_8_3} - X_{1_9_3} - X_{1_10_3} = 0$$

$$X_{2_1_4} + X_{3_1_4} + X_{4_1_4} + X_{5_1_4} + X_{7_1_4} + X_{8_1_4} + X_{9_1_4} + X_{10_1_4} + X_{0_1_4} - X_{1_2_4} - X_{1_3_4} - X_{1_4_4} - X_{1_5_4} - X_{1_6_4} - X_{1_7_4} - X_{1_8_4} - X_{1_9_4} - X_{1_10_4} = 0$$

$$X_{2_1_5} + X_{3_1_5} + X_{4_1_5} + X_{5_1_5} + X_{7_1_5} + X_{8_1_5} + X_{9_1_5} + X_{10_1_5} + X_{0_1_5} - X_{1_2_5} - X_{1_3_5} - X_{1_4_5} - X_{1_5_5} - X_{1_6_5} - X_{1_7_5} - X_{1_8_5} - X_{1_9_5} - X_{1_10_5} = 0$$

$$X_{1_2_1} + X_{3_2_1} + X_{4_2_1} + X_{5_2_1} + X_{6_2_1} + X_{8_2_1} + X_{9_2_1} + X_{10_2_1} + X_{0_2_1} - X_{2_1_1} - X_{2_3_1} - X_{2_4_1} - X_{2_5_1} - X_{2_6_1} - X_{2_7_1} - X_{2_8_1} - X_{2_9_1} - X_{2_10_1} = 0$$

$$X_{1_2_2} + X_{3_2_2} + X_{4_2_2} + X_{5_2_2} + X_{6_2_2} + X_{8_2_2} + X_{9_2_2} + X_{10_2_2} + X_{0_2_2} - X_{2_1_2} - X_{2_3_2} - X_{2_4_2} - X_{2_5_2} - X_{2_6_2} - X_{2_7_2} - X_{2_8_2} - X_{2_9_2} - X_{2_10_2} = 0$$

$$X_{1_2_3} + X_{3_2_3} + X_{4_2_3} + X_{5_2_3} + X_{6_2_3} + X_{8_2_3} + X_{9_2_3} + X_{10_2_3} + X_{0_2_3} - X_{2_1_3} - X_{2_3_3} - X_{2_4_3} - X_{2_5_3} - X_{2_6_3} - X_{2_7_3} - X_{2_8_3} - X_{2_9_3} - X_{2_10_3} = 0$$

$$X_{1_2_4} + X_{3_2_4} + X_{4_2_4} + X_{5_2_4} + X_{6_2_4} + X_{8_2_4} + X_{9_2_4} + X_{10_2_4} + X_{0_2_4} - X_{2_1_4} - X_{2_3_4} - X_{2_4_4} - X_{2_5_4} - X_{2_6_4} - X_{2_7_4} - X_{2_8_4} - X_{2_9_4} - X_{2_10_4} = 0$$

$$X_{1_2_5} + X_{3_2_5} + X_{4_2_5} + X_{5_2_5} + X_{6_2_5} + X_{8_2_5} + X_{9_2_5} + X_{10_2_5} + X_{0_2_5} - X_{2_1_5} - X_{2_3_5} - X_{2_4_5} - X_{2_5_5} - X_{2_6_5} - X_{2_7_5} - X_{2_8_5} - X_{2_9_5} - X_{2_10_5} = 0$$

$$X_{1_3_1} + X_{2_3_1} + X_{4_3_1} + X_{5_3_1} + X_{6_3_1} + X_{7_3_1} + X_{9_3_1} + X_{10_3_1} + X_{0_3_1} - X_{3_1_1} - X_{3_2_1} - X_{3_4_1} - X_{3_5_1} - X_{3_6_1} - X_{3_7_1} - X_{3_8_1} - X_{3_9_1} - X_{3_10_1} = 0$$

$$X_{1_3_2} + X_{2_3_2} + X_{4_3_2} + X_{5_3_2} + X_{6_3_2} + X_{7_3_2} + X_{9_3_2} + X_{10_3_2} + X_{0_3_2} \\ - X_{3_1_2} - X_{3_2_2} - X_{3_4_2} - X_{3_5_2} - X_{3_6_2} - X_{3_7_2} - X_{3_8_2} - X_{3_9_2} - X_{3_{10}_2} = 0$$

$$X_{1_3_3} + X_{2_3_3} + X_{4_3_3} + X_{5_3_3} + X_{6_3_3} + X_{7_3_3} + X_{9_3_3} + X_{10_3_3} + X_{0_3_3} \\ - X_{3_1_3} - X_{3_2_3} - X_{3_4_3} - X_{3_5_3} - X_{3_6_3} - X_{3_7_3} - X_{3_8_3} - X_{3_9_3} - X_{3_{10}_3} = 0$$

$$X_{1_3_4} + X_{2_3_4} + X_{4_3_4} + X_{5_3_4} + X_{6_3_4} + X_{7_3_4} + X_{9_3_4} + X_{10_3_4} + X_{0_3_4} \\ - X_{3_1_4} - X_{3_2_4} - X_{3_4_4} - X_{3_5_4} - X_{3_6_4} - X_{3_7_4} - X_{3_8_4} - X_{3_9_4} - X_{3_{10}_4} = 0$$

$$X_{1_3_5} + X_{2_3_5} + X_{4_3_5} + X_{5_3_5} + X_{6_3_5} + X_{7_3_5} + X_{9_3_5} + X_{10_3_5} + X_{0_3_5} \\ - X_{3_1_5} - X_{3_2_5} - X_{3_4_5} - X_{3_5_5} - X_{3_6_5} - X_{3_7_5} - X_{3_8_5} - X_{3_9_5} - X_{3_{10}_5} = 0$$

$$X_{1_4_1} + X_{2_4_1} + X_{3_4_1} + X_{5_4_1} + X_{6_4_1} + X_{7_4_1} + X_{8_4_1} + X_{10_4_1} + X_{0_4_1} \\ - X_{4_1_1} - X_{4_2_1} - X_{4_3_1} - X_{4_5_1} - X_{4_6_1} - X_{4_7_1} - X_{4_8_1} - X_{4_9_1} - X_{4_{10}_1} = 0$$

$$X_{1_4_2} + X_{2_4_2} + X_{3_4_2} + X_{5_4_2} + X_{6_4_2} + X_{7_4_2} + X_{8_4_2} + X_{10_4_2} + X_{0_4_2} \\ - X_{4_1_2} - X_{4_2_2} - X_{4_3_2} - X_{4_5_2} - X_{4_6_2} - X_{4_7_2} - X_{4_8_2} - X_{4_9_2} - X_{4_{10}_2} = 0$$

$$X_{1_4_3} + X_{2_4_3} + X_{3_4_3} + X_{5_4_3} + X_{6_4_3} + X_{7_4_3} + X_{8_4_3} + X_{10_4_3} + X_{0_4_3} \\ - X_{4_1_3} - X_{4_2_3} - X_{4_3_3} - X_{4_5_3} - X_{4_6_3} - X_{4_7_3} - X_{4_8_3} - X_{4_9_3} - X_{4_{10}_3} = 0$$

$$X_{1_4_4} + X_{2_4_4} + X_{3_4_4} + X_{5_4_4} + X_{6_4_4} + X_{7_4_4} + X_{8_4_4} + X_{10_4_4} + X_{0_4_4} \\ - X_{4_1_4} - X_{4_2_4} - X_{4_3_4} - X_{4_5_4} - X_{4_6_4} - X_{4_7_4} - X_{4_8_4} - X_{4_9_4} - X_{4_{10}_4} = 0$$

$$X_{1_4_5} + X_{2_4_5} + X_{3_4_5} + X_{5_4_5} + X_{6_4_5} + X_{7_4_5} + X_{8_4_5} + X_{10_4_5} + X_{0_4_5} \\ - X_{4_1_5} - X_{4_2_5} - X_{4_3_5} - X_{4_5_5} - X_{4_6_5} - X_{4_7_5} - X_{4_8_5} - X_{4_9_5} - X_{4_{10}_5} = 0$$

$$X_{1_5_1} + X_{2_5_1} + X_{3_5_1} + X_{4_5_1} + X_{6_5_1} + X_{7_5_1} + X_{8_5_1} + X_{9_5_1} + X_{0_5_1} \\ - X_{5_1_1} - X_{5_2_1} - X_{5_3_1} - X_{5_4_1} - X_{5_6_1} - X_{5_7_1} - X_{5_8_1} - X_{5_9_1} - X_{5_{10}_1} = 0$$

$$X_{1_5_2} + X_{2_5_2} + X_{3_5_2} + X_{4_5_2} + X_{6_5_2} + X_{7_5_2} + X_{8_5_2} + X_{9_5_2} + X_{0_5_2} \\ - X_{5_1_2} - X_{5_2_2} - X_{5_3_2} - X_{5_4_2} - X_{5_6_2} - X_{5_7_2} - X_{5_8_2} - X_{5_9_2} - X_{5_{10}_2} = 0$$

$$X_{1_5_3} + X_{2_5_3} + X_{3_5_3} + X_{4_5_3} + X_{6_5_3} + X_{7_5_3} + X_{8_5_3} + X_{9_5_3} + X_{0_5_3} \\ - X_{5_1_3} - X_{5_2_3} - X_{5_3_3} - X_{5_4_3} - X_{5_6_3} - X_{5_7_3} - X_{5_8_3} - X_{5_9_3} - X_{5_{10}_3} = 0$$

$$X_{1_5_4} + X_{2_5_4} + X_{3_5_4} + X_{4_5_4} + X_{6_5_4} + X_{7_5_4} + X_{8_5_4} + X_{9_5_4} + X_{0_5_4} \\ - X_{5_1_4} - X_{5_2_4} - X_{5_3_4} - X_{5_4_4} - X_{5_6_4} - X_{5_7_4} - X_{5_8_4} - X_{5_9_4} - X_{5_{10}_4} = 0$$

$$X_{1_5_5} + X_{2_5_5} + X_{3_5_5} + X_{4_5_5} + X_{6_5_5} + X_{7_5_5} + X_{8_5_5} + X_{9_5_5} + X_{0_5_5} \\ - X_{5_1_5} - X_{5_2_5} - X_{5_3_5} - X_{5_4_5} - X_{5_6_5} - X_{5_7_5} - X_{5_8_5} - X_{5_9_5} - X_{5_10_5} = \\ 0$$

$$\sum_{j \in \left\{ \begin{smallmatrix} P \cup D \\ j \neq i \end{smallmatrix} \right\}} x_{j,i}^k - \sum_{j \in \left\{ \begin{smallmatrix} P \cup D \cup \{g_k^+\} \\ j \neq i; j \neq n-i \end{smallmatrix} \right\}} x_{i,j}^k = 0 \quad \forall i \in D, k \in K \quad (48)$$

$$X_{1_6_1} + X_{2_6_1} + X_{3_6_1} + X_{4_6_1} + X_{5_6_1} + X_{7_6_1} + X_{8_6_1} + X_{9_6_1} + X_{10_6_1} \\ - X_{6_1_1} - X_{6_2_1} - X_{6_3_1} - X_{6_4_1} - X_{6_5_1} - X_{6_7_1} - X_{6_8_1} - X_{6_9_1} - X_{6_10_1} - \\ X_{6_11_1} = 0$$

$$X_{1_6_2} + X_{2_6_2} + X_{3_6_2} + X_{4_6_2} + X_{5_6_2} + X_{7_6_2} + X_{8_6_2} + X_{9_6_2} + X_{10_6_2} \\ - X_{6_1_2} - X_{6_2_2} - X_{6_3_2} - X_{6_4_2} - X_{6_5_2} - X_{6_7_2} - X_{6_8_2} - X_{6_9_2} - X_{6_10_2} - \\ X_{6_11_2} = 0$$

$$X_{1_6_3} + X_{2_6_3} + X_{3_6_3} + X_{4_6_3} + X_{5_6_3} + X_{7_6_3} + X_{8_6_3} + X_{9_6_3} + X_{10_6_3} \\ - X_{6_1_3} - X_{6_2_3} - X_{6_3_3} - X_{6_4_3} - X_{6_5_3} - X_{6_7_3} - X_{6_8_3} - X_{6_9_3} - X_{6_10_3} - \\ X_{6_11_3} = 0$$

$$X_{1_6_4} + X_{2_6_4} + X_{3_6_4} + X_{4_6_4} + X_{5_6_4} + X_{7_6_4} + X_{8_6_4} + X_{9_6_4} + X_{10_6_4} \\ - X_{6_1_4} - X_{6_2_4} - X_{6_3_4} - X_{6_4_4} - X_{6_5_4} - X_{6_7_4} - X_{6_8_4} - X_{6_9_4} - X_{6_10_4} - \\ X_{6_11_4} = 0$$

$$X_{1_6_5} + X_{2_6_5} + X_{3_6_5} + X_{4_6_5} + X_{5_6_5} + X_{7_6_5} + X_{8_6_5} + X_{9_6_5} + X_{10_6_5} \\ - X_{6_1_5} - X_{6_2_5} - X_{6_3_5} - X_{6_4_5} - X_{6_5_5} - X_{6_7_5} - X_{6_8_5} - X_{6_9_5} - X_{6_10_5} - \\ X_{6_11_5} = 0$$

$$X_{1_7_1} + X_{2_7_1} + X_{3_7_1} + X_{4_7_1} + X_{5_7_1} + X_{6_7_1} + X_{8_7_1} + X_{9_7_1} + X_{10_7_1} \\ - X_{7_1_1} - X_{7_2_1} - X_{7_3_1} - X_{7_4_1} - X_{7_5_1} - X_{7_6_1} - X_{7_8_1} - X_{7_9_1} - X_{7_10_1} - \\ X_{7_11_1} = 0$$

$$X_{1_7_2} + X_{2_7_2} + X_{3_7_2} + X_{4_7_2} + X_{5_7_2} + X_{6_7_2} + X_{8_7_2} + X_{9_7_2} + X_{10_7_2} \\ - X_{7_1_2} - X_{7_2_2} - X_{7_3_2} - X_{7_4_2} - X_{7_5_2} - X_{7_6_2} - X_{7_8_2} - X_{7_9_2} - X_{7_10_2} - \\ X_{7_11_2} = 0$$

$$X_{1_7_3} + X_{2_7_3} + X_{3_7_3} + X_{4_7_3} + X_{5_7_3} + X_{6_7_3} + X_{8_7_3} + X_{9_7_3} + X_{10_7_3} \\ - X_{7_1_3} - X_{7_2_3} - X_{7_3_3} - X_{7_4_3} - X_{7_5_3} - X_{7_6_3} - X_{7_8_3} - X_{7_9_3} - X_{7_10_3} - \\ X_{7_11_3} = 0$$

$$X_{1_7_4} + X_{2_7_4} + X_{3_7_4} + X_{4_7_4} + X_{5_7_4} + X_{6_7_4} + X_{8_7_4} + X_{9_7_4} + X_{10_7_4} \\ - X_{7_1_4} - X_{7_2_4} - X_{7_3_4} - X_{7_4_4} - X_{7_5_4} - X_{7_6_4} - X_{7_8_4} - X_{7_9_4} - X_{7_10_4} - \\ X_{7_11_4} = 0$$

$$X_{1_7_5} + X_{2_7_5} + X_{3_7_5} + X_{4_7_5} + X_{5_7_5} + X_{6_7_5} + X_{8_7_5} + X_{9_7_5} + X_{10_7_5} \\ - X_{7_1_5} - X_{7_2_5} - X_{7_3_5} - X_{7_4_5} - X_{7_5_5} - X_{7_6_5} - X_{7_8_5} - X_{7_9_5} - X_{7_10_5} - \\ X_{7_11_5} = 0$$

$$X_{1_8_1} + X_{2_8_1} + X_{3_8_1} + X_{4_8_1} + X_{5_8_1} + X_{6_8_1} + X_{7_8_1} + X_{9_8_1} + X_{10_8_1} \\ - X_{8_1_1} - X_{8_2_1} - X_{8_3_1} - X_{8_4_1} - X_{8_5_1} - X_{8_6_1} - X_{8_7_1} - X_{8_9_1} - X_{8_{10}_1} - \\ X_{8_{11}_1} = 0$$

$$X_{1_8_2} + X_{2_8_2} + X_{3_8_2} + X_{4_8_2} + X_{5_8_2} + X_{6_8_2} + X_{7_8_2} + X_{9_8_2} + X_{10_8_2} \\ - X_{8_1_2} - X_{8_2_2} - X_{8_3_2} - X_{8_4_2} - X_{8_5_2} - X_{8_6_2} - X_{8_7_2} - X_{8_9_2} - X_{8_{10}_2} - \\ X_{8_{11}_2} = 0$$

$$X_{1_8_3} + X_{2_8_3} + X_{3_8_3} + X_{4_8_3} + X_{5_8_3} + X_{6_8_3} + X_{7_8_3} + X_{9_8_3} + X_{10_8_3} \\ - X_{8_1_3} - X_{8_2_3} - X_{8_3_3} - X_{8_4_3} - X_{8_5_3} - X_{8_6_3} - X_{8_7_3} - X_{8_9_3} - X_{8_{10}_3} - \\ X_{8_{11}_3} = 0$$

$$X_{1_8_4} + X_{2_8_4} + X_{3_8_4} + X_{4_8_4} + X_{5_8_4} + X_{6_8_4} + X_{7_8_4} + X_{9_8_4} + X_{10_8_4} \\ - X_{8_1_4} - X_{8_2_4} - X_{8_3_4} - X_{8_4_4} - X_{8_5_4} - X_{8_6_4} - X_{8_7_4} - X_{8_9_4} - X_{8_{10}_4} - \\ X_{8_{11}_4} = 0$$

$$X_{1_8_5} + X_{2_8_5} + X_{3_8_5} + X_{4_8_5} + X_{5_8_5} + X_{6_8_5} + X_{7_8_5} + X_{9_8_5} + X_{10_8_5} \\ - X_{8_1_5} - X_{8_2_5} - X_{8_3_5} - X_{8_4_5} - X_{8_5_5} - X_{8_6_5} - X_{8_7_5} - X_{8_9_5} - X_{8_{10}_5} - \\ X_{8_{11}_5} = 0$$

$$X_{1_9_1} + X_{2_9_1} + X_{3_9_1} + X_{4_9_1} + X_{5_9_1} + X_{6_9_1} + X_{7_9_1} + X_{8_9_1} + X_{10_9_1} \\ - X_{9_1_1} - X_{9_2_1} - X_{9_3_1} - X_{9_4_1} - X_{9_5_1} - X_{9_6_1} - X_{9_7_1} - X_{9_8_1} - X_{9_{10}_1} - \\ X_{9_{11}_1} = 0$$

$$X_{1_9_2} + X_{2_9_2} + X_{3_9_2} + X_{4_9_2} + X_{5_9_2} + X_{6_9_2} + X_{7_9_2} + X_{8_9_2} + X_{10_9_2} \\ - X_{9_1_2} - X_{9_2_2} - X_{9_3_2} - X_{9_4_2} - X_{9_5_2} - X_{9_6_2} - X_{9_7_2} - X_{9_8_2} - X_{9_{10}_2} - \\ X_{9_{11}_2} = 0$$

$$X_{1_9_3} + X_{2_9_3} + X_{3_9_3} + X_{4_9_3} + X_{5_9_3} + X_{6_9_3} + X_{7_9_3} + X_{8_9_3} + X_{10_9_3} \\ - X_{9_1_3} - X_{9_2_3} - X_{9_3_3} - X_{9_4_3} - X_{9_5_3} - X_{9_6_3} - X_{9_7_3} - X_{9_8_3} - X_{9_{10}_3} - \\ X_{9_{11}_3} = 0$$

$$X_{1_9_4} + X_{2_9_4} + X_{3_9_4} + X_{4_9_4} + X_{5_9_4} + X_{6_9_4} + X_{7_9_4} + X_{8_9_4} + X_{10_9_4} \\ - X_{9_1_4} - X_{9_2_4} - X_{9_3_4} - X_{9_4_4} - X_{9_5_4} - X_{9_6_4} - X_{9_7_4} - X_{9_8_4} - X_{9_{10}_4} - \\ X_{9_{11}_4} = 0$$

$$X_{1_9_5} + X_{2_9_5} + X_{3_9_5} + X_{4_9_5} + X_{5_9_5} + X_{6_9_5} + X_{7_9_5} + X_{8_9_5} + X_{10_9_5} \\ - X_{9_1_5} - X_{9_2_5} - X_{9_3_5} - X_{9_4_5} - X_{9_5_5} - X_{9_6_5} - X_{9_7_5} - X_{9_8_5} - X_{9_{10}_5} - \\ X_{9_{11}_5} = 0$$

$$X_{1_{10}_1} + X_{2_{10}_1} + X_{3_{10}_1} + X_{4_{10}_1} + X_{5_{10}_1} + X_{6_{10}_1} + X_{7_{10}_1} + X_{8_{10}_1} + \\ X_{9_{10}_1} - X_{10_1_1} - X_{10_2_1} - X_{10_3_1} - X_{10_4_1} - X_{10_5_1} - X_{10_6_1} - X_{10_7_1} - \\ X_{10_8_1} - X_{10_9_1} - X_{10_{11}_1} = 0$$

$$X_{1_{10}_2} + X_{2_{10}_2} + X_{3_{10}_2} + X_{4_{10}_2} + X_{5_{10}_2} + X_{6_{10}_2} + X_{7_{10}_2} + X_{8_{10}_2} + \\ X_{9_{10}_2} - X_{10_1_2} - X_{10_2_2} - X_{10_3_2} - X_{10_4_2} - X_{10_5_2} - X_{10_6_2} - X_{10_7_2} - \\ X_{10_8_2} - X_{10_9_2} - X_{10_{11}_2} = 0$$

$$X_{1_{10}_3} + X_{2_{10}_3} + X_{3_{10}_3} + X_{4_{10}_3} + X_{5_{10}_3} + X_{6_{10}_3} + X_{7_{10}_3} + X_{8_{10}_3} + \\ X_{9_{10}_3} - X_{10_1_3} - X_{10_2_3} - X_{10_3_3} - X_{10_4_3} - X_{10_5_3} - X_{10_6_3} - X_{10_7_3} - \\ X_{10_8_3} - X_{10_9_3} - X_{10_{11}_3} = 0$$

$$X_{1_10_4} + X_{2_10_4} + X_{3_10_4} + X_{4_10_4} + X_{5_10_4} + X_{6_10_4} + X_{7_10_4} + X_{8_10_4} + X_{9_10_4} - X_{10_1_4} - X_{10_2_4} - X_{10_3_4} - X_{10_4_4} - X_{10_5_4} - X_{10_6_4} - X_{10_7_4} - X_{10_8_4} - X_{10_9_4} - X_{10_11_4} = 0$$

$$X_{1_10_5} + X_{2_10_5} + X_{3_10_5} + X_{4_10_5} + X_{5_10_5} + X_{6_10_5} + X_{7_10_5} + X_{8_10_5} + X_{9_10_5} - X_{10_1_5} - X_{10_2_5} - X_{10_3_5} - X_{10_4_5} - X_{10_5_5} - X_{10_6_5} - X_{10_7_5} - X_{10_8_5} - X_{10_9_5} - X_{10_11_5} = 0$$

Restrição que garante que o horário de entrega deve ser maior que o horário de coleta acrescido do tempo de serviço e do tempo de deslocamento entre os pontos

A restrição (49) garante que se o veículo k utiliza o arco (i, j) , de modo que $X_{i,j}^k = 1$ então, o instante de tempo em que o veículo k inicia o serviço no nó j de entrega deve ser maior que o instante de tempo em que o mesmo veículo iniciou o serviço no nó de coleta i , acrescido do período de tempo para realização desse serviço d_i de 30 minutos (carreamento e descarregamento das máquinas) e do período de tempo de viagem $t_{i,j}$ entre o nó i ao nó j .

$$B_j \geq B_i + d_i + t_{i,j} - M_{i,j}(1 - x_{i,j}^k) \quad \forall \quad i, j \in N, i \neq j, \quad k \in K \quad (49)$$

A validade dessas restrições é assegurada pelas inequações $M_{i,j}^k \geq \max\{0, B_i + d_i + t_{i,j} - e_j\}$. Como forma de simplificação foi atribuído um valor “infinito” a essa constante $M_{i,j}^k = 9999$, sem ocasionar prejuízos e solução do problema.

$$\begin{aligned} B_0 - B_1 - 9999X_{1_0_1} &\geq -9901 \\ B_0 - B_2 - 9999X_{2_0_1} &\geq -9902 \\ B_0 - B_3 - 9999X_{3_0_1} &\geq -9917 \\ B_0 - B_4 - 9999X_{4_0_1} &\geq -9916 \\ B_0 - B_5 - 9999X_{5_0_1} &\geq -9914 \\ B_0 - B_6 - 9999X_{6_0_1} &\geq -9833 \\ B_0 - B_7 - 9999X_{7_0_1} &\geq -9946 \\ B_0 - B_8 - 9999X_{8_0_1} &\geq -9951 \\ B_0 - B_9 - 9999X_{9_0_1} &\geq -9949 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_0 - B_{10} - 9999X_{10_0_1} &\geq -9842 \\ B_0 - B_{11} - 9999X_{11_0_1} &\geq -9999 \\ B_1 - B_0 - 9999X_{0_1_1} &\geq -9931 \\ B_1 - B_2 - 9999X_{2_1_1} &\geq -9967 \\ B_1 - B_3 - 9999X_{3_1_1} &\geq -9951 \\ B_1 - B_4 - 9999X_{4_1_1} &\geq -9951 \\ B_1 - B_5 - 9999X_{5_1_1} &\geq -9905 \\ B_1 - B_6 - 9999X_{6_1_1} &\geq -9768 \\ B_1 - B_7 - 9999X_{7_1_1} &\geq -9882 \end{aligned}$$

B_1-B_8-9999X_8_1_1 >=-9886	B_5-B_3-9999X_3_5_1 >=-9921
B_1-B_9-9999X_9_1_1 >=-9884	B_5-B_4-9999X_4_5_1 >=-9921
B_1-B_10-9999X_10_1_1 >=-9778	B_5-B_6-9999X_6_5_1 >=-9780
B_1-B_11-9999X_11_1_1 >=-9931	B_5-B_7-9999X_7_5_1 >=-9894
B_2-B_0-9999X_0_2_1 >=-9932	B_5-B_8-9999X_8_5_1 >=-9900
B_2-B_1-9999X_1_2_1 >=-9967	B_5-B_9-9999X_9_5_1 >=-9897
B_2-B_3-9999X_3_2_1 >=-9951	B_5-B_10-9999X_10_5_1 >=-9791
B_2-B_4-9999X_4_2_1 >=-9951	B_5-B_11-9999X_11_5_1 >=-9944
B_2-B_5-9999X_5_2_1 >=-9906	B_6-B_0-9999X_0_6_1 >=-9863
B_2-B_6-9999X_6_2_1 >=-9768	B_6-B_1-9999X_1_6_1 >=-9768
B_2-B_7-9999X_7_2_1 >=-9882	B_6-B_2-9999X_2_6_1 >=-9768
B_2-B_8-9999X_8_2_1 >=-9888	B_6-B_3-9999X_3_6_1 >=-9783
B_2-B_9-9999X_9_2_1 >=-9885	B_6-B_4-9999X_4_6_1 >=-9783
B_2-B_10-9999X_10_2_1 >=-9779	B_6-B_5-9999X_5_6_1 >=-9780
B_2-B_11-9999X_11_2_1 >=-9932	B_6-B_7-9999X_7_6_1 >=-9822
B_3-B_0-9999X_0_3_1 >=-9947	B_6-B_8-9999X_8_6_1 >=-9827
B_3-B_1-9999X_1_3_1 >=-9951	B_6-B_9-9999X_9_6_1 >=-9825
B_3-B_2-9999X_2_3_1 >=-9951	B_6-B_10-9999X_10_6_1 >=-9956
B_3-B_4-9999X_4_3_1 >=-9968	B_6-B_11-9999X_11_6_1 >=-9863
B_3-B_5-9999X_5_3_1 >=-9921	B_7-B_0-9999X_0_7_1 >=-9976
B_3-B_6-9999X_6_3_1 >=-9783	B_7-B_1-9999X_1_7_1 >=-9882
B_3-B_7-9999X_7_3_1 >=-9897	B_7-B_2-9999X_2_7_1 >=-9882
B_3-B_8-9999X_8_3_1 >=-9903	B_7-B_3-9999X_3_7_1 >=-9897
B_3-B_9-9999X_9_3_1 >=-9901	B_7-B_4-9999X_4_7_1 >=-9897
B_3-B_10-9999X_10_3_1 >=-9793	B_7-B_5-9999X_5_7_1 >=-9894
B_3-B_11-9999X_11_3_1 >=-9947	B_7-B_6-9999X_6_7_1 >=-9822
B_4-B_0-9999X_0_4_1 >=-9946	B_7-B_8-9999X_8_7_1 >=-9959
B_4-B_1-9999X_1_4_1 >=-9951	B_7-B_9-9999X_9_7_1 >=-9962
B_4-B_2-9999X_2_4_1 >=-9951	B_7-B_10-9999X_10_7_1 >=-9833
B_4-B_3-9999X_3_4_1 >=-9968	B_7-B_11-9999X_11_7_1 >=-9976
B_4-B_5-9999X_5_4_1 >=-9921	B_8-B_0-9999X_0_8_1 >=-9981
B_4-B_6-9999X_6_4_1 >=-9783	B_8-B_1-9999X_1_8_1 >=-9886
B_4-B_7-9999X_7_4_1 >=-9897	B_8-B_2-9999X_2_8_1 >=-9888
B_4-B_8-9999X_8_4_1 >=-9903	B_8-B_3-9999X_3_8_1 >=-9903
B_4-B_9-9999X_9_4_1 >=-9901	B_8-B_4-9999X_4_8_1 >=-9903
B_4-B_10-9999X_10_4_1 >=-9793	B_8-B_5-9999X_5_8_1 >=-9900
B_4-B_11-9999X_11_4_1 >=-9946	B_8-B_6-9999X_6_8_1 >=-9827
B_5-B_0-9999X_0_5_1 >=-9944	B_8-B_7-9999X_7_8_1 >=-9959
B_5-B_1-9999X_1_5_1 >=-9905	B_8-B_9-9999X_9_8_1 >=-9962
B_5-B_2-9999X_2_5_1 >=-9906	B_8-B_10-9999X_10_8_1 >=-9837

B_8-B_11-9999X_11_8_1 >=-9981	B_0-B_7-9999X_7_0_2 >=-9946
B_9-B_0-9999X_0_9_1 >=-9979	B_0-B_8-9999X_8_0_2 >=-9951
B_9-B_1-9999X_1_9_1 >=-9884	B_0-B_9-9999X_9_0_2 >=-9949
B_9-B_2-9999X_2_9_1 >=-9885	B_0-B_10-9999X_10_0_2 >=-9842
B_9-B_3-9999X_3_9_1 >=-9901	B_0-B_11-9999X_11_0_2 >=-9999
B_9-B_4-9999X_4_9_1 >=-9901	B_1-B_0-9999X_0_1_2 >=-9931
B_9-B_5-9999X_5_9_1 >=-9897	B_1-B_2-9999X_2_1_2 >=-9967
B_9-B_6-9999X_6_9_1 >=-9825	B_1-B_3-9999X_3_1_2 >=-9951
B_9-B_7-9999X_7_9_1 >=-9962	B_1-B_4-9999X_4_1_2 >=-9951
B_9-B_8-9999X_8_9_1 >=-9962	B_1-B_5-9999X_5_1_2 >=-9905
B_9-B_10-9999X_10_9_1 >=-9835	B_1-B_6-9999X_6_1_2 >=-9768
B_9-B_11-9999X_11_9_1 >=-9979	B_1-B_7-9999X_7_1_2 >=-9882
B_10-B_0-9999X_0_10_1 >=-9872	B_1-B_8-9999X_8_1_2 >=-9886
B_10-B_1-9999X_1_10_1 >=-9778	B_1-B_9-9999X_9_1_2 >=-9884
B_10-B_2-9999X_2_10_1 >=-9779	B_1-B_10-9999X_10_1_2 >=-9778
B_10-B_3-9999X_3_10_1 >=-9793	B_1-B_11-9999X_11_1_2 >=-9931
B_10-B_4-9999X_4_10_1 >=-9793	B_2-B_0-9999X_0_2_2 >=-9932
B_10-B_5-9999X_5_10_1 >=-9791	B_2-B_1-9999X_1_2_2 >=-9967
B_10-B_6-9999X_6_10_1 >=-9956	B_2-B_3-9999X_3_2_2 >=-9951
B_10-B_7-9999X_7_10_1 >=-9833	B_2-B_4-9999X_4_2_2 >=-9951
B_10-B_8-9999X_8_10_1 >=-9837	B_2-B_5-9999X_5_2_2 >=-9906
B_10-B_9-9999X_9_10_1 >=-9835	B_2-B_6-9999X_6_2_2 >=-9768
B_10-B_11-9999X_11_10_1 >=-9872	B_2-B_7-9999X_7_2_2 >=-9882
B_11-B_0-9999X_0_11_1 >=-9999	B_2-B_8-9999X_8_2_2 >=-9888
B_11-B_1-9999X_1_11_1 >=-9901	B_2-B_9-9999X_9_2_2 >=-9885
B_11-B_2-9999X_2_11_1 >=-9902	B_2-B_10-9999X_10_2_2 >=-9779
B_11-B_3-9999X_3_11_1 >=-9917	B_2-B_11-9999X_11_2_2 >=-9932
B_11-B_4-9999X_4_11_1 >=-9916	B_3-B_0-9999X_0_3_2 >=-9947
B_11-B_5-9999X_5_11_1 >=-9914	B_3-B_1-9999X_1_3_2 >=-9951
B_11-B_6-9999X_6_11_1 >=-9833	B_3-B_2-9999X_2_3_2 >=-9951
B_11-B_7-9999X_7_11_1 >=-9946	B_3-B_4-9999X_4_3_2 >=-9968
B_11-B_8-9999X_8_11_1 >=-9951	B_3-B_5-9999X_5_3_2 >=-9921
B_11-B_9-9999X_9_11_1 >=-9949	B_3-B_6-9999X_6_3_2 >=-9783
B_11-B_10-9999X_10_11_1 >=-9842	B_3-B_7-9999X_7_3_2 >=-9897
B_0-B_1-9999X_1_0_2 >=-9901	B_3-B_8-9999X_8_3_2 >=-9903
B_0-B_2-9999X_2_0_2 >=-9902	B_3-B_9-9999X_9_3_2 >=-9901
B_0-B_3-9999X_3_0_2 >=-9917	B_3-B_10-9999X_10_3_2 >=-9793
B_0-B_4-9999X_4_0_2 >=-9916	B_3-B_11-9999X_11_3_2 >=-9947
B_0-B_5-9999X_5_0_2 >=-9914	B_4-B_0-9999X_0_4_2 >=-9946
B_0-B_6-9999X_6_0_2 >=-9833	B_4-B_1-9999X_1_4_2 >=-9951

B_4-B_2-9999X_2_4_2 >=-9951	B_7-B_10-9999X_10_7_2 >=-9833
B_4-B_3-9999X_3_4_2 >=-9968	B_7-B_11-9999X_11_7_2 >=-9976
B_4-B_5-9999X_5_4_2 >=-9921	B_8-B_0-9999X_0_8_2 >=-9981
B_4-B_6-9999X_6_4_2 >=-9783	B_8-B_1-9999X_1_8_2 >=-9886
B_4-B_7-9999X_7_4_2 >=-9897	B_8-B_2-9999X_2_8_2 >=-9888
B_4-B_8-9999X_8_4_2 >=-9903	B_8-B_3-9999X_3_8_2 >=-9903
B_4-B_9-9999X_9_4_2 >=-9901	B_8-B_4-9999X_4_8_2 >=-9903
B_4-B_10-9999X_10_4_2 >=-9793	B_8-B_5-9999X_5_8_2 >=-9900
B_4-B_11-9999X_11_4_2 >=-9946	B_8-B_6-9999X_6_8_2 >=-9827
B_5-B_0-9999X_0_5_2 >=-9944	B_8-B_7-9999X_7_8_2 >=-9959
B_5-B_1-9999X_1_5_2 >=-9905	B_8-B_9-9999X_9_8_2 >=-9962
B_5-B_2-9999X_2_5_2 >=-9906	B_8-B_10-9999X_10_8_2 >=-9837
B_5-B_3-9999X_3_5_2 >=-9921	B_8-B_11-9999X_11_8_2 >=-9981
B_5-B_4-9999X_4_5_2 >=-9921	B_9-B_0-9999X_0_9_2 >=-9979
B_5-B_6-9999X_6_5_2 >=-9780	B_9-B_1-9999X_1_9_2 >=-9884
B_5-B_7-9999X_7_5_2 >=-9894	B_9-B_2-9999X_2_9_2 >=-9885
B_5-B_8-9999X_8_5_2 >=-9900	B_9-B_3-9999X_3_9_2 >=-9901
B_5-B_9-9999X_9_5_2 >=-9897	B_9-B_4-9999X_4_9_2 >=-9901
B_5-B_10-9999X_10_5_2 >=-9791	B_9-B_5-9999X_5_9_2 >=-9897
B_5-B_11-9999X_11_5_2 >=-9944	B_9-B_6-9999X_6_9_2 >=-9825
B_6-B_0-9999X_0_6_2 >=-9863	B_9-B_7-9999X_7_9_2 >=-9962
B_6-B_1-9999X_1_6_2 >=-9768	B_9-B_8-9999X_8_9_2 >=-9962
B_6-B_2-9999X_2_6_2 >=-9768	B_9-B_10-9999X_10_9_2 >=-9835
B_6-B_3-9999X_3_6_2 >=-9783	B_9-B_11-9999X_11_9_2 >=-9979
B_6-B_4-9999X_4_6_2 >=-9783	B_10-B_0-9999X_0_10_2 >=-9872
B_6-B_5-9999X_5_6_2 >=-9780	B_10-B_1-9999X_1_10_2 >=-9778
B_6-B_7-9999X_7_6_2 >=-9822	B_10-B_2-9999X_2_10_2 >=-9779
B_6-B_8-9999X_8_6_2 >=-9827	B_10-B_3-9999X_3_10_2 >=-9793
B_6-B_9-9999X_9_6_2 >=-9825	B_10-B_4-9999X_4_10_2 >=-9793
B_6-B_10-9999X_10_6_2 >=-9956	B_10-B_5-9999X_5_10_2 >=-9791
B_6-B_11-9999X_11_6_2 >=-9863	B_10-B_6-9999X_6_10_2 >=-9956
B_7-B_0-9999X_0_7_2 >=-9976	B_10-B_7-9999X_7_10_2 >=-9833
B_7-B_1-9999X_1_7_2 >=-9882	B_10-B_8-9999X_8_10_2 >=-9837
B_7-B_2-9999X_2_7_2 >=-9882	B_10-B_9-9999X_9_10_2 >=-9835
B_7-B_3-9999X_3_7_2 >=-9897	B_10-B_11-9999X_11_10_2 >=-9872
B_7-B_4-9999X_4_7_2 >=-9897	B_11-B_0-9999X_0_11_2 >=-9999
B_7-B_5-9999X_5_7_2 >=-9894	B_11-B_1-9999X_1_11_2 >=-9901
B_7-B_6-9999X_6_7_2 >=-9822	B_11-B_2-9999X_2_11_2 >=-9902
B_7-B_8-9999X_8_7_2 >=-9959	B_11-B_3-9999X_3_11_2 >=-9917
B_7-B_9-9999X_9_7_2 >=-9962	B_11-B_4-9999X_4_11_2 >=-9916

B_11-B_5-9999X_5_11_2 >=-9914	B_3-B_1-9999X_1_3_3 >=-9951
B_11-B_6-9999X_6_11_2 >=-9833	B_3-B_2-9999X_2_3_3 >=-9951
B_11-B_7-9999X_7_11_2 >=-9946	B_3-B_4-9999X_4_3_3 >=-9968
B_11-B_8-9999X_8_11_2 >=-9951	B_3-B_5-9999X_5_3_3 >=-9921
B_11-B_9-9999X_9_11_2 >=-9949	B_3-B_6-9999X_6_3_3 >=-9783
B_11-B_10-9999X_10_11_2 >=-9842	B_3-B_7-9999X_7_3_3 >=-9897
B_0-B_1-9999X_1_0_3 >=-9901	B_3-B_8-9999X_8_3_3 >=-9903
B_0-B_2-9999X_2_0_3 >=-9902	B_3-B_9-9999X_9_3_3 >=-9901
B_0-B_3-9999X_3_0_3 >=-9917	B_3-B_10-9999X_10_3_3 >=-9793
B_0-B_4-9999X_4_0_3 >=-9916	B_3-B_11-9999X_11_3_3 >=-9947
B_0-B_5-9999X_5_0_3 >=-9914	B_4-B_0-9999X_0_4_3 >=-9946
B_0-B_6-9999X_6_0_3 >=-9833	B_4-B_1-9999X_1_4_3 >=-9951
B_0-B_7-9999X_7_0_3 >=-9946	B_4-B_2-9999X_2_4_3 >=-9951
B_0-B_8-9999X_8_0_3 >=-9951	B_4-B_3-9999X_3_4_3 >=-9968
B_0-B_9-9999X_9_0_3 >=-9949	B_4-B_5-9999X_5_4_3 >=-9921
B_0-B_10-9999X_10_0_3 >=-9842	B_4-B_6-9999X_6_4_3 >=-9783
B_0-B_11-9999X_11_0_3 >=-9999	B_4-B_7-9999X_7_4_3 >=-9897
B_1-B_0-9999X_0_1_3 >=-9931	B_4-B_8-9999X_8_4_3 >=-9903
B_1-B_2-9999X_2_1_3 >=-9967	B_4-B_9-9999X_9_4_3 >=-9901
B_1-B_3-9999X_3_1_3 >=-9951	B_4-B_10-9999X_10_4_3 >=-9793
B_1-B_4-9999X_4_1_3 >=-9951	B_4-B_11-9999X_11_4_3 >=-9946
B_1-B_5-9999X_5_1_3 >=-9905	B_5-B_0-9999X_0_5_3 >=-9944
B_1-B_6-9999X_6_1_3 >=-9768	B_5-B_1-9999X_1_5_3 >=-9905
B_1-B_7-9999X_7_1_3 >=-9882	B_5-B_2-9999X_2_5_3 >=-9906
B_1-B_8-9999X_8_1_3 >=-9886	B_5-B_3-9999X_3_5_3 >=-9921
B_1-B_9-9999X_9_1_3 >=-9884	B_5-B_4-9999X_4_5_3 >=-9921
B_1-B_10-9999X_10_1_3 >=-9778	B_5-B_6-9999X_6_5_3 >=-9780
B_1-B_11-9999X_11_1_3 >=-9931	B_5-B_7-9999X_7_5_3 >=-9894
B_2-B_0-9999X_0_2_3 >=-9932	B_5-B_8-9999X_8_5_3 >=-9900
B_2-B_1-9999X_1_2_3 >=-9967	B_5-B_9-9999X_9_5_3 >=-9897
B_2-B_3-9999X_3_2_3 >=-9951	B_5-B_10-9999X_10_5_3 >=-9791
B_2-B_4-9999X_4_2_3 >=-9951	B_5-B_11-9999X_11_5_3 >=-9944
B_2-B_5-9999X_5_2_3 >=-9906	B_6-B_0-9999X_0_6_3 >=-9863
B_2-B_6-9999X_6_2_3 >=-9768	B_6-B_1-9999X_1_6_3 >=-9768
B_2-B_7-9999X_7_2_3 >=-9882	B_6-B_2-9999X_2_6_3 >=-9768
B_2-B_8-9999X_8_2_3 >=-9888	B_6-B_3-9999X_3_6_3 >=-9783
B_2-B_9-9999X_9_2_3 >=-9885	B_6-B_4-9999X_4_6_3 >=-9783
B_2-B_10-9999X_10_2_3 >=-9779	B_6-B_5-9999X_5_6_3 >=-9780
B_2-B_11-9999X_11_2_3 >=-9932	B_6-B_7-9999X_7_6_3 >=-9822
B_3-B_0-9999X_0_3_3 >=-9947	B_6-B_8-9999X_8_6_3 >=-9827

B_6-B_9-9999X_9_6_3 >=-9825	B_10-B_4-9999X_4_10_3 >=-9793
B_6-B_10-9999X_10_6_3 >=-9956	B_10-B_5-9999X_5_10_3 >=-9791
B_6-B_11-9999X_11_6_3 >=-9863	B_10-B_6-9999X_6_10_3 >=-9956
B_7-B_0-9999X_0_7_3 >=-9976	B_10-B_7-9999X_7_10_3 >=-9833
B_7-B_1-9999X_1_7_3 >=-9882	B_10-B_8-9999X_8_10_3 >=-9837
B_7-B_2-9999X_2_7_3 >=-9882	B_10-B_9-9999X_9_10_3 >=-9835
B_7-B_3-9999X_3_7_3 >=-9897	B_10-B_11-9999X_11_10_3 >=-9872
B_7-B_4-9999X_4_7_3 >=-9897	B_11-B_0-9999X_0_11_3 >=-9999
B_7-B_5-9999X_5_7_3 >=-9894	B_11-B_1-9999X_1_11_3 >=-9901
B_7-B_6-9999X_6_7_3 >=-9822	B_11-B_2-9999X_2_11_3 >=-9902
B_7-B_8-9999X_8_7_3 >=-9959	B_11-B_3-9999X_3_11_3 >=-9917
B_7-B_9-9999X_9_7_3 >=-9962	B_11-B_4-9999X_4_11_3 >=-9916
B_7-B_10-9999X_10_7_3 >=-9833	B_11-B_5-9999X_5_11_3 >=-9914
B_7-B_11-9999X_11_7_3 >=-9976	B_11-B_6-9999X_6_11_3 >=-9833
B_8-B_0-9999X_0_8_3 >=-9981	B_11-B_7-9999X_7_11_3 >=-9946
B_8-B_1-9999X_1_8_3 >=-9886	B_11-B_8-9999X_8_11_3 >=-9951
B_8-B_2-9999X_2_8_3 >=-9888	B_11-B_9-9999X_9_11_3 >=-9949
B_8-B_3-9999X_3_8_3 >=-9903	B_11-B_10-9999X_10_11_3 >=-9842
B_8-B_4-9999X_4_8_3 >=-9903	B_0-B_1-9999X_1_0_4 >=-9901
B_8-B_5-9999X_5_8_3 >=-9900	B_0-B_2-9999X_2_0_4 >=-9902
B_8-B_6-9999X_6_8_3 >=-9827	B_0-B_3-9999X_3_0_4 >=-9917
B_8-B_7-9999X_7_8_3 >=-9959	B_0-B_4-9999X_4_0_4 >=-9916
B_8-B_9-9999X_9_8_3 >=-9962	B_0-B_5-9999X_5_0_4 >=-9914
B_8-B_10-9999X_10_8_3 >=-9837	B_0-B_6-9999X_6_0_4 >=-9833
B_8-B_11-9999X_11_8_3 >=-9981	B_0-B_7-9999X_7_0_4 >=-9946
B_9-B_0-9999X_0_9_3 >=-9979	B_0-B_8-9999X_8_0_4 >=-9951
B_9-B_1-9999X_1_9_3 >=-9884	B_0-B_9-9999X_9_0_4 >=-9949
B_9-B_2-9999X_2_9_3 >=-9885	B_0-B_10-9999X_10_0_4 >=-9842
B_9-B_3-9999X_3_9_3 >=-9901	B_0-B_11-9999X_11_0_4 >=-9999
B_9-B_4-9999X_4_9_3 >=-9901	B_1-B_0-9999X_0_1_4 >=-9931
B_9-B_5-9999X_5_9_3 >=-9897	B_1-B_2-9999X_2_1_4 >=-9967
B_9-B_6-9999X_6_9_3 >=-9825	B_1-B_3-9999X_3_1_4 >=-9951
B_9-B_7-9999X_7_9_3 >=-9962	B_1-B_4-9999X_4_1_4 >=-9951
B_9-B_8-9999X_8_9_3 >=-9962	B_1-B_5-9999X_5_1_4 >=-9905
B_9-B_10-9999X_10_9_3 >=-9835	B_1-B_6-9999X_6_1_4 >=-9768
B_9-B_11-9999X_11_9_3 >=-9979	B_1-B_7-9999X_7_1_4 >=-9882
B_10-B_0-9999X_0_10_3 >=-9872	B_1-B_8-9999X_8_1_4 >=-9886
B_10-B_1-9999X_1_10_3 >=-9778	B_1-B_9-9999X_9_1_4 >=-9884
B_10-B_2-9999X_2_10_3 >=-9779	B_1-B_10-9999X_10_1_4 >=-9778
B_10-B_3-9999X_3_10_3 >=-9793	B_1-B_11-9999X_11_1_4 >=-9931

B_2-B_0-9999X_0_2_4 >=-9932
 B_2-B_1-9999X_1_2_4 >=-9967
 B_2-B_3-9999X_3_2_4 >=-9951
 B_2-B_4-9999X_4_2_4 >=-9951
 B_2-B_5-9999X_5_2_4 >=-9906
 B_2-B_6-9999X_6_2_4 >=-9768
 B_2-B_7-9999X_7_2_4 >=-9882
 B_2-B_8-9999X_8_2_4 >=-9888
 B_2-B_9-9999X_9_2_4 >=-9885
 B_2-B_10-9999X_10_2_4 >=-9779
 B_2-B_11-9999X_11_2_4 >=-9932
 B_3-B_0-9999X_0_3_4 >=-9947
 B_3-B_1-9999X_1_3_4 >=-9951
 B_3-B_2-9999X_2_3_4 >=-9951
 B_3-B_4-9999X_4_3_4 >=-9968
 B_3-B_5-9999X_5_3_4 >=-9921
 B_3-B_6-9999X_6_3_4 >=-9783
 B_3-B_7-9999X_7_3_4 >=-9897
 B_3-B_8-9999X_8_3_4 >=-9903
 B_3-B_9-9999X_9_3_4 >=-9901
 B_3-B_10-9999X_10_3_4 >=-9793
 B_3-B_11-9999X_11_3_4 >=-9947
 B_4-B_0-9999X_0_4_4 >=-9946
 B_4-B_1-9999X_1_4_4 >=-9951
 B_4-B_2-9999X_2_4_4 >=-9951
 B_4-B_3-9999X_3_4_4 >=-9968
 B_4-B_5-9999X_5_4_4 >=-9921
 B_4-B_6-9999X_6_4_4 >=-9783
 B_4-B_7-9999X_7_4_4 >=-9897
 B_4-B_8-9999X_8_4_4 >=-9903
 B_4-B_9-9999X_9_4_4 >=-9901
 B_4-B_10-9999X_10_4_4 >=-9793
 B_4-B_11-9999X_11_4_4 >=-9946
 B_5-B_0-9999X_0_5_4 >=-9944
 B_5-B_1-9999X_1_5_4 >=-9905
 B_5-B_2-9999X_2_5_4 >=-9906
 B_5-B_3-9999X_3_5_4 >=-9921
 B_5-B_4-9999X_4_5_4 >=-9921
 B_5-B_6-9999X_6_5_4 >=-9780
 B_5-B_7-9999X_7_5_4 >=-9894

B_5-B_8-9999X_8_5_4 >=-9900
 B_5-B_9-9999X_9_5_4 >=-9897
 B_5-B_10-9999X_10_5_4 >=-9791
 B_5-B_11-9999X_11_5_4 >=-9944
 B_6-B_0-9999X_0_6_4 >=-9863
 B_6-B_1-9999X_1_6_4 >=-9768
 B_6-B_2-9999X_2_6_4 >=-9768
 B_6-B_3-9999X_3_6_4 >=-9783
 B_6-B_4-9999X_4_6_4 >=-9783
 B_6-B_5-9999X_5_6_4 >=-9780
 B_6-B_7-9999X_7_6_4 >=-9822
 B_6-B_8-9999X_8_6_4 >=-9827
 B_6-B_9-9999X_9_6_4 >=-9825
 B_6-B_10-9999X_10_6_4 >=-9956
 B_6-B_11-9999X_11_6_4 >=-9863
 B_7-B_0-9999X_0_7_4 >=-9976
 B_7-B_1-9999X_1_7_4 >=-9882
 B_7-B_2-9999X_2_7_4 >=-9882
 B_7-B_3-9999X_3_7_4 >=-9897
 B_7-B_4-9999X_4_7_4 >=-9897
 B_7-B_5-9999X_5_7_4 >=-9894
 B_7-B_6-9999X_6_7_4 >=-9822
 B_7-B_8-9999X_8_7_4 >=-9959
 B_7-B_9-9999X_9_7_4 >=-9962
 B_7-B_10-9999X_10_7_4 >=-9833
 B_7-B_11-9999X_11_7_4 >=-9976
 B_8-B_0-9999X_0_8_4 >=-9981
 B_8-B_1-9999X_1_8_4 >=-9886
 B_8-B_2-9999X_2_8_4 >=-9888
 B_8-B_3-9999X_3_8_4 >=-9903
 B_8-B_4-9999X_4_8_4 >=-9903
 B_8-B_5-9999X_5_8_4 >=-9900
 B_8-B_6-9999X_6_8_4 >=-9827
 B_8-B_7-9999X_7_8_4 >=-9959
 B_8-B_9-9999X_9_8_4 >=-9962
 B_8-B_10-9999X_10_8_4 >=-9837
 B_8-B_11-9999X_11_8_4 >=-9981
 B_9-B_0-9999X_0_9_4 >=-9979
 B_9-B_1-9999X_1_9_4 >=-9884
 B_9-B_2-9999X_2_9_4 >=-9885

B_9-B_3-9999X_3_9_4 >=-9901	B_0-B_11-9999X_11_0_5 >=-9999
B_9-B_4-9999X_4_9_4 >=-9901	B_1-B_0-9999X_0_1_5 >=-9931
B_9-B_5-9999X_5_9_4 >=-9897	B_1-B_2-9999X_2_1_5 >=-9967
B_9-B_6-9999X_6_9_4 >=-9825	B_1-B_3-9999X_3_1_5 >=-9951
B_9-B_7-9999X_7_9_4 >=-9962	B_1-B_4-9999X_4_1_5 >=-9951
B_9-B_8-9999X_8_9_4 >=-9962	B_1-B_5-9999X_5_1_5 >=-9905
B_9-B_10-9999X_10_9_4 >=-9835	B_1-B_6-9999X_6_1_5 >=-9768
B_9-B_11-9999X_11_9_4 >=-9979	B_1-B_7-9999X_7_1_5 >=-9882
B_10-B_0-9999X_0_10_4 >=-9872	B_1-B_8-9999X_8_1_5 >=-9886
B_10-B_1-9999X_1_10_4 >=-9778	B_1-B_9-9999X_9_1_5 >=-9884
B_10-B_2-9999X_2_10_4 >=-9779	B_1-B_10-9999X_10_1_5 >=-9778
B_10-B_3-9999X_3_10_4 >=-9793	B_1-B_11-9999X_11_1_5 >=-9931
B_10-B_4-9999X_4_10_4 >=-9793	B_2-B_0-9999X_0_2_5 >=-9932
B_10-B_5-9999X_5_10_4 >=-9791	B_2-B_1-9999X_1_2_5 >=-9967
B_10-B_6-9999X_6_10_4 >=-9956	B_2-B_3-9999X_3_2_5 >=-9951
B_10-B_7-9999X_7_10_4 >=-9833	B_2-B_4-9999X_4_2_5 >=-9951
B_10-B_8-9999X_8_10_4 >=-9837	B_2-B_5-9999X_5_2_5 >=-9906
B_10-B_9-9999X_9_10_4 >=-9835	B_2-B_6-9999X_6_2_5 >=-9768
B_10-B_11-9999X_11_10_4 >=-9872	B_2-B_7-9999X_7_2_5 >=-9882
B_11-B_0-9999X_0_11_4 >=-9999	B_2-B_8-9999X_8_2_5 >=-9888
B_11-B_1-9999X_1_11_4 >=-9901	B_2-B_9-9999X_9_2_5 >=-9885
B_11-B_2-9999X_2_11_4 >=-9902	B_2-B_10-9999X_10_2_5 >=-9779
B_11-B_3-9999X_3_11_4 >=-9917	B_2-B_11-9999X_11_2_5 >=-9932
B_11-B_4-9999X_4_11_4 >=-9916	B_3-B_0-9999X_0_3_5 >=-9947
B_11-B_5-9999X_5_11_4 >=-9914	B_3-B_1-9999X_1_3_5 >=-9951
B_11-B_6-9999X_6_11_4 >=-9833	B_3-B_2-9999X_2_3_5 >=-9951
B_11-B_7-9999X_7_11_4 >=-9946	B_3-B_4-9999X_4_3_5 >=-9968
B_11-B_8-9999X_8_11_4 >=-9951	B_3-B_5-9999X_5_3_5 >=-9921
B_11-B_9-9999X_9_11_4 >=-9949	B_3-B_6-9999X_6_3_5 >=-9783
B_11-B_10-9999X_10_11_4 >=-9842	B_3-B_7-9999X_7_3_5 >=-9897
B_0-B_1-9999X_1_0_5 >=-9901	B_3-B_8-9999X_8_3_5 >=-9903
B_0-B_2-9999X_2_0_5 >=-9902	B_3-B_9-9999X_9_3_5 >=-9901
B_0-B_3-9999X_3_0_5 >=-9917	B_3-B_10-9999X_10_3_5 >=-9793
B_0-B_4-9999X_4_0_5 >=-9916	B_3-B_11-9999X_11_3_5 >=-9947
B_0-B_5-9999X_5_0_5 >=-9914	B_4-B_0-9999X_0_4_5 >=-9946
B_0-B_6-9999X_6_0_5 >=-9833	B_4-B_1-9999X_1_4_5 >=-9951
B_0-B_7-9999X_7_0_5 >=-9946	B_4-B_2-9999X_2_4_5 >=-9951
B_0-B_8-9999X_8_0_5 >=-9951	B_4-B_3-9999X_3_4_5 >=-9968
B_0-B_9-9999X_9_0_5 >=-9949	B_4-B_5-9999X_5_4_5 >=-9921
B_0-B_10-9999X_10_0_5 >=-9842	B_4-B_6-9999X_6_4_5 >=-9783

B_4-B_7-9999X_7_4_5 >=-9897	B_8 - B_2 - 9999X_2_8_5 >= - 9888
B_4-B_8-9999X_8_4_5 >=-9903	B_8 - B_3 - 9999X_3_8_5 >= - 9903
B_4-B_9-9999X_9_4_5 >=-9901	B_8 - B_4 - 9999X_4_8_5 >= - 9903
B_4-B_10-9999X_10_4_5 >=-9793	B_8 - B_5 - 9999X_5_8_5 >= - 9900
B_4-B_11-9999X_11_4_5 >=-9946	B_8 - B_6 - 9999X_6_8_5 >= - 9827
B_5-B_0-9999X_0_5_5 >=-9944	B_8 - B_7 - 9999X_7_8_5 >= - 9959
B_5-B_1-9999X_1_5_5 >=-9905	B_8 - B_9 - 9999X_9_8_5 >= - 9962
B_5-B_2-9999X_2_5_5 >=-9906	B_8 - B_10 - 9999X_10_8_5 >= - 9837
B_5-B_3-9999X_3_5_5 >=-9921	B_8 - B_11 - 9999X_11_8_5 >= - 9981
B_5-B_4-9999X_4_5_5 >=-9921	B_9 - B_0 - 9999X_0_9_5 >= - 9979
B_5-B_6-9999X_6_5_5 >=-9780	B_9 - B_1 - 9999X_1_9_5 >= - 9884
B_5-B_7-9999X_7_5_5 >=-9894	B_9 - B_2 - 9999X_2_9_5 >= - 9885
B_5-B_8-9999X_8_5_5 >=-9900	B_9 - B_3 - 9999X_3_9_5 >= - 9901
B_5-B_9-9999X_9_5_5 >=-9897	B_9 - B_4 - 9999X_4_9_5 >= - 9901
B_5-B_10-9999X_10_5_5 >=-9791	B_9 - B_5 - 9999X_5_9_5 >= - 9897
B_5-B_11-9999X_11_5_5 >=-9944	B_9 - B_6 - 9999X_6_9_5 >= - 9825
B_6-B_0-9999X_0_6_5 >=-9863	B_9 - B_7 - 9999X_7_9_5 >= - 9962
B_6-B_1-9999X_1_6_5 >=-9768	B_9 - B_8 - 9999X_8_9_5 >= - 9962
B_6 - B_2 - 9999X_2_6_5 >= - 9768	B_9 - B_10 - 9999X_10_9_5 >= - 9835
B_6 - B_3 - 9999X_3_6_5 >= - 9783	B_9 - B_11 - 9999X_11_9_5 >= - 9979
B_6 - B_4 - 9999X_4_6_5 >= - 9783	B_10 - B_0 - 9999X_0_10_5 >= - 9872
B_6 - B_5 - 9999X_5_6_5 >= - 9780	B_10 - B_1 - 9999X_1_10_5 >= - 9778
B_6 - B_7 - 9999X_7_6_5 >= - 9822	B_10 - B_2 - 9999X_2_10_5 >= - 9779
B_6 - B_8 - 9999X_8_6_5 >= - 9827	B_10 - B_3 - 9999X_3_10_5 >= - 9793
B_6 - B_9 - 9999X_9_6_5 >= - 9825	B_10 - B_4 - 9999X_4_10_5 >= - 9793
B_6 - B_10 - 9999X_10_6_5 >= - 9956	B_10 - B_5 - 9999X_5_10_5 >= - 9791
B_6 - B_11 - 9999X_11_6_5 >= - 9863	B_10 - B_6 - 9999X_6_10_5 >= - 9956
B_7 - B_0 - 9999X_0_7_5 >= - 9976	B_10 - B_7 - 9999X_7_10_5 >= - 9833
B_7 - B_1 - 9999X_1_7_5 >= - 9882	B_10 - B_8 - 9999X_8_10_5 >= - 9837
B_7 - B_2 - 9999X_2_7_5 >= - 9882	B_10 - B_9 - 9999X_9_10_5 >= - 9835
B_7 - B_3 - 9999X_3_7_5 >= - 9897	B_10 - B_11 - 9999X_11_10_5 >= - 9872
B_7 - B_4 - 9999X_4_7_5 >= - 9897	B_11 - B_0 - 9999X_0_11_5 >= - 9999
B_7 - B_5 - 9999X_5_7_5 >= - 9894	B_11 - B_1 - 9999X_1_11_5 >= - 9901
B_7 - B_6 - 9999X_6_7_5 >= - 9822	B_11 - B_2 - 9999X_2_11_5 >= - 9902
B_7 - B_8 - 9999X_8_7_5 >= - 9959	B_11 - B_3 - 9999X_3_11_5 >= - 9917
B_7 - B_9 - 9999X_9_7_5 >= - 9962	B_11 - B_4 - 9999X_4_11_5 >= - 9916
B_7 - B_10 - 9999X_10_7_5 >= - 9833	B_11 - B_5 - 9999X_5_11_5 >= - 9914
B_7 - B_11 - 9999X_11_7_5 >= - 9976	B_11 - B_6 - 9999X_6_11_5 >= - 9833
B_8 - B_0 - 9999X_0_8_5 >= - 9981	B_11 - B_7 - 9999X_7_11_5 >= - 9946
B_8 - B_1 - 9999X_1_8_5 >= - 9886	B_11 - B_8 - 9999X_8_11_5 >= - 9951

$$B_{11} - B_9 - 9999X_{9_11_5} \geq -9949$$

$$B_{11} - B_{10} - 9999X_{10_11_5} \geq -9842$$

Restrição que determina o limite inferior e superior da janela de tempo

A restrição (50) determina o limite inferior da janela de tempo. No dia anterior o gestor é informado do horário previsto para a máquina ser coletada. Como se trata de uma previsão é acrescentado uma hora de folga para possíveis imprevistos, de forma a criar um intervalo de tempo para a realização do serviço.

$$B_i \geq e_i \quad \forall i \in N \quad (50)$$

$$B_0 \geq 360$$

$$B_6 \geq 360$$

$$B_1 \geq 660$$

$$B_7 \geq 360$$

$$B_2 \geq 420$$

$$B_8 \geq 360$$

$$B_3 \geq 600$$

$$B_9 \geq 360$$

$$B_4 \geq 360$$

$$B_{10} \geq 360$$

$$B_5 \geq 780$$

$$B_{11} \geq 360$$

A restrição (51) determina o limite superior da janela de tempo e possibilita um possível atraso a depender da configuração da restrição (52).

$$B_i \leq l_i + A_i \quad \forall i \in N \quad (51)$$

$$B_0 - A_0 \leq 1080$$

$$B_6 - A_6 \leq 1080$$

$$B_1 - A_1 \leq 720$$

$$B_7 - A_7 \leq 1080$$

$$B_2 - A_2 \leq 480$$

$$B_8 - A_8 \leq 1080$$

$$B_3 - A_3 \leq 660$$

$$B_9 - A_9 \leq 1080$$

$$B_4 - A_4 \leq 420$$

$$B_{10} - A_{10} \leq 1080$$

$$B_5 - A_5 \leq 840$$

$$B_{11} - A_{11} \leq 1145$$

Restrição que permite o atraso no atendimento

A restrição (52) é igual a zero se não for permitido atrasos nos atendimentos ou igual infinito quando um dos objetivos for minimizar possíveis atrasos no transporte das máquinas.

$$A_i \begin{cases} = 0 & \text{se não for permitido atraso no atendimento} \\ \leq \infty & \text{se for permitido atraso no atendimento} \end{cases} \quad \forall i \in N \quad (52)$$

$A_0 = 0$	$A_6 = 0$
$A_1 = 0$	$A_7 = 0$
$A_2 = 0$	$A_8 = 0$
$A_3 = 0$	$A_9 = 0$
$A_4 = 0$	$A_{10} = 0$
$A_5 = 0$	$A_{11} = 0$

Restrição que garante a capacidade de carga do veículo prancha

A restrição (53) garante que a carga após o veículo k deixar o nó j deve ser maior ou igual a carga com a qual deixou o nó i , acrescida da carga do nó j .

$$Q_j \geq Q_i + q_j - W_{i,j}(1 - x_{i,j}^k) \quad \forall i, j \in N, i \neq j, k \in K \quad (53)$$

A validade dessas restrições é assegurada pelas inequações $W_{i,j}^k \leq \min\{Q_k, Q_k + q_i\}$. Como forma de simplificação foi atribuído um valor “infinito” a essa constante $W_{i,j}^k = 9999$, sem ocasionar prejuízos e solução do problema.

$Q_0 - Q_1 - 9999X_{1_0_1} \geq - 9999$	$Q_0 - Q_7 - 9999X_{7_0_1} \geq - 9999$
$Q_0 - Q_2 - 9999X_{2_0_1} \geq - 9999$	$Q_0 - Q_8 - 9999X_{8_0_1} \geq - 9999$
$Q_0 - Q_3 - 9999X_{3_0_1} \geq - 9999$	$Q_0 - Q_9 - 9999X_{9_0_1} \geq - 9999$
$Q_0 - Q_4 - 9999X_{4_0_1} \geq - 9999$	$Q_0 - Q_{10} - 9999X_{10_0_1} \geq - 9999$
$Q_0 - Q_5 - 9999X_{5_0_1} \geq - 9999$	$Q_0 - Q_{11} - 9999X_{11_0_1} \geq - 9999$
$Q_0 - Q_6 - 9999X_{6_0_1} \geq - 9999$	$Q_1 - Q_0 - 9999X_{0_1_1} \geq - 9998$

Q_1 - Q_2 - 9999X_2_1_1 >= - 9998	Q_4 - Q_9 - 9999X_9_4_1 >= - 9998
Q_1 - Q_3 - 9999X_3_1_1 >= - 9998	Q_4 - Q_10 - 9999X_10_4_1 >= - 9998
Q_1 - Q_4 - 9999X_4_1_1 >= - 9998	Q_4 - Q_11 - 9999X_11_4_1 >= - 9998
Q_1 - Q_5 - 9999X_5_1_1 >= - 9998	Q_5 - Q_0 - 9999X_0_5_1 >= - 9998
Q_1 - Q_6 - 9999X_6_1_1 >= - 9998	Q_5 - Q_1 - 9999X_1_5_1 >= - 9998
Q_1 - Q_7 - 9999X_7_1_1 >= - 9998	Q_5 - Q_2 - 9999X_2_5_1 >= - 9998
Q_1 - Q_8 - 9999X_8_1_1 >= - 9998	Q_5 - Q_3 - 9999X_3_5_1 >= - 9998
Q_1 - Q_9 - 9999X_9_1_1 >= - 9998	Q_5 - Q_4 - 9999X_4_5_1 >= - 9998
Q_1 - Q_10 - 9999X_10_1_1 >= - 9998	Q_5 - Q_6 - 9999X_6_5_1 >= - 9998
Q_1 - Q_11 - 9999X_11_1_1 >= - 9998	Q_5 - Q_7 - 9999X_7_5_1 >= - 9998
Q_2 - Q_0 - 9999X_0_2_1 >= - 9998	Q_5 - Q_8 - 9999X_8_5_1 >= - 9998
Q_2 - Q_1 - 9999X_1_2_1 >= - 9998	Q_5 - Q_9 - 9999X_9_5_1 >= - 9998
Q_2 - Q_3 - 9999X_3_2_1 >= - 9998	Q_5 - Q_10 - 9999X_10_5_1 >= - 9998
Q_2 - Q_4 - 9999X_4_2_1 >= - 9998	Q_5 - Q_11 - 9999X_11_5_1 >= - 9998
Q_2 - Q_5 - 9999X_5_2_1 >= - 9998	Q_6 - Q_0 - 9999X_0_6_1 >= - 10000
Q_2 - Q_6 - 9999X_6_2_1 >= - 9998	Q_6 - Q_1 - 9999X_1_6_1 >= - 10000
Q_2 - Q_7 - 9999X_7_2_1 >= - 9998	Q_6 - Q_2 - 9999X_2_6_1 >= - 10000
Q_2 - Q_8 - 9999X_8_2_1 >= - 9998	Q_6 - Q_3 - 9999X_3_6_1 >= - 10000
Q_2 - Q_9 - 9999X_9_2_1 >= - 9998	Q_6 - Q_4 - 9999X_4_6_1 >= - 10000
Q_2 - Q_10 - 9999X_10_2_1 >= - 9998	Q_6 - Q_5 - 9999X_5_6_1 >= - 10000
Q_2 - Q_11 - 9999X_11_2_1 >= - 9998	Q_6 - Q_7 - 9999X_7_6_1 >= - 10000
Q_3 - Q_0 - 9999X_0_3_1 >= - 9998	Q_6 - Q_8 - 9999X_8_6_1 >= - 10000
Q_3 - Q_1 - 9999X_1_3_1 >= - 9998	Q_6 - Q_9 - 9999X_9_6_1 >= - 10000
Q_3 - Q_2 - 9999X_2_3_1 >= - 9998	Q_6 - Q_10 - 9999X_10_6_1 >= - 10000
Q_3 - Q_4 - 9999X_4_3_1 >= - 9998	Q_6 - Q_11 - 9999X_11_6_1 >= - 10000
Q_3 - Q_5 - 9999X_5_3_1 >= - 9998	Q_7 - Q_0 - 9999X_0_7_1 >= - 10000
Q_3 - Q_6 - 9999X_6_3_1 >= - 9998	Q_7 - Q_1 - 9999X_1_7_1 >= - 10000
Q_3 - Q_7 - 9999X_7_3_1 >= - 9998	Q_7 - Q_2 - 9999X_2_7_1 >= - 10000
Q_3 - Q_8 - 9999X_8_3_1 >= - 9998	Q_7 - Q_3 - 9999X_3_7_1 >= - 10000
Q_3 - Q_9 - 9999X_9_3_1 >= - 9998	Q_7 - Q_4 - 9999X_4_7_1 >= - 10000
Q_3 - Q_10 - 9999X_10_3_1 >= - 9998	Q_7 - Q_5 - 9999X_5_7_1 >= - 10000
Q_3 - Q_11 - 9999X_11_3_1 >= - 9998	Q_7 - Q_6 - 9999X_6_7_1 >= - 10000
Q_4 - Q_0 - 9999X_0_4_1 >= - 9998	Q_7 - Q_8 - 9999X_8_7_1 >= - 10000
Q_4 - Q_1 - 9999X_1_4_1 >= - 9998	Q_7 - Q_9 - 9999X_9_7_1 >= - 10000
Q_4 - Q_2 - 9999X_2_4_1 >= - 9998	Q_7 - Q_10 - 9999X_10_7_1 >= - 10000
Q_4 - Q_3 - 9999X_3_4_1 >= - 9998	Q_7 - Q_11 - 9999X_11_7_1 >= - 10000
Q_4 - Q_5 - 9999X_5_4_1 >= - 9998	Q_8 - Q_0 - 9999X_0_8_1 >= - 10000
Q_4 - Q_6 - 9999X_6_4_1 >= - 9998	Q_8 - Q_1 - 9999X_1_8_1 >= - 10000
Q_4 - Q_7 - 9999X_7_4_1 >= - 9998	Q_8 - Q_2 - 9999X_2_8_1 >= - 10000
Q_4 - Q_8 - 9999X_8_4_1 >= - 9998	Q_8 - Q_3 - 9999X_3_8_1 >= - 10000

Q_8 - Q_4 - 9999X_4_8_1 >= - 10000	Q_0 - Q_1 - 9999X_1_0_2 >= - 9999
Q_8 - Q_5 - 9999X_5_8_1 >= - 10000	Q_0 - Q_2 - 9999X_2_0_2 >= - 9999
Q_8 - Q_6 - 9999X_6_8_1 >= - 10000	Q_0 - Q_3 - 9999X_3_0_2 >= - 9999
Q_8 - Q_7 - 9999X_7_8_1 >= - 10000	Q_0 - Q_4 - 9999X_4_0_2 >= - 9999
Q_8 - Q_9 - 9999X_9_8_1 >= - 10000	Q_0 - Q_5 - 9999X_5_0_2 >= - 9999
Q_8 - Q_10 - 9999X_10_8_1 >= - 10000	Q_0 - Q_6 - 9999X_6_0_2 >= - 9999
Q_8 - Q_11 - 9999X_11_8_1 >= - 10000	Q_0 - Q_7 - 9999X_7_0_2 >= - 9999
Q_9 - Q_0 - 9999X_0_9_1 >= - 10000	Q_0 - Q_8 - 9999X_8_0_2 >= - 9999
Q_9 - Q_1 - 9999X_1_9_1 >= - 10000	Q_0 - Q_9 - 9999X_9_0_2 >= - 9999
Q_9 - Q_2 - 9999X_2_9_1 >= - 10000	Q_0 - Q_10 - 9999X_10_0_2 >= - 9999
Q_9 - Q_3 - 9999X_3_9_1 >= - 10000	Q_0 - Q_11 - 9999X_11_0_2 >= - 9999
Q_9 - Q_4 - 9999X_4_9_1 >= - 10000	Q_1 - Q_0 - 9999X_0_1_2 >= - 9998
Q_9 - Q_5 - 9999X_5_9_1 >= - 10000	Q_1 - Q_2 - 9999X_2_1_2 >= - 9998
Q_9 - Q_6 - 9999X_6_9_1 >= - 10000	Q_1 - Q_3 - 9999X_3_1_2 >= - 9998
Q_9 - Q_7 - 9999X_7_9_1 >= - 10000	Q_1 - Q_4 - 9999X_4_1_2 >= - 9998
Q_9 - Q_8 - 9999X_8_9_1 >= - 10000	Q_1 - Q_5 - 9999X_5_1_2 >= - 9998
Q_9 - Q_10 - 9999X_10_9_1 >= - 10000	Q_1 - Q_6 - 9999X_6_1_2 >= - 9998
Q_9 - Q_11 - 9999X_11_9_1 >= - 10000	Q_1 - Q_7 - 9999X_7_1_2 >= - 9998
Q_10 - Q_0 - 9999X_0_10_1 >= - 10000	Q_1 - Q_8 - 9999X_8_1_2 >= - 9998
Q_10 - Q_1 - 9999X_1_10_1 >= - 10000	Q_1 - Q_9 - 9999X_9_1_2 >= - 9998
Q_10 - Q_2 - 9999X_2_10_1 >= - 10000	Q_1 - Q_10 - 9999X_10_1_2 >= - 9998
Q_10 - Q_3 - 9999X_3_10_1 >= - 10000	Q_1 - Q_11 - 9999X_11_1_2 >= - 9998
Q_10 - Q_4 - 9999X_4_10_1 >= - 10000	Q_2 - Q_0 - 9999X_0_2_2 >= - 9998
Q_10 - Q_5 - 9999X_5_10_1 >= - 10000	Q_2 - Q_1 - 9999X_1_2_2 >= - 9998
Q_10 - Q_6 - 9999X_6_10_1 >= - 10000	Q_2 - Q_3 - 9999X_3_2_2 >= - 9998
Q_10 - Q_7 - 9999X_7_10_1 >= - 10000	Q_2 - Q_4 - 9999X_4_2_2 >= - 9998
Q_10 - Q_8 - 9999X_8_10_1 >= - 10000	Q_2 - Q_5 - 9999X_5_2_2 >= - 9998
Q_10 - Q_9 - 9999X_9_10_1 >= - 10000	Q_2 - Q_6 - 9999X_6_2_2 >= - 9998
Q_10 - Q_11 - 9999X_11_10_1 >= - 10000	Q_2 - Q_7 - 9999X_7_2_2 >= - 9998
Q_11 - Q_0 - 9999X_0_11_1 >= - 9999	Q_2 - Q_8 - 9999X_8_2_2 >= - 9998
Q_11 - Q_1 - 9999X_1_11_1 >= - 9999	Q_2 - Q_9 - 9999X_9_2_2 >= - 9998
Q_11 - Q_2 - 9999X_2_11_1 >= - 9999	Q_2 - Q_10 - 9999X_10_2_2 >= - 9998
Q_11 - Q_3 - 9999X_3_11_1 >= - 9999	Q_2 - Q_11 - 9999X_11_2_2 >= - 9998
Q_11 - Q_4 - 9999X_4_11_1 >= - 9999	Q_3 - Q_0 - 9999X_0_3_2 >= - 9998
Q_11 - Q_5 - 9999X_5_11_1 >= - 9999	Q_3 - Q_1 - 9999X_1_3_2 >= - 9998
Q_11 - Q_6 - 9999X_6_11_1 >= - 9999	Q_3 - Q_2 - 9999X_2_3_2 >= - 9998
Q_11 - Q_7 - 9999X_7_11_1 >= - 9999	Q_3 - Q_4 - 9999X_4_3_2 >= - 9998
Q_11 - Q_8 - 9999X_8_11_1 >= - 9999	Q_3 - Q_5 - 9999X_5_3_2 >= - 9998
Q_11 - Q_9 - 9999X_9_11_1 >= - 9999	Q_3 - Q_6 - 9999X_6_3_2 >= - 9998
Q_11 - Q_10 - 9999X_10_11_1 >= - 9999	Q_3 - Q_7 - 9999X_7_3_2 >= - 9998

Q_3 - Q_8 - 9999X_8_3_2 >= - 9998	Q_7 - Q_3 - 9999X_3_7_2 >= - 10000
Q_3 - Q_9 - 9999X_9_3_2 >= - 9998	Q_7 - Q_4 - 9999X_4_7_2 >= - 10000
Q_3 - Q_10 - 9999X_10_3_2 >= - 9998	Q_7 - Q_5 - 9999X_5_7_2 >= - 10000
Q_3 - Q_11 - 9999X_11_3_2 >= - 9998	Q_7 - Q_6 - 9999X_6_7_2 >= - 10000
Q_4 - Q_0 - 9999X_0_4_2 >= - 9998	Q_7 - Q_8 - 9999X_8_7_2 >= - 10000
Q_4 - Q_1 - 9999X_1_4_2 >= - 9998	Q_7 - Q_9 - 9999X_9_7_2 >= - 10000
Q_4 - Q_2 - 9999X_2_4_2 >= - 9998	Q_7 - Q_10 - 9999X_10_7_2 >= - 10000
Q_4 - Q_3 - 9999X_3_4_2 >= - 9998	Q_7 - Q_11 - 9999X_11_7_2 >= - 10000
Q_4 - Q_5 - 9999X_5_4_2 >= - 9998	Q_8 - Q_0 - 9999X_0_8_2 >= - 10000
Q_4 - Q_6 - 9999X_6_4_2 >= - 9998	Q_8 - Q_1 - 9999X_1_8_2 >= - 10000
Q_4 - Q_7 - 9999X_7_4_2 >= - 9998	Q_8 - Q_2 - 9999X_2_8_2 >= - 10000
Q_4 - Q_8 - 9999X_8_4_2 >= - 9998	Q_8 - Q_3 - 9999X_3_8_2 >= - 10000
Q_4 - Q_9 - 9999X_9_4_2 >= - 9998	Q_8 - Q_4 - 9999X_4_8_2 >= - 10000
Q_4 - Q_10 - 9999X_10_4_2 >= - 9998	Q_8 - Q_5 - 9999X_5_8_2 >= - 10000
Q_4 - Q_11 - 9999X_11_4_2 >= - 9998	Q_8 - Q_6 - 9999X_6_8_2 >= - 10000
Q_5 - Q_0 - 9999X_0_5_2 >= - 9998	Q_8 - Q_7 - 9999X_7_8_2 >= - 10000
Q_5 - Q_1 - 9999X_1_5_2 >= - 9998	Q_8 - Q_9 - 9999X_9_8_2 >= - 10000
Q_5 - Q_2 - 9999X_2_5_2 >= - 9998	Q_8 - Q_10 - 9999X_10_8_2 >= - 10000
Q_5 - Q_3 - 9999X_3_5_2 >= - 9998	Q_8 - Q_11 - 9999X_11_8_2 >= - 10000
Q_5 - Q_4 - 9999X_4_5_2 >= - 9998	Q_9 - Q_0 - 9999X_0_9_2 >= - 10000
Q_5 - Q_6 - 9999X_6_5_2 >= - 9998	Q_9 - Q_1 - 9999X_1_9_2 >= - 10000
Q_5 - Q_7 - 9999X_7_5_2 >= - 9998	Q_9 - Q_2 - 9999X_2_9_2 >= - 10000
Q_5 - Q_8 - 9999X_8_5_2 >= - 9998	Q_9 - Q_3 - 9999X_3_9_2 >= - 10000
Q_5 - Q_9 - 9999X_9_5_2 >= - 9998	Q_9 - Q_4 - 9999X_4_9_2 >= - 10000
Q_5 - Q_10 - 9999X_10_5_2 >= - 9998	Q_9 - Q_5 - 9999X_5_9_2 >= - 10000
Q_5 - Q_11 - 9999X_11_5_2 >= - 9998	Q_9 - Q_6 - 9999X_6_9_2 >= - 10000
Q_6 - Q_0 - 9999X_0_6_2 >= - 10000	Q_9 - Q_7 - 9999X_7_9_2 >= - 10000
Q_6 - Q_1 - 9999X_1_6_2 >= - 10000	Q_9 - Q_8 - 9999X_8_9_2 >= - 10000
Q_6 - Q_2 - 9999X_2_6_2 >= - 10000	Q_9 - Q_10 - 9999X_10_9_2 >= - 10000
Q_6 - Q_3 - 9999X_3_6_2 >= - 10000	Q_9 - Q_11 - 9999X_11_9_2 >= - 10000
Q_6 - Q_4 - 9999X_4_6_2 >= - 10000	Q_10 - Q_0 - 9999X_0_10_2 >= - 10000
Q_6 - Q_5 - 9999X_5_6_2 >= - 10000	Q_10 - Q_1 - 9999X_1_10_2 >= - 10000
Q_6 - Q_7 - 9999X_7_6_2 >= - 10000	Q_10 - Q_2 - 9999X_2_10_2 >= - 10000
Q_6 - Q_8 - 9999X_8_6_2 >= - 10000	Q_10 - Q_3 - 9999X_3_10_2 >= - 10000
Q_6 - Q_9 - 9999X_9_6_2 >= - 10000	Q_10 - Q_4 - 9999X_4_10_2 >= - 10000
Q_6 - Q_10 - 9999X_10_6_2 >= - 10000	Q_10 - Q_5 - 9999X_5_10_2 >= - 10000
Q_6 - Q_11 - 9999X_11_6_2 >= - 10000	Q_10 - Q_6 - 9999X_6_10_2 >= - 10000
Q_7 - Q_0 - 9999X_0_7_2 >= - 10000	Q_10 - Q_7 - 9999X_7_10_2 >= - 10000
Q_7 - Q_1 - 9999X_1_7_2 >= - 10000	Q_10 - Q_8 - 9999X_8_10_2 >= - 10000
Q_7 - Q_2 - 9999X_2_7_2 >= - 10000	Q_10 - Q_9 - 9999X_9_10_2 >= - 10000

Q_10 - Q_11 - 9999X_11_10_2 >= - 10000	Q_2 - Q_7 - 9999X_7_2_3 >= - 9998
Q_11 - Q_0 - 9999X_0_11_2 >= - 9999	Q_2 - Q_8 - 9999X_8_2_3 >= - 9998
Q_11 - Q_1 - 9999X_1_11_2 >= - 9999	Q_2 - Q_9 - 9999X_9_2_3 >= - 9998
Q_11 - Q_2 - 9999X_2_11_2 >= - 9999	Q_2 - Q_10 - 9999X_10_2_3 >= - 9998
Q_11 - Q_3 - 9999X_3_11_2 >= - 9999	Q_2 - Q_11 - 9999X_11_2_3 >= - 9998
Q_11 - Q_4 - 9999X_4_11_2 >= - 9999	Q_3 - Q_0 - 9999X_0_3_3 >= - 9998
Q_11 - Q_5 - 9999X_5_11_2 >= - 9999	Q_3 - Q_1 - 9999X_1_3_3 >= - 9998
Q_11 - Q_6 - 9999X_6_11_2 >= - 9999	Q_3 - Q_2 - 9999X_2_3_3 >= - 9998
Q_11 - Q_7 - 9999X_7_11_2 >= - 9999	Q_3 - Q_4 - 9999X_4_3_3 >= - 9998
Q_11 - Q_8 - 9999X_8_11_2 >= - 9999	Q_3 - Q_5 - 9999X_5_3_3 >= - 9998
Q_11 - Q_9 - 9999X_9_11_2 >= - 9999	Q_3 - Q_6 - 9999X_6_3_3 >= - 9998
Q_11 - Q_10 - 9999X_10_11_2 >= - 9999	Q_3 - Q_7 - 9999X_7_3_3 >= - 9998
Q_0 - Q_1 - 9999X_1_0_3 >= - 9999	Q_3 - Q_8 - 9999X_8_3_3 >= - 9998
Q_0 - Q_2 - 9999X_2_0_3 >= - 9999	Q_3 - Q_9 - 9999X_9_3_3 >= - 9998
Q_0 - Q_3 - 9999X_3_0_3 >= - 9999	Q_3 - Q_10 - 9999X_10_3_3 >= - 9998
Q_0 - Q_4 - 9999X_4_0_3 >= - 9999	Q_3 - Q_11 - 9999X_11_3_3 >= - 9998
Q_0 - Q_5 - 9999X_5_0_3 >= - 9999	Q_4 - Q_0 - 9999X_0_4_3 >= - 9998
Q_0 - Q_6 - 9999X_6_0_3 >= - 9999	Q_4 - Q_1 - 9999X_1_4_3 >= - 9998
Q_0 - Q_7 - 9999X_7_0_3 >= - 9999	Q_4 - Q_2 - 9999X_2_4_3 >= - 9998
Q_0 - Q_8 - 9999X_8_0_3 >= - 9999	Q_4 - Q_3 - 9999X_3_4_3 >= - 9998
Q_0 - Q_9 - 9999X_9_0_3 >= - 9999	Q_4 - Q_5 - 9999X_5_4_3 >= - 9998
Q_0 - Q_10 - 9999X_10_0_3 >= - 9999	Q_4 - Q_6 - 9999X_6_4_3 >= - 9998
Q_0 - Q_11 - 9999X_11_0_3 >= - 9999	Q_4 - Q_7 - 9999X_7_4_3 >= - 9998
Q_1 - Q_0 - 9999X_0_1_3 >= - 9998	Q_4 - Q_8 - 9999X_8_4_3 >= - 9998
Q_1 - Q_2 - 9999X_2_1_3 >= - 9998	Q_4 - Q_9 - 9999X_9_4_3 >= - 9998
Q_1 - Q_3 - 9999X_3_1_3 >= - 9998	Q_4 - Q_10 - 9999X_10_4_3 >= - 9998
Q_1 - Q_4 - 9999X_4_1_3 >= - 9998	Q_4 - Q_11 - 9999X_11_4_3 >= - 9998
Q_1 - Q_5 - 9999X_5_1_3 >= - 9998	Q_5 - Q_0 - 9999X_0_5_3 >= - 9998
Q_1 - Q_6 - 9999X_6_1_3 >= - 9998	Q_5 - Q_1 - 9999X_1_5_3 >= - 9998
Q_1 - Q_7 - 9999X_7_1_3 >= - 9998	Q_5 - Q_2 - 9999X_2_5_3 >= - 9998
Q_1 - Q_8 - 9999X_8_1_3 >= - 9998	Q_5 - Q_3 - 9999X_3_5_3 >= - 9998
Q_1 - Q_9 - 9999X_9_1_3 >= - 9998	Q_5 - Q_4 - 9999X_4_5_3 >= - 9998
Q_1 - Q_10 - 9999X_10_1_3 >= - 9998	Q_5 - Q_6 - 9999X_6_5_3 >= - 9998
Q_1 - Q_11 - 9999X_11_1_3 >= - 9998	Q_5 - Q_7 - 9999X_7_5_3 >= - 9998
Q_2 - Q_0 - 9999X_0_2_3 >= - 9998	Q_5 - Q_8 - 9999X_8_5_3 >= - 9998
Q_2 - Q_1 - 9999X_1_2_3 >= - 9998	Q_5 - Q_9 - 9999X_9_5_3 >= - 9998
Q_2 - Q_3 - 9999X_3_2_3 >= - 9998	Q_5 - Q_10 - 9999X_10_5_3 >= - 9998
Q_2 - Q_4 - 9999X_4_2_3 >= - 9998	Q_5 - Q_11 - 9999X_11_5_3 >= - 9998
Q_2 - Q_5 - 9999X_5_2_3 >= - 9998	Q_6 - Q_0 - 9999X_0_6_3 >= - 10000
Q_2 - Q_6 - 9999X_6_2_3 >= - 9998	Q_6 - Q_1 - 9999X_1_6_3 >= - 10000

Q_6 - Q_2 - 9999X_2_6_3 >= - 10000	Q_9 - Q_10 - 9999X_10_9_3 >= - 10000
Q_6 - Q_3 - 9999X_3_6_3 >= - 10000	Q_9 - Q_11 - 9999X_11_9_3 >= - 10000
Q_6 - Q_4 - 9999X_4_6_3 >= - 10000	Q_10 - Q_0 - 9999X_0_10_3 >= - 10000
Q_6 - Q_5 - 9999X_5_6_3 >= - 10000	Q_10 - Q_1 - 9999X_1_10_3 >= - 10000
Q_6 - Q_7 - 9999X_7_6_3 >= - 10000	Q_10 - Q_2 - 9999X_2_10_3 >= - 10000
Q_6 - Q_8 - 9999X_8_6_3 >= - 10000	Q_10 - Q_3 - 9999X_3_10_3 >= - 10000
Q_6 - Q_9 - 9999X_9_6_3 >= - 10000	Q_10 - Q_4 - 9999X_4_10_3 >= - 10000
Q_6 - Q_10 - 9999X_10_6_3 >= - 10000	Q_10 - Q_5 - 9999X_5_10_3 >= - 10000
Q_6 - Q_11 - 9999X_11_6_3 >= - 10000	Q_10 - Q_6 - 9999X_6_10_3 >= - 10000
Q_7 - Q_0 - 9999X_0_7_3 >= - 10000	Q_10 - Q_7 - 9999X_7_10_3 >= - 10000
Q_7 - Q_1 - 9999X_1_7_3 >= - 10000	Q_10 - Q_8 - 9999X_8_10_3 >= - 10000
Q_7 - Q_2 - 9999X_2_7_3 >= - 10000	Q_10 - Q_9 - 9999X_9_10_3 >= - 10000
Q_7 - Q_3 - 9999X_3_7_3 >= - 10000	Q_10 - Q_11 - 9999X_11_10_3 >= - 10000
Q_7 - Q_4 - 9999X_4_7_3 >= - 10000	Q_11 - Q_0 - 9999X_0_11_3 >= - 9999
Q_7 - Q_5 - 9999X_5_7_3 >= - 10000	Q_11 - Q_1 - 9999X_1_11_3 >= - 9999
Q_7 - Q_6 - 9999X_6_7_3 >= - 10000	Q_11 - Q_2 - 9999X_2_11_3 >= - 9999
Q_7 - Q_8 - 9999X_8_7_3 >= - 10000	Q_11 - Q_3 - 9999X_3_11_3 >= - 9999
Q_7 - Q_9 - 9999X_9_7_3 >= - 10000	Q_11 - Q_4 - 9999X_4_11_3 >= - 9999
Q_7 - Q_10 - 9999X_10_7_3 >= - 10000	Q_11 - Q_5 - 9999X_5_11_3 >= - 9999
Q_7 - Q_11 - 9999X_11_7_3 >= - 10000	Q_11 - Q_6 - 9999X_6_11_3 >= - 9999
Q_8 - Q_0 - 9999X_0_8_3 >= - 10000	Q_11 - Q_7 - 9999X_7_11_3 >= - 9999
Q_8 - Q_1 - 9999X_1_8_3 >= - 10000	Q_11 - Q_8 - 9999X_8_11_3 >= - 9999
Q_8 - Q_2 - 9999X_2_8_3 >= - 10000	Q_11 - Q_9 - 9999X_9_11_3 >= - 9999
Q_8 - Q_3 - 9999X_3_8_3 >= - 10000	Q_11 - Q_10 - 9999X_10_11_3 >= - 9999
Q_8 - Q_4 - 9999X_4_8_3 >= - 10000	Q_0 - Q_1 - 9999X_1_0_4 >= - 9999
Q_8 - Q_5 - 9999X_5_8_3 >= - 10000	Q_0 - Q_2 - 9999X_2_0_4 >= - 9999
Q_8 - Q_6 - 9999X_6_8_3 >= - 10000	Q_0 - Q_3 - 9999X_3_0_4 >= - 9999
Q_8 - Q_7 - 9999X_7_8_3 >= - 10000	Q_0 - Q_4 - 9999X_4_0_4 >= - 9999
Q_8 - Q_9 - 9999X_9_8_3 >= - 10000	Q_0 - Q_5 - 9999X_5_0_4 >= - 9999
Q_8 - Q_10 - 9999X_10_8_3 >= - 10000	Q_0 - Q_6 - 9999X_6_0_4 >= - 9999
Q_8 - Q_11 - 9999X_11_8_3 >= - 10000	Q_0 - Q_7 - 9999X_7_0_4 >= - 9999
Q_9 - Q_0 - 9999X_0_9_3 >= - 10000	Q_0 - Q_8 - 9999X_8_0_4 >= - 9999
Q_9 - Q_1 - 9999X_1_9_3 >= - 10000	Q_0 - Q_9 - 9999X_9_0_4 >= - 9999
Q_9 - Q_2 - 9999X_2_9_3 >= - 10000	Q_0 - Q_10 - 9999X_10_0_4 >= - 9999
Q_9 - Q_3 - 9999X_3_9_3 >= - 10000	Q_0 - Q_11 - 9999X_11_0_4 >= - 9999
Q_9 - Q_4 - 9999X_4_9_3 >= - 10000	Q_1 - Q_0 - 9999X_0_1_4 >= - 9998
Q_9 - Q_5 - 9999X_5_9_3 >= - 10000	Q_1 - Q_2 - 9999X_2_1_4 >= - 9998
Q_9 - Q_6 - 9999X_6_9_3 >= - 10000	Q_1 - Q_3 - 9999X_3_1_4 >= - 9998
Q_9 - Q_7 - 9999X_7_9_3 >= - 10000	Q_1 - Q_4 - 9999X_4_1_4 >= - 9998
Q_9 - Q_8 - 9999X_8_9_3 >= - 10000	Q_1 - Q_5 - 9999X_5_1_4 >= - 9998

Q_1 - Q_6 - 9999X_6_1_4 >= - 9998	Q_5 - Q_1 - 9999X_1_5_4 >= - 9998
Q_1 - Q_7 - 9999X_7_1_4 >= - 9998	Q_5 - Q_2 - 9999X_2_5_4 >= - 9998
Q_1 - Q_8 - 9999X_8_1_4 >= - 9998	Q_5 - Q_3 - 9999X_3_5_4 >= - 9998
Q_1 - Q_9 - 9999X_9_1_4 >= - 9998	Q_5 - Q_4 - 9999X_4_5_4 >= - 9998
Q_1 - Q_10 - 9999X_10_1_4 >= - 9998	Q_5 - Q_6 - 9999X_6_5_4 >= - 9998
Q_1 - Q_11 - 9999X_11_1_4 >= - 9998	Q_5 - Q_7 - 9999X_7_5_4 >= - 9998
Q_2 - Q_0 - 9999X_0_2_4 >= - 9998	Q_5 - Q_8 - 9999X_8_5_4 >= - 9998
Q_2 - Q_1 - 9999X_1_2_4 >= - 9998	Q_5 - Q_9 - 9999X_9_5_4 >= - 9998
Q_2 - Q_3 - 9999X_3_2_4 >= - 9998	Q_5 - Q_10 - 9999X_10_5_4 >= - 9998
Q_2 - Q_4 - 9999X_4_2_4 >= - 9998	Q_5 - Q_11 - 9999X_11_5_4 >= - 9998
Q_2 - Q_5 - 9999X_5_2_4 >= - 9998	Q_6 - Q_0 - 9999X_0_6_4 >= - 10000
Q_2 - Q_6 - 9999X_6_2_4 >= - 9998	Q_6 - Q_1 - 9999X_1_6_4 >= - 10000
Q_2 - Q_7 - 9999X_7_2_4 >= - 9998	Q_6 - Q_2 - 9999X_2_6_4 >= - 10000
Q_2 - Q_8 - 9999X_8_2_4 >= - 9998	Q_6 - Q_3 - 9999X_3_6_4 >= - 10000
Q_2 - Q_9 - 9999X_9_2_4 >= - 9998	Q_6 - Q_4 - 9999X_4_6_4 >= - 10000
Q_2 - Q_10 - 9999X_10_2_4 >= - 9998	Q_6 - Q_5 - 9999X_5_6_4 >= - 10000
Q_2 - Q_11 - 9999X_11_2_4 >= - 9998	Q_6 - Q_7 - 9999X_7_6_4 >= - 10000
Q_3 - Q_0 - 9999X_0_3_4 >= - 9998	Q_6 - Q_8 - 9999X_8_6_4 >= - 10000
Q_3 - Q_1 - 9999X_1_3_4 >= - 9998	Q_6 - Q_9 - 9999X_9_6_4 >= - 10000
Q_3 - Q_2 - 9999X_2_3_4 >= - 9998	Q_6 - Q_10 - 9999X_10_6_4 >= - 10000
Q_3 - Q_4 - 9999X_4_3_4 >= - 9998	Q_6 - Q_11 - 9999X_11_6_4 >= - 10000
Q_3 - Q_5 - 9999X_5_3_4 >= - 9998	Q_7 - Q_0 - 9999X_0_7_4 >= - 10000
Q_3 - Q_6 - 9999X_6_3_4 >= - 9998	Q_7 - Q_1 - 9999X_1_7_4 >= - 10000
Q_3 - Q_7 - 9999X_7_3_4 >= - 9998	Q_7 - Q_2 - 9999X_2_7_4 >= - 10000
Q_3 - Q_8 - 9999X_8_3_4 >= - 9998	Q_7 - Q_3 - 9999X_3_7_4 >= - 10000
Q_3 - Q_9 - 9999X_9_3_4 >= - 9998	Q_7 - Q_4 - 9999X_4_7_4 >= - 10000
Q_3 - Q_10 - 9999X_10_3_4 >= - 9998	Q_7 - Q_5 - 9999X_5_7_4 >= - 10000
Q_3 - Q_11 - 9999X_11_3_4 >= - 9998	Q_7 - Q_6 - 9999X_6_7_4 >= - 10000
Q_4 - Q_0 - 9999X_0_4_4 >= - 9998	Q_7 - Q_8 - 9999X_8_7_4 >= - 10000
Q_4 - Q_1 - 9999X_1_4_4 >= - 9998	Q_7 - Q_9 - 9999X_9_7_4 >= - 10000
Q_4 - Q_2 - 9999X_2_4_4 >= - 9998	Q_7 - Q_10 - 9999X_10_7_4 >= - 10000
Q_4 - Q_3 - 9999X_3_4_4 >= - 9998	Q_7 - Q_11 - 9999X_11_7_4 >= - 10000
Q_4 - Q_5 - 9999X_5_4_4 >= - 9998	Q_8 - Q_0 - 9999X_0_8_4 >= - 10000
Q_4 - Q_6 - 9999X_6_4_4 >= - 9998	Q_8 - Q_1 - 9999X_1_8_4 >= - 10000
Q_4 - Q_7 - 9999X_7_4_4 >= - 9998	Q_8 - Q_2 - 9999X_2_8_4 >= - 10000
Q_4 - Q_8 - 9999X_8_4_4 >= - 9998	Q_8 - Q_3 - 9999X_3_8_4 >= - 10000
Q_4 - Q_9 - 9999X_9_4_4 >= - 9998	Q_8 - Q_4 - 9999X_4_8_4 >= - 10000
Q_4 - Q_10 - 9999X_10_4_4 >= - 9998	Q_8 - Q_5 - 9999X_5_8_4 >= - 10000
Q_4 - Q_11 - 9999X_11_4_4 >= - 9998	Q_8 - Q_6 - 9999X_6_8_4 >= - 10000
Q_5 - Q_0 - 9999X_0_5_4 >= - 9998	Q_8 - Q_7 - 9999X_7_8_4 >= - 10000

Q_8 - Q_9 - 9999X_9_8_4 >= - 10000	Q_0 - Q_5 - 9999X_5_0_5 >= - 9999
Q_8 - Q_10 - 9999X_10_8_4 >= - 10000	Q_0 - Q_6 - 9999X_6_0_5 >= - 9999
Q_8 - Q_11 - 9999X_11_8_4 >= - 10000	Q_0 - Q_7 - 9999X_7_0_5 >= - 9999
Q_9 - Q_0 - 9999X_0_9_4 >= - 10000	Q_0 - Q_8 - 9999X_8_0_5 >= - 9999
Q_9 - Q_1 - 9999X_1_9_4 >= - 10000	Q_0 - Q_9 - 9999X_9_0_5 >= - 9999
Q_9 - Q_2 - 9999X_2_9_4 >= - 10000	Q_0 - Q_10 - 9999X_10_0_5 >= - 9999
Q_9 - Q_3 - 9999X_3_9_4 >= - 10000	Q_0 - Q_11 - 9999X_11_0_5 >= - 9999
Q_9 - Q_4 - 9999X_4_9_4 >= - 10000	Q_1 - Q_0 - 9999X_0_1_5 >= - 9998
Q_9 - Q_5 - 9999X_5_9_4 >= - 10000	Q_1 - Q_2 - 9999X_2_1_5 >= - 9998
Q_9 - Q_6 - 9999X_6_9_4 >= - 10000	Q_1 - Q_3 - 9999X_3_1_5 >= - 9998
Q_9 - Q_7 - 9999X_7_9_4 >= - 10000	Q_1 - Q_4 - 9999X_4_1_5 >= - 9998
Q_9 - Q_8 - 9999X_8_9_4 >= - 10000	Q_1 - Q_5 - 9999X_5_1_5 >= - 9998
Q_9 - Q_10 - 9999X_10_9_4 >= - 10000	Q_1 - Q_6 - 9999X_6_1_5 >= - 9998
Q_9 - Q_11 - 9999X_11_9_4 >= - 10000	Q_1 - Q_7 - 9999X_7_1_5 >= - 9998
Q_10 - Q_0 - 9999X_0_10_4 >= - 10000	Q_1 - Q_8 - 9999X_8_1_5 >= - 9998
Q_10 - Q_1 - 9999X_1_10_4 >= - 10000	Q_1 - Q_9 - 9999X_9_1_5 >= - 9998
Q_10 - Q_2 - 9999X_2_10_4 >= - 10000	Q_1 - Q_10 - 9999X_10_1_5 >= - 9998
Q_10 - Q_3 - 9999X_3_10_4 >= - 10000	Q_1 - Q_11 - 9999X_11_1_5 >= - 9998
Q_10 - Q_4 - 9999X_4_10_4 >= - 10000	Q_2 - Q_0 - 9999X_0_2_5 >= - 9998
Q_10 - Q_5 - 9999X_5_10_4 >= - 10000	Q_2 - Q_1 - 9999X_1_2_5 >= - 9998
Q_10 - Q_6 - 9999X_6_10_4 >= - 10000	Q_2 - Q_3 - 9999X_3_2_5 >= - 9998
Q_10 - Q_7 - 9999X_7_10_4 >= - 10000	Q_2 - Q_4 - 9999X_4_2_5 >= - 9998
Q_10 - Q_8 - 9999X_8_10_4 >= - 10000	Q_2 - Q_5 - 9999X_5_2_5 >= - 9998
Q_10 - Q_9 - 9999X_9_10_4 >= - 10000	Q_2 - Q_6 - 9999X_6_2_5 >= - 9998
Q_10 - Q_11 - 9999X_11_10_4 >= - 10000	Q_2 - Q_7 - 9999X_7_2_5 >= - 9998
Q_11 - Q_0 - 9999X_0_11_4 >= - 9999	Q_2 - Q_8 - 9999X_8_2_5 >= - 9998
Q_11 - Q_1 - 9999X_1_11_4 >= - 9999	Q_2 - Q_9 - 9999X_9_2_5 >= - 9998
Q_11 - Q_2 - 9999X_2_11_4 >= - 9999	Q_2 - Q_10 - 9999X_10_2_5 >= - 9998
Q_11 - Q_3 - 9999X_3_11_4 >= - 9999	Q_2 - Q_11 - 9999X_11_2_5 >= - 9998
Q_11 - Q_4 - 9999X_4_11_4 >= - 9999	Q_3 - Q_0 - 9999X_0_3_5 >= - 9998
Q_11 - Q_5 - 9999X_5_11_4 >= - 9999	Q_3 - Q_1 - 9999X_1_3_5 >= - 9998
Q_11 - Q_6 - 9999X_6_11_4 >= - 9999	Q_3 - Q_2 - 9999X_2_3_5 >= - 9998
Q_11 - Q_7 - 9999X_7_11_4 >= - 9999	Q_3 - Q_4 - 9999X_4_3_5 >= - 9998
Q_11 - Q_8 - 9999X_8_11_4 >= - 9999	Q_3 - Q_5 - 9999X_5_3_5 >= - 9998
Q_11 - Q_9 - 9999X_9_11_4 >= - 9999	Q_3 - Q_6 - 9999X_6_3_5 >= - 9998
Q_11 - Q_10 - 9999X_10_11_4 >= - 9999	Q_3 - Q_7 - 9999X_7_3_5 >= - 9998
Q_0 - Q_1 - 9999X_1_0_5 >= - 9999	Q_3 - Q_8 - 9999X_8_3_5 >= - 9998
Q_0 - Q_2 - 9999X_2_0_5 >= - 9999	Q_3 - Q_9 - 9999X_9_3_5 >= - 9998
Q_0 - Q_3 - 9999X_3_0_5 >= - 9999	Q_3 - Q_10 - 9999X_10_3_5 >= - 9998
Q_0 - Q_4 - 9999X_4_0_5 >= - 9999	Q_3 - Q_11 - 9999X_11_3_5 >= - 9998

Q_4 - Q_0 - 9999X_0_4_5 >= - 9998	Q_7 - Q_8 - 9999X_8_7_5 >= - 10000
Q_4 - Q_1 - 9999X_1_4_5 >= - 9998	Q_7 - Q_9 - 9999X_9_7_5 >= - 10000
Q_4 - Q_2 - 9999X_2_4_5 >= - 9998	Q_7 - Q_10 - 9999X_10_7_5 >= - 10000
Q_4 - Q_3 - 9999X_3_4_5 >= - 9998	Q_7 - Q_11 - 9999X_11_7_5 >= - 10000
Q_4 - Q_5 - 9999X_5_4_5 >= - 9998	Q_8 - Q_0 - 9999X_0_8_5 >= - 10000
Q_4 - Q_6 - 9999X_6_4_5 >= - 9998	Q_8 - Q_1 - 9999X_1_8_5 >= - 10000
Q_4 - Q_7 - 9999X_7_4_5 >= - 9998	Q_8 - Q_2 - 9999X_2_8_5 >= - 10000
Q_4 - Q_8 - 9999X_8_4_5 >= - 9998	Q_8 - Q_3 - 9999X_3_8_5 >= - 10000
Q_4 - Q_9 - 9999X_9_4_5 >= - 9998	Q_8 - Q_4 - 9999X_4_8_5 >= - 10000
Q_4 - Q_10 - 9999X_10_4_5 >= - 9998	Q_8 - Q_5 - 9999X_5_8_5 >= - 10000
Q_4 - Q_11 - 9999X_11_4_5 >= - 9998	Q_8 - Q_6 - 9999X_6_8_5 >= - 10000
Q_5 - Q_0 - 9999X_0_5_5 >= - 9998	Q_8 - Q_7 - 9999X_7_8_5 >= - 10000
Q_5 - Q_1 - 9999X_1_5_5 >= - 9998	Q_8 - Q_9 - 9999X_9_8_5 >= - 10000
Q_5 - Q_2 - 9999X_2_5_5 >= - 9998	Q_8 - Q_10 - 9999X_10_8_5 >= - 10000
Q_5 - Q_3 - 9999X_3_5_5 >= - 9998	Q_8 - Q_11 - 9999X_11_8_5 >= - 10000
Q_5 - Q_4 - 9999X_4_5_5 >= - 9998	Q_9 - Q_0 - 9999X_0_9_5 >= - 10000
Q_5 - Q_6 - 9999X_6_5_5 >= - 9998	Q_9 - Q_1 - 9999X_1_9_5 >= - 10000
Q_5 - Q_7 - 9999X_7_5_5 >= - 9998	Q_9 - Q_2 - 9999X_2_9_5 >= - 10000
Q_5 - Q_8 - 9999X_8_5_5 >= - 9998	Q_9 - Q_3 - 9999X_3_9_5 >= - 10000
Q_5 - Q_9 - 9999X_9_5_5 >= - 9998	Q_9 - Q_4 - 9999X_4_9_5 >= - 10000
Q_5 - Q_10 - 9999X_10_5_5 >= - 9998	Q_9 - Q_5 - 9999X_5_9_5 >= - 10000
Q_5 - Q_11 - 9999X_11_5_5 >= - 9998	Q_9 - Q_6 - 9999X_6_9_5 >= - 10000
Q_6 - Q_0 - 9999X_0_6_5 >= - 10000	Q_9 - Q_7 - 9999X_7_9_5 >= - 10000
Q_6 - Q_1 - 9999X_1_6_5 >= - 10000	Q_9 - Q_8 - 9999X_8_9_5 >= - 10000
Q_6 - Q_2 - 9999X_2_6_5 >= - 10000	Q_9 - Q_10 - 9999X_10_9_5 >= - 10000
Q_6 - Q_3 - 9999X_3_6_5 >= - 10000	Q_9 - Q_11 - 9999X_11_9_5 >= - 10000
Q_6 - Q_4 - 9999X_4_6_5 >= - 10000	Q_10 - Q_0 - 9999X_0_10_5 >= - 10000
Q_6 - Q_5 - 9999X_5_6_5 >= - 10000	Q_10 - Q_1 - 9999X_1_10_5 >= - 10000
Q_6 - Q_7 - 9999X_7_6_5 >= - 10000	Q_10 - Q_2 - 9999X_2_10_5 >= - 10000
Q_6 - Q_8 - 9999X_8_6_5 >= - 10000	Q_10 - Q_3 - 9999X_3_10_5 >= - 10000
Q_6 - Q_9 - 9999X_9_6_5 >= - 10000	Q_10 - Q_4 - 9999X_4_10_5 >= - 10000
Q_6 - Q_10 - 9999X_10_6_5 >= - 10000	Q_10 - Q_5 - 9999X_5_10_5 >= - 10000
Q_6 - Q_11 - 9999X_11_6_5 >= - 10000	Q_10 - Q_6 - 9999X_6_10_5 >= - 10000
Q_7 - Q_0 - 9999X_0_7_5 >= - 10000	Q_10 - Q_7 - 9999X_7_10_5 >= - 10000
Q_7 - Q_1 - 9999X_1_7_5 >= - 10000	Q_10 - Q_8 - 9999X_8_10_5 >= - 10000
Q_7 - Q_2 - 9999X_2_7_5 >= - 10000	Q_10 - Q_9 - 9999X_9_10_5 >= - 10000
Q_7 - Q_3 - 9999X_3_7_5 >= - 10000	Q_10 - Q_11 - 9999X_11_10_5 >= - 10000
Q_7 - Q_4 - 9999X_4_7_5 >= - 10000	Q_11 - Q_0 - 9999X_0_11_5 >= - 9999
Q_7 - Q_5 - 9999X_5_7_5 >= - 10000	Q_11 - Q_1 - 9999X_1_11_5 >= - 9999
Q_7 - Q_6 - 9999X_6_7_5 >= - 10000	Q_11 - Q_2 - 9999X_2_11_5 >= - 9999

$$Q_{11} - Q_3 - 9999X_{3_11_5} \geq -9999$$

$$Q_{11} - Q_4 - 9999X_{4_11_5} \geq -9999$$

$$Q_{11} - Q_5 - 9999X_{5_11_5} \geq -9999$$

$$Q_{11} - Q_6 - 9999X_{6_11_5} \geq -9999$$

$$Q_{11} - Q_7 - 9999X_{7_11_5} \geq -9999$$

$$Q_{11} - Q_8 - 9999X_{8_11_5} \geq -9999$$

$$Q_{11} - Q_9 - 9999X_{9_11_5} \geq -9999$$

$$Q_{11} - Q_{10} - 9999X_{10_11_5} \geq -9999$$

Restrição de capacidade de carga em cada nó

Com relação a capacidade de carga, esta é limitada pelas restrições (54) e (55). Considerando a coleta como sendo positiva e a entrega como sendo negativa, e que cada caminhão só pode transportar uma máquina por vez e também que o veículo deve sair e retornar à garagem sem carga, a capacidade que o veículo deve ter em cada nó é:

$$Q_i = 0 \quad \forall i \in G^- \cup D \cup G^+ \quad (54)$$

$$Q_0 = 0$$

$$Q_6 = 0$$

$$Q_7 = 0$$

$$Q_8 = 0$$

$$Q_9 = 0$$

$$Q_{10} = 0$$

$$Q_{11} = 0$$

$$Q_i = 1 \quad \forall i \in P \quad (55)$$

$$Q_1 = 1$$

$$Q_2 = 1$$

$$Q_3 = 1$$

$$Q_4 = 1$$

$$Q_5 = 1$$

Restrições de frota heterogênea

As restrições (56), (57), (58) e (59) são restrições de frota heterogênea e são utilizadas para que os veículos prancha que realizam o atendimento em um determinado talhão sejam compatíveis com as dimensões e peso das máquinas. Neste caso, são utilizados quatro tipos de veículos prancha: plataforma, dois eixos, três eixos e quatro eixos. Os talhões são agrupados conforme o tipo de veículo necessário para realizar o atendimento. Neste exemplo, foram considerados dois tipos de veículos: plataforma e de 3 eixos.

$$\sum_{k \in K_1} x_{i,n+i}^k = 1 \quad \forall i \in P_1 \quad (56)$$

$$X_{1_6_1} = 1$$

$$\sum_{i \in K_2} x_{i,n+i}^k = 1 \quad \forall i \in P_2 \quad (57)$$

$$\sum_{i \in K_3} x_{i,n+i}^k = 1 \quad \forall i \in P_3 \quad (58)$$

$$X_{2_7_2} + X_{2_7_3} + X_{2_7_4} + X_{2_7_5} = 1$$

$$X_{3_8_2} + X_{3_8_3} + X_{3_8_4} + X_{3_8_5} = 1$$

$$X_{4_9_2} + X_{4_9_3} + X_{4_9_4} + X_{4_9_5} = 1$$

$$X_{5_10_2} + X_{5_10_3} + X_{5_10_4} + X_{5_10_5} = 1$$

$$\sum_{i \in K_4} x_{i,n+i}^k = 1 \quad \forall i \in P_4 \quad (59)$$

Restrição de não negatividade

A restrição (60) garante que as variáveis: A_i , B_i , $M_{i,j}$, Q_i e $W_{i,j}$ não sejam negativas.

$$A_i; B_i; M_{i,j}; Q_i; W_{i,j} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (60)$$

A_0 >= 0	A_9 >= 0	B_6 >= 0	Q_3 >= 0
A_1 >= 0	A_10 >= 0	B_7 >= 0	Q_4 >= 0
A_2 >= 0	A_11 >= 0	B_8 >= 0	Q_5 >= 0
A_3 >= 0	B_0 >= 0	B_9 >= 0	Q_6 >= 0
A_4 >= 0	B_1 >= 0	B_10 >= 0	Q_7 >= 0
A_5 >= 0	B_2 >= 0	B_11 >= 0	Q_8 >= 0
A_6 >= 0	B_3 >= 0	Q_0 >= 0	Q_9 >= 0
A_7 >= 0	B_4 >= 0	Q_1 >= 0	Q_10 >= 0
A_8 >= 0	B_5 >= 0	Q_2 >= 0	Q_11 >= 0

Restrição binária

Já a restrição (61) é responsável para assegurar que as variáveis $X_{i,j}$'s sejam binárias.

$$x_{i,j}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad k \in K \quad (61)$$

BINARIES

X_0_1_1	X_1_5_1	X_2_9_1	X_4_1_1	X_5_6_1
X_0_2_1	X_1_6_1	X_2_10_1	X_4_2_1	X_5_7_1
X_0_3_1	X_1_7_1	X_2_11_1	X_4_3_1	X_5_8_1
X_0_4_1	X_1_8_1	X_3_0_1	X_4_5_1	X_5_9_1
X_0_5_1	X_1_9_1	X_3_1_1	X_4_6_1	X_5_10_1
X_0_6_1	X_1_10_1	X_3_2_1	X_4_7_1	X_5_11_1
X_0_7_1	X_1_11_1	X_3_4_1	X_4_8_1	X_6_0_1
X_0_8_1	X_2_0_1	X_3_5_1	X_4_9_1	X_6_1_1
X_0_9_1	X_2_1_1	X_3_6_1	X_4_10_1	X_6_2_1
X_0_10_1	X_2_3_1	X_3_7_1	X_4_11_1	X_6_3_1
X_0_11_1	X_2_4_1	X_3_8_1	X_5_0_1	X_6_4_1
X_1_0_1	X_2_5_1	X_3_9_1	X_5_1_1	X_6_5_1
X_1_2_1	X_2_6_1	X_3_10_1	X_5_2_1	X_6_7_1
X_1_3_1	X_2_7_1	X_3_11_1	X_5_3_1	X_6_8_1
X_1_4_1	X_2_8_1	X_4_0_1	X_5_4_1	X_6_9_1

X_6_10_1	X_10_5_1	X_2_1_2	X_5_9_2	X_9_4_2
X_6_11_1	X_10_6_1	X_2_3_2	X_5_10_2	X_9_5_2
X_7_0_1	X_10_7_1	X_2_4_2	X_5_11_2	X_9_6_2
X_7_1_1	X_10_8_1	X_2_5_2	X_6_0_2	X_9_7_2
X_7_2_1	X_10_9_1	X_2_6_2	X_6_1_2	X_9_8_2
X_7_3_1	X_10_11_1	X_2_7_2	X_6_2_2	X_9_10_2
X_7_4_1	X_11_0_1	X_2_8_2	X_6_3_2	X_9_11_2
X_7_5_1	X_11_1_1	X_2_9_2	X_6_4_2	X_10_0_2
X_7_6_1	X_11_2_1	X_2_10_2	X_6_5_2	X_10_1_2
X_7_8_1	X_11_3_1	X_2_11_2	X_6_7_2	X_10_2_2
X_7_9_1	X_11_4_1	X_3_0_2	X_6_8_2	X_10_3_2
X_7_10_1	X_11_5_1	X_3_1_2	X_6_9_2	X_10_4_2
X_7_11_1	X_11_6_1	X_3_2_2	X_6_10_2	X_10_5_2
X_8_0_1	X_11_7_1	X_3_4_2	X_6_11_2	X_10_6_2
X_8_1_1	X_11_8_1	X_3_5_2	X_7_0_2	X_10_7_2
X_8_2_1	X_11_9_1	X_3_6_2	X_7_1_2	X_10_8_2
X_8_3_1	X_11_10_1	X_3_7_2	X_7_2_2	X_10_9_2
X_8_4_1	X_0_1_2	X_3_8_2	X_7_3_2	X_10_11_2
X_8_5_1	X_0_2_2	X_3_9_2	X_7_4_2	X_11_0_2
X_8_6_1	X_0_3_2	X_3_10_2	X_7_5_2	X_11_1_2
X_8_7_1	X_0_4_2	X_3_11_2	X_7_6_2	X_11_2_2
X_8_9_1	X_0_5_2	X_4_0_2	X_7_8_2	X_11_3_2
X_8_10_1	X_0_6_2	X_4_1_2	X_7_9_2	X_11_4_2
X_8_11_1	X_0_7_2	X_4_2_2	X_7_10_2	X_11_5_2
X_9_0_1	X_0_8_2	X_4_3_2	X_7_11_2	X_11_6_2
X_9_1_1	X_0_9_2	X_4_5_2	X_8_0_2	X_11_7_2
X_9_2_1	X_0_10_2	X_4_6_2	X_8_1_2	X_11_8_2
X_9_3_1	X_0_11_2	X_4_7_2	X_8_2_2	X_11_9_2
X_9_4_1	X_1_0_2	X_4_8_2	X_8_3_2	X_11_10_2
X_9_5_1	X_1_2_2	X_4_9_2	X_8_4_2	X_0_1_3
X_9_6_1	X_1_3_2	X_4_10_2	X_8_5_2	X_0_2_3
X_9_7_1	X_1_4_2	X_4_11_2	X_8_6_2	X_0_3_3
X_9_8_1	X_1_5_2	X_5_0_2	X_8_7_2	X_0_4_3
X_9_10_1	X_1_6_2	X_5_1_2	X_8_9_2	X_0_5_3
X_9_11_1	X_1_7_2	X_5_2_2	X_8_10_2	X_0_6_3
X_10_0_1	X_1_8_2	X_5_3_2	X_8_11_2	X_0_7_3
X_10_1_1	X_1_9_2	X_5_4_2	X_9_0_2	X_0_8_3
X_10_2_1	X_1_10_2	X_5_6_2	X_9_1_2	X_0_9_3
X_10_3_1	X_1_11_2	X_5_7_2	X_9_2_2	X_0_10_3
X_10_4_1	X_2_0_2	X_5_8_2	X_9_3_2	X_0_11_3

X_1_0_3	X_4_8_3	X_8_3_3	X_11_10_3	X_3_7_4
X_1_2_3	X_4_9_3	X_8_4_3	X_0_1_4	X_3_8_4
X_1_3_3	X_4_10_3	X_8_5_3	X_0_2_4	X_3_9_4
X_1_4_3	X_4_11_3	X_8_6_3	X_0_3_4	X_3_10_4
X_1_5_3	X_5_0_3	X_8_7_3	X_0_4_4	X_3_11_4
X_1_6_3	X_5_1_3	X_8_9_3	X_0_5_4	X_4_0_4
X_1_7_3	X_5_2_3	X_8_10_3	X_0_6_4	X_4_1_4
X_1_8_3	X_5_3_3	X_8_11_3	X_0_7_4	X_4_2_4
X_1_9_3	X_5_4_3	X_9_0_3	X_0_8_4	X_4_3_4
X_1_10_3	X_5_6_3	X_9_1_3	X_0_9_4	X_4_5_4
X_1_11_3	X_5_7_3	X_9_2_3	X_0_10_4	X_4_6_4
X_2_0_3	X_5_8_3	X_9_3_3	X_0_11_4	X_4_7_4
X_2_1_3	X_5_9_3	X_9_4_3	X_1_0_4	X_4_8_4
X_2_3_3	X_5_10_3	X_9_5_3	X_1_2_4	X_4_9_4
X_2_4_3	X_5_11_3	X_9_6_3	X_1_3_4	X_4_10_4
X_2_5_3	X_6_0_3	X_9_7_3	X_1_4_4	X_4_11_4
X_2_6_3	X_6_1_3	X_9_8_3	X_1_5_4	X_5_0_4
X_2_7_3	X_6_2_3	X_9_10_3	X_1_6_4	X_5_1_4
X_2_8_3	X_6_3_3	X_9_11_3	X_1_7_4	X_5_2_4
X_2_9_3	X_6_4_3	X_10_0_3	X_1_8_4	X_5_3_4
X_2_10_3	X_6_5_3	X_10_1_3	X_1_9_4	X_5_4_4
X_2_11_3	X_6_7_3	X_10_2_3	X_1_10_4	X_5_6_4
X_3_0_3	X_6_8_3	X_10_3_3	X_1_11_4	X_5_7_4
X_3_1_3	X_6_9_3	X_10_4_3	X_2_0_4	X_5_8_4
X_3_2_3	X_6_10_3	X_10_5_3	X_2_1_4	X_5_9_4
X_3_4_3	X_6_11_3	X_10_6_3	X_2_3_4	X_5_10_4
X_3_5_3	X_7_0_3	X_10_7_3	X_2_4_4	X_5_11_4
X_3_6_3	X_7_1_3	X_10_8_3	X_2_5_4	X_6_0_4
X_3_7_3	X_7_2_3	X_10_9_3	X_2_6_4	X_6_1_4
X_3_8_3	X_7_3_3	X_10_11_3	X_2_7_4	X_6_2_4
X_3_9_3	X_7_4_3	X_11_0_3	X_2_8_4	X_6_3_4
X_3_10_3	X_7_5_3	X_11_1_3	X_2_9_4	X_6_4_4
X_3_11_3	X_7_6_3	X_11_2_3	X_2_10_4	X_6_5_4
X_4_0_3	X_7_8_3	X_11_3_3	X_2_11_4	X_6_7_4
X_4_1_3	X_7_9_3	X_11_4_3	X_3_0_4	X_6_8_4
X_4_2_3	X_7_10_3	X_11_5_3	X_3_1_4	X_6_9_4
X_4_3_3	X_7_11_3	X_11_6_3	X_3_2_4	X_6_10_4
X_4_5_3	X_8_0_3	X_11_7_3	X_3_4_4	X_6_11_4
X_4_6_3	X_8_1_3	X_11_8_3	X_3_5_4	X_7_0_4
X_4_7_3	X_8_2_3	X_11_9_3	X_3_6_4	X_7_1_4

X_7_2_4	X_10_9_4	X_2_6_5	X_6_1_5	X_9_8_5
X_7_3_4	X_10_11_4	X_2_7_5	X_6_2_5	X_9_10_5
X_7_4_4	X_11_0_4	X_2_8_5	X_6_3_5	X_9_11_5
X_7_5_4	X_11_1_4	X_2_9_5	X_6_4_5	X_10_0_5
X_7_6_4	X_11_2_4	X_2_10_5	X_6_5_5	X_10_1_5
X_7_8_4	X_11_3_4	X_2_11_5	X_6_7_5	X_10_2_5
X_7_9_4	X_11_4_4	X_3_0_5	X_6_8_5	X_10_3_5
X_7_10_4	X_11_5_4	X_3_1_5	X_6_9_5	X_10_4_5
X_7_11_4	X_11_6_4	X_3_2_5	X_6_10_5	X_10_5_5
X_8_0_4	X_11_7_4	X_3_4_5	X_6_11_5	X_10_6_5
X_8_1_4	X_11_8_4	X_3_5_5	X_7_0_5	X_10_7_5
X_8_2_4	X_11_9_4	X_3_6_5	X_7_1_5	X_10_8_5
X_8_3_4	X_11_10_4	X_3_7_5	X_7_2_5	X_10_9_5
X_8_4_4	X_0_1_5	X_3_8_5	X_7_3_5	X_10_11_5
X_8_5_4	X_0_2_5	X_3_9_5	X_7_4_5	X_11_0_5
X_8_6_4	X_0_3_5	X_3_10_5	X_7_5_5	X_11_1_5
X_8_7_4	X_0_4_5	X_3_11_5	X_7_6_5	X_11_2_5
X_8_9_4	X_0_5_5	X_4_0_5	X_7_8_5	X_11_3_5
X_8_10_4	X_0_6_5	X_4_1_5	X_7_9_5	X_11_4_5
X_8_11_4	X_0_7_5	X_4_2_5	X_7_10_5	X_11_5_5
X_9_0_4	X_0_8_5	X_4_3_5	X_7_11_5	X_11_6_5
X_9_1_4	X_0_9_5	X_4_5_5	X_8_0_5	X_11_7_5
X_9_2_4	X_0_10_5	X_4_6_5	X_8_1_5	X_11_8_5
X_9_3_4	X_0_11_5	X_4_7_5	X_8_2_5	X_11_9_5
X_9_4_4	X_1_0_5	X_4_8_5	X_8_3_5	X_11_10_5
X_9_5_4	X_1_2_5	X_4_9_5	X_8_4_5	
X_9_6_4	X_1_3_5	X_4_10_5	X_8_5_5	
X_9_7_4	X_1_4_5	X_4_11_5	X_8_6_5	
X_9_8_4	X_1_5_5	X_5_0_5	X_8_7_5	
X_9_10_4	X_1_6_5	X_5_1_5	X_8_9_5	
X_9_11_4	X_1_7_5	X_5_2_5	X_8_10_5	
X_10_0_4	X_1_8_5	X_5_3_5	X_8_11_5	
X_10_1_4	X_1_9_5	X_5_4_5	X_9_0_5	
X_10_2_4	X_1_10_5	X_5_6_5	X_9_1_5	
X_10_3_4	X_1_11_5	X_5_7_5	X_9_2_5	
X_10_4_4	X_2_0_5	X_5_8_5	X_9_3_5	
X_10_5_4	X_2_1_5	X_5_9_5	X_9_4_5	
X_10_6_4	X_2_3_5	X_5_10_5	X_9_5_5	
X_10_7_4	X_2_4_5	X_5_11_5	X_9_6_5	
X_10_8_4	X_2_5_5	X_6_0_5	X_9_7_5	

Resultados

Na Tabela 24 e Figura 10, visualiza-se a rota para cada veículo prancha no transporte das cinco máquinas quando o objetivo foi minimizar o atraso, o número de veículos e a distância ponderada pela qualidade da estrada.

Tabela 24: Rotas dos veículos prancha para o transporte de 5 máquinas

Tipo / nº do veículo	Rota
Minimizar o atraso	
3 eixos / nº1	Garagem → Talhão-16 → Talhão-478 → Talhão-75 → Talhão-490 → Garagem
3 eixos / nº2	Garagem → Talhão-82 → Talhão-491 → Talhão-133 → Talhão-570 → Garagem
Plataforma / nº1	Garagem → Talhão-10 → Talhão-418 → Garagem
Minimizar o número de veículos	
3 eixos / nº1	Garagem → Talhão-16 → Talhão-478 → Talhão-75 → Talhão-490 → Garagem
3 eixos / nº2	Garagem → Talhão-82 → Talhão-491 → Talhão-133 → Talhão-570 → Garagem
Plataforma / nº1	Garagem → Talhão-10 → Talhão-418 → Garagem
Minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada	
3 eixos / nº1	Garagem → Talhão-16 → Talhão-478 → Talhão-75 → Talhão-490 → Garagem
3 eixos / nº2	Garagem → Talhão-82 → Talhão-491 → Talhão-133 → Talhão-570 → Garagem
Plataforma / nº1	Garagem → Talhão-10 → Talhão-418 → Garagem

→ Veículo prancha vazio
→ Veículo prancha carregado

A função objetivo foi de 01:05 horas quando o objetivo foi minimizar o atraso, no qual o veículo prancha 3 não conseguiu retornar para a garagem no mesmo dia devido à distância. Neste caso, os talhões são muito afastados uns dos outros e o último talhão está muito distante da garagem, levando o veículo prancha a exceder o horário (18:00 horas), retornando à garagem no outro dia, já que a legislação de trânsito brasileira não permite que veículos longos se locomovam à noite.

Quando o objetivo foi minimizar o número de veículos, o valor foi três veículos prancha, ou seja, três veículos é a menor quantidade para viabilizar o transporte sem atrasar mais que 01:05 horas. Com relação a minimização da distância ponderada pela qualidade da estrada, o valor da função objetivo foi de 411,998 km.

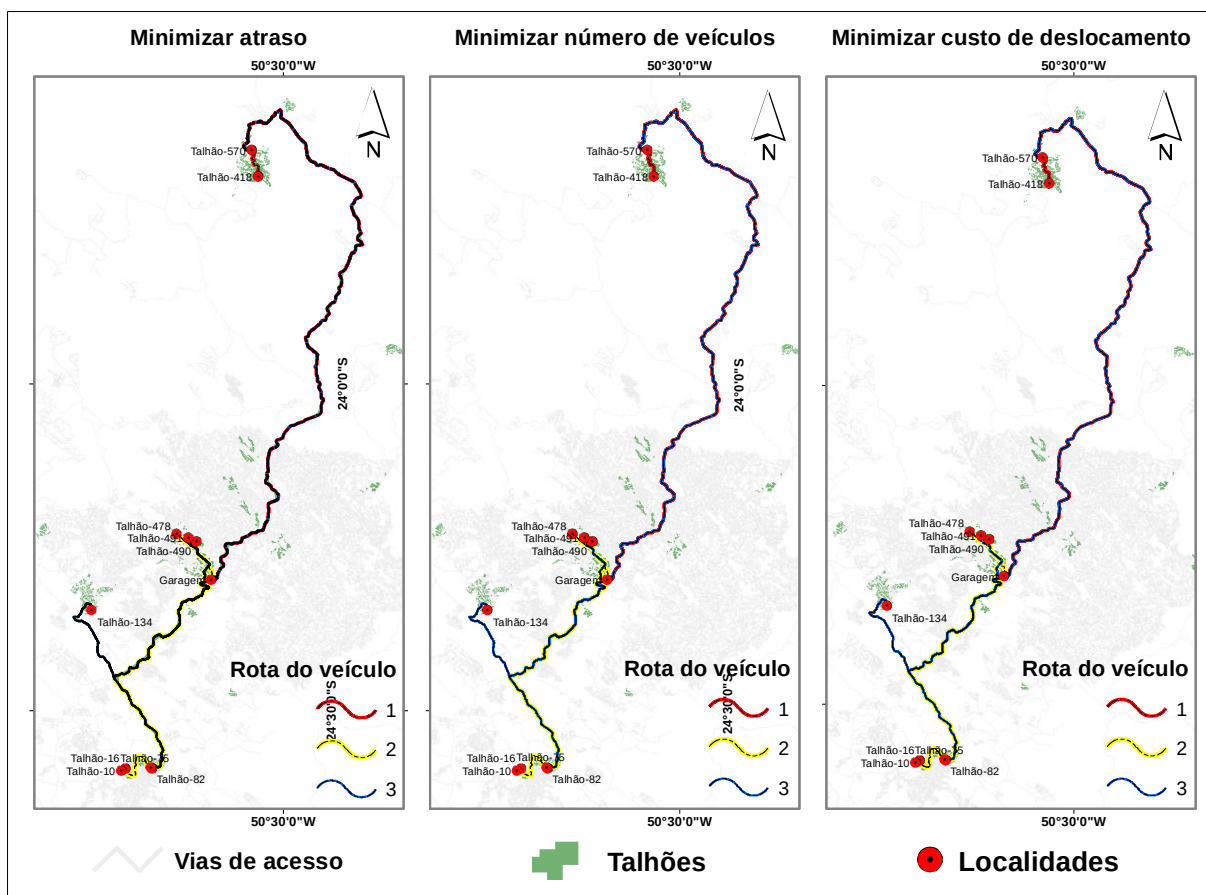


Figura 10: Espacialização do transporte de 5 máquinas considerando o número de veículos que a empresa possui.

Os horários em que cada talhão foi atendido e os tempos de atrasos para o transporte de cinco máquinas estão na Tabela 25. Nesse contexto, nota-se um atraso para que o veículo prancha 3 retorne à garagem no tempo determinado (18:00 horas). Esse veículo completou sua rota no outro dia.

Tabela 25: Horários de atendimento dos talhões para o transporte de cinco máquinas

Coleta				Entrega		
Minimizar o atraso						
Tipo / nº do veículo	Origem	Ho. de atendimento	Atraso	Destino	Ho. de atendimento	Atraso
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
3 eixos / nº1	Talhão-16	07:07	00:00	Talhão-478	09:04	00:00
3 eixos / nº1	Talhão-75	10:46	00:00	Talhão-490	12:22	00:00
3 eixos / nº2	Talhão-82	06:53	00:00	Talhão-491	08:31	00:00
3 eixos / nº2	Talhão-133	13:00	00:00	Talhão-570	16:28	00:00
Plataforma / nº1	Talhão-10	11:00	00:00	Talhão-418	14:51	00:00
-	-	-	-	Garagem	19:05	01:05
Minimizar o número de veículos						
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
3 eixos / nº1	Talhão-16	07:07	00:00	Talhão-478	09:04	00:00

3 eixos / nº1	Talhão-75	11:00	00:00	Talhão-490	12:36	00:00
3 eixos / nº2	Talhão-82	06:53	00:00	Talhão-491	08:31	00:00
3 eixos / nº2	Talhão-133	13:00	00:00	Talhão-570	16:28	00:00
Plataforma / nº1	Talhão-10	12:00	00:00	Talhão-418	15:51	00:00
-	-	-	-	Garagem	19:05	01:05
Minimizar a distância ponderada pela qualidade da estrada						
-	Garagem	06:00	-	-	-	-
3 eixos / nº1	Talhão-16	07:07	00:00	Talhão-478	09:04	00:00
3 eixos / nº1	Talhão-75	11:00	00:00	Talhão-490	12:36	00:00
3 eixos / nº2	Talhão-82	06:53	00:00	Talhão-491	08:31	00:00
3 eixos / nº2	Talhão-133	13:00	00:00	Talhão-570	16:28	00:00
Plataforma / nº1	Talhão-10	12:00	00:00	Talhão-418	15:51	00:00
-	-	-	-	Garagem	19:05	01:05

Ho.: Horário

Com base neste pequeno exemplo foi possível visualizar o funcionamento do modelo matemático de programação inteira mista para o problema de transporte de máquinas florestais.

10 ANEXO II: MODELO ALGÉBRICO DESENVOLVIDO EM PYTHON

Código fonte para geração do modelo algébrico de otimização do transporte de máquinas florestais em linguagem *Python*.

```
# -*- coding: utf-8 -*-

from os.path import dirname, join, realpath
arq = open(join(dirname(realpath(__file__))+'\Restricoes.txt', 'w'))

P = [1,2,3,4,5]
D = [6,7,8,9,10]
K = [1,2,3,4,5]

n = 5
N = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11]

P1 = [1]
P2 = [2,3,4,5]
#P3 =
#P4 =

K1 = [1]
K2 = [2,3,4,5]
#K3 =
#K4 =

T=[[999,68,67,52,53,55,136,23,18,20,127,0],[68,999,2,18,18,64,201,87,83,85,191,68],[67,2,999,18,18,63,201,87,81,84,190,67],[52,18,18,999,1,48,186,72,66,68,176,52],[53,18,18,1,999,48,186,72,66,68,176,53],[55,64,63,48,48,999,189,75,69,72,178,55],[136,201,201,186,186,189,999,147,142,144,13,136],[23,87,87,72,72,75,147,999,10,7,136,23],[18,83,81,66,66,69,142,10,999,7,132,18],[20,85,84,68,68,72,144,7,7,999,134,20],[127,191,190,176,176,178,13,136,132,134,999,127],[0,68,67,52,53,55,136,23,18,20,127,999]]

c=[[999,23070,22961,17631,17605,18658,46233,7806,5974,6850,42545,0],[23070,999,839,6126,6101,21790,68428,29893,28061,28937,64740,23070],[22961,839,999,6017,5992,21681,68319,29784,27952,28828,64631,22961],[17631,6126,6017,999,390,16351,62988,24453,22621,23498,59300,17631],[17605,6101,5992,390,999,16325,62963,24428,22596,23472,59274,17605],[18658,21790,21681,16351,16325,999,64016,25481,23648,24525,60327,18658],[46233,68428,68319,62988,62963,64016,999,50102,48270,49146,4201,46233],[7806,29893,29784,24453,24428,25481,50102,999,3140,2097,46413,7806],[5974,28061,27952,22621,22596,23648,48270,3140,999,1932,44581,5974],[6850,28937,28828,23498,23472,24525,49146,2097,1932,999,45458,6850],[42545,64740,64631,59300,59274,60327,4201,46413,44581,45458,999,42545],[0,23070,22961,17631,17605,18658,46233,7806,5974,6850,42545,999]]

q= [0,1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, 0]

d=[0, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 0]

e=[360, 660, 420, 600, 360, 780, 360, 360, 360, 360, 360, 360]

l=[1080, 720, 480, 660, 420, 840, 1080, 1080, 1080, 1080, 1080,1145]

M=9999

W=9999
```

```

omega1 = 1
omega2 = 0
omega3 = 0

Gk_mais = 2*n+1
Gk_menos = 0
PD = P+D

# Função objetivo (Eq.22)
arq.write(u'\n \Funcao Objetivo Eq. 22\n')
arq.write(u'\n minimize\n')

# Objetivo 1
arq.write(u'\n \Objetivo 1\n')
A=[]
string=' '
for i in N:
    for j in N:
        for k in K:
            if (i!=j):
                A=A+[str(c[i][j])+ 'X'+ '_'+str(i)+ '_'+str(j)+ '_'+str(k)]
string=str(omega1)+'('
for i in range(0,len(A)):
    if i==(len(A)-1):
        string=string+A[i]+'+'
    else:
        string=string+A[i]+'+'
arq.write(string+'\n')
string=' '
string=string+str(omega2)+'('

# Objetivo 2
arq.write(u'\n \Objetivo 2\n')
for i in N:
    if i==(N[len(N)-1]):
        string=string+'A_'+str(i)+'+'
    else:
        string=string+'A_'+str(i)+'+'

arq.write(string+'\n')
string=' '
string=string+str(omega3)+'('

# Objetivo 3
arq.write(u'\n \Objetivo 3\n')
for j in P:
    for k in K:
        if (j == P[len(P)-1] and k == K[len(K)-1]):
            string=string+'X_'+str(Gk_menos)+'_'+str(j)+'_'+str(k)+'\n'
        else:
            string=string+'X_'+str(Gk_menos)+'_'+str(j)+'_'+str(k)+'+'

arq.write(string+'\n')

arq.write(u'\n subject to\n')

# restrição 23

```



```

arq.write(u'\n \Restricao 23\n')
PGk_mais = P+[Gk_mais]
for k in K:
    A=[]
    string=' '
    for j in PGk_mais:
        A=A+['X'+ '_'+str(Gk_menos)+ '_'+str(j)+ '_'+str(k)]
    for t in range(0,len(A)):
        if t==0:
            string=string+A[t]
        else:
            string=string+' '+A[t]
    arq.write(string+' = 1\n')

```

Restrição 24

```

arq.write(u'\n \Restricao 24 \n')
PGk_menos = [Gk_menos]+D
for k in K:
    A=[]
    string=' '
    for i in PGk_menos:
        A=A+['X'+ '_'+str(i)+ '_'+str(Gk_mais)+ '_'+str(k)]
    for t in range(0,len(A)):
        if t==0:
            string=string+A[t]
        else:
            string=string+' '+A[t]
    arq.write(string+' = 1\n')

```

restrição 25

```

arq.write(u'\n \Restricao 25\n')
for i in P:
    A=[]
    string=' '
    for j in PD:
        for k in K:
            if (i!=j):
                A=A+['X'+ '_'+str(i)+ '_'+str(j)+ '_'+str(k)]
    for i in range(0,len(A)):
        if i==0:
            string=string+A[i]
        else:
            string=string+' '+A[i]
    arq.write(string+u' = 1\n')

```

restrição 26

```

arq.write(u'\n \Restricao 26\n')
PDG_mais = PD+[Gk_mais]
for i in P:
    for k in K:
        A=[]
        B=[]
        string=' '
        for j in PD:
            if (i!=j):
                A=A+['X'+ '_'+str(i)+ '_'+str(j)+ '_'+str(k)]

```

```

for j in PDG_mais:
    if (j!=i and j!=n+i):
        B=B+' - X'+ '_'+str(i+n)+ '_'+str(j)+ '_'+str(k)]

for t in range(0,len(A)):
    if t==0:
        string=string+A[t]
    else:
        string=string+' + '+A[t]

for t in range(0,len(B)):
    string=string+B[t]

arq.write(string+' = 0\n')

```

restrição 27

```

arq.write(u'\n \Restricao 27 \n')
PDG_menos = P+D+[Gk_menos]
for i in P:
    for k in K:
        A=[]
        B=[]
        string=' '
        for j in PDG_menos:
            if (i!=j and j!=n+i):
                A=A+['X'+ '_'+str(j)+ '_'+str(i)+ '_'+str(k)]
        for j in PD:
            if (j!=i):
                B=B+[' - X'+ '_'+str(i)+ '_'+str(j)+ '_'+str(k)]
        for t in range(0,len(A)):
            if t==0:
                string=string+A[t]
            else:
                string=string+' + '+A[t]
        for t in range(0,len(B)):
            string=string+B[t]
        arq.write(string+' = 0\n')

```

restrição 28

```

arq.write(u'\n \Restricao 28 \n')
PDG_mais = PD+[Gk_mais]
for i in D:
    for k in K:
        A=[]
        B=[]
        string=' '
        for j in PD:
            if (i!=j):
                A=A+['X'+ '_'+str(j)+ '_'+str(i)+ '_'+str(k)]

        for j in PDG_mais:
            if (j!=i and j!=n-i):
                B=B+[' - X'+ '_'+str(i)+ '_'+str(j)+ '_'+str(k)]

        for t in range(0,len(A)):
            if t==0:
                string=string+A[t]

```

```

        else:
            string=string+' '+A[t]

    for t in range(0,len(B)):
        string=string+B[t]

    arq.write(string+' = 0\n')

# Restrição 29
arq.write(u'\n \Restricao 29\n')
for k in K:
    for j in N:
        for i in N:
            if (i!=j):
                arq.write('B_'+str(j)+'-B_'+str(i)+'-'+str(M)+'X'+ '_'+str(i)+ '_'+str(j)+ '_'+str(k)+'
>='+str(d[i]+T[i][j]-M)+'\n')

# Restrição 30
arq.write(u'\n \Restricao 30 \n')
for i in N:
    arq.write('B_'+str(i)+' >= '+str(e[i])+'\n')

# Restrição 31
arq.write(u'\n \Restricao 31\n')
for i in N:
    arq.write('B_'+str(i)+str('-A_'+str(i))+' <= '+str(l[i])+'\n')

# Restrição 32
arq.write(u'\n \Restricao 32 \n')
for i in N:
    arq.write('A_'+str(i)+' = 0\n')

# Restrição 33
arq.write(u'\n \Restricao 33 \n')
for k in K:
    for j in N:
        for i in N:
            if (i!=j):
                arq.write('Q_'+str(j)+'-Q_'+str(i)+'-'+str(W)+'X'+ '_'+str(i)+ '_'+str(j)+ '_'+str(k)+'>='+str(q[j]-
W)+'\n')

# Restrição 34
G_menosDG_mais = [Gk_menos]+D+[Gk_mais]
arq.write(u'\n \Restricao 34 \n')
for i in G_menosDG_mais:
    arq.write('Q_'+str(i)+' = 0\n')

# Restrição 35
arq.write(u'\n \Restricao 35 \n')
for i in P:
    arq.write('Q_'+str(i)+' = 1\n')

# Restrição 36
arq.write(u'\n \Restricao 36 \n')
for i in P1:
    string=' '
    for k1 in K1:

```

```

        if k1 != K1[len(K1)-1]:
            string = string + 'X_'+str(i)+'_'+str(n+i)+'_'+str(k1)+'+'
        else:
            string = string + 'X_'+str(i)+'_'+str(n+i)+'_'+str(k1)+'=1'
    arq.write(string+'\n')

# Restrição 37
arq.write(u'\n \Restricao 37 \n')
for i in P2:
    string=' '
    for k2 in K2:
        if k2 != K2[len(K2)-1]:
            string = string + 'X_'+str(i)+'_'+str(n+i)+'_'+str(k2)+'+'
        else:
            string = string + 'X_'+str(i)+'_'+str(n+i)+'_'+str(k2)+'=1'
    arq.write(string+'\n')

## Restrição 38
#arq.write(u'\n \Restricao 38 \n')
#for i in P3:
#    string=""
#    for k3 in K3:
#        if k3 != K3[len(K3)-1]:
#            string = string + 'X_'+str(i)+'_'+str(n+i)+'_'+str(k3)+'+'
#        else:
#            string = string + 'X_'+str(i)+'_'+str(n+i)+'_'+str(k3)+'=1'
#    arq.write(string+'\n')

## Restrição 39
#arq.write(u'\n \Restricao 39 \n')
#for i in P4:
#    string=""
#    for k4 in K4:
#        if k4 != K4[len(K4)-1]:
#            string = string + 'X_'+str(i)+'_'+str(n+i)+'_'+str(k4)+'+'
#        else:
#            string = string + 'X_'+str(i)+'_'+str(n+i)+'_'+str(k4)+'=1'
#    arq.write(string+'\n')

# Restrição 40
arq.write(u'\n \Restricao 40 \n')
for i in N:
    arq.write('A_'+str(i)+' >= 0\n')
for i in N:
    arq.write('B_'+str(i)+' >= 0\n')
for i in N:
    arq.write('Q_'+str(i)+' >= 0\n')

# Restrição 41
arq.write(u'\n \Restricao 41 \n')
arq.write(u'BINARIES \n')
for k in K:
    for i in N:
        for j in N:
            if i!=j:
                arq.write('X_'+str(i)+'_'+str(j)+'_'+str(k)+'\n')
arq.write(u'\n END\n')
arq.close()

```

11 ANEXO III: MODELO DESENVOLVIDO EM OPL

Código fonte para geração do modelo de otimização do transporte de máquinas florestais em *Optimization Programming Language* – OPL.

Arquivo.dat

```

/*****
* OPL 12.7.1.0 Data
* Author: cvgiovanni
* Creation Date: 24/12/2017 at 20:05:36
*****/

C=[
[999 23070 22961 17631 17605 18658 46233 7806 5974 6850 42545 0],
[23070 999 839 6126 6101 21790 68428 29893 28061 28937 64740 23070],
[22961 839 999 6017 5992 21681 68319 29784 27952 28828 64631 22961],
[17631 6126 6017 999 390 16351 62988 24453 22621 23498 59300 17631],
[17605 6101 5992 390 999 16325 62963 24428 22596 23472 59274 17605],
[18658 21790 21681 16351 16325 999 64016 25481 23648 24525 60327 18658],
[46233 68428 68319 62988 62963 64016 999 50102 48270 49146 4201 46233],
[7806 29893 29784 24453 24428 25481 50102 999 3140 2097 46413 7806],
[5974 28061 27952 22621 22596 23648 48270 3140 999 1932 44581 5974],
[6850 28937 28828 23498 23472 24525 49146 2097 1932 999 45458 6850],
[42545 64740 64631 59300 59274 60327 4201 46413 44581 45458 999 42545],
[0 23070 22961 17631 17605 18658 46233 7806 5974 6850 42545 999]
];

TI=[
[999 68 67 52 53 55 136 23 18 20 127 0],
[68 999 2 18 18 64 201 87 83 85 191 68],
[67 2 999 18 18 63 201 87 81 84 190 67],
[52 18 18 999 1 48 186 72 66 68 176 52],
[53 18 18 1 999 48 186 72 66 68 176 53],
[55 64 63 48 48 999 189 75 69 72 178 55],
[136 201 201 186 186 189 999 147 142 144 13 136],
[23 87 87 72 72 75 147 999 10 7 136 23],
[18 83 81 66 66 69 142 10 999 7 132 18],
[20 85 84 68 68 72 144 7 7 999 134 20],
[127 191 190 176 176 178 13 136 132 134 999 127],
[0 68 67 52 53 55 136 23 18 20 127 999]
];

qj=[0, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, 0];
di=[0, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 0];
ei=[360, 660, 420, 600, 360, 780, 360, 360, 360, 360, 360, 360];
li=[1080, 720, 480, 660, 420, 840, 1080, 1080, 1080, 1080, 1080, 1145];

n=5;
M=9999;
W=9999;
b1=1;
b2=0;

```

b3=0;

Arquivo.mod

```

/*****
* OPL 12.7.1.0 Model
* Author: cvgiovanni
* Creation Date: 24/12/2017 at 20:05:36
*****/

```

```

int n = ...;
int M = ...;
int W = ...;
range K = 1..3;
range N = 0..11;
float di[N]=...;
float ei[N]=...;
float li[N]=...;
{int+} GMenos={0};
{int+} GMais={2*n+1};
{int+} P = {1,2,3,4,5};
{int+} D = {6,7,8,9,10};
float b1=...;
float b2=...;
float b3=...;
int qj[N]=...;
int C[N][N]=...;
int TI[N][N]=...;

```

```

{int+} N1 = {1};
{int+} N2 = {2,3,4,5};
//{int+} N3 = ;
//{int+} N4 = ;

```

```

{int+} K1 = {1};
{int+} K2 = {2,3};
//{int+} K3 = ;
//{int+} K4 = ;

```

```

dvar boolean X[N][N][K];
dvar float+ B[N];
dvar int+ Q[N];
dvar float+ A[N];

```

minimize

```

//FUNCAO OBJETIVO * MINIMIZAR A DISTÂNCIA PONDERADA PELA QUALIDADE DA ESTRADA
- ATRASO- NÚMERO DE VEÍCULOS
//EQUAÇÃO 22

```

```

b1*sum (i in N, j in N, k in K: i!=j) C[i,j] * X[i,j,k]
+b2*sum (i in N) A[i]
+b3*sum (i in GMenos, j in P, k in K) X[i,j,k];

```

subject to

```
{
```

```
//GARANTE QUE O VEÍCULO SAIA DA GARAGEM PARA ALGUM NÓ DE COLETA OU GARAGEM DE DESTINO
```

```
forall (k in K)
  const23: sum (i in GMenos, j in P union GMais) X[i,j,k]==1;
```

```
//GARANTE QUE O VEÍCULO SAIA DA GARAGEM DE ORIGEM E VÁ PARA A GARAGEM DE DESTINO OU VÁ DE UM NÓ DE DESTINO PARA A GARAGEM DE DESTINO
```

```
forall (k in K)
  const24: sum (i in D union GMenos, j in GMais) X[i,j,k]==1;
```

```
//RESTRIÇÃO QUE ASSEGURAM QUE CADA NÓ SEJA ATENDIDO APENAS POR UM ÚNICO VEÍCULO E UMA ÚNICA VEZ
```

```
forall (i in P)
  const25: sum (j in P union D, k in K: j!=i) X[i,j,k]==1;
```

```
//RESTRIÇÃO QUE GARANTE QUE O NÓ DE COLETA E ENTREGA SEJA ATENDIDO PELO MESMO VEÍCULO
```

```
forall (i in P, k in K)
  const26: sum (j in P union D: j!=i) X[i,j,k] - sum(j in P union D union GMais: j!=i && j!=n+i)
  X[n+i,j,k]==0;
```

```
//RESTRIÇÕES DE CONTENÇÃO DE FLUXO
```

```
forall (i in P, k in K)
  const27: sum(j in P union D union GMenos: j!=i && j!=n+i) X[j,i,k] - sum (j in P union D: j!=i) X[i,j,k]==0;
```

```
forall (i in D, k in K)
  const28: sum (j in P union D: j!=i) X[j,i,k] - sum(j in P union D union GMais: j!=i && j!=n-i) X[i,j,k]==0;
```

```
//RESTRIÇÃO QUE GARANTE OS HORÁRIO DE ATENDIMENTO
```

```
forall (i in N, j in N, k in K: j!=i)
  const29: B[j] >= B[i] + di[i] + TI[i,j] - M + M * X[i,j,k];
```

```
//RESTRIÇÕES DE JANELA DE TEMPO
```

```
forall (i in N)
  const30: B[i]>=ei[i];
```

```
forall (i in N)
  const31: B[i]<=li[i]+A[i];
```

//RESTRIÇÃO QUE PERMITE OU NÃO O ATRASO

```
forall (i in N)
  const32: A[i]==0;
```

//RESTRIÇÃO QUE GARANTE AS CAPACIDADES DOS VEÍCULOS

```
forall (i in N, j in N, k in K: j!=i)
  const33: Q[j]>=Q[i] + qj[j] - W + W * X[i,j,k];
```

//RESTRIÇÃO DE CAPACIDADE DE VEÍCULO

```
forall (i in GMenos union D union GMais)
  const34: Q[i]==0;
```

```
forall (i in P)
  const35: Q[i] ==1;
```

//RESTRIÇÃO DE FROTA HETEROGÊNEA

```
const36: sum (i in N1, k in K1) X[i,i+n,k]==1;
```

```
forall (i in N2)
  const37: sum (k in K2) X[i,i+n,k]==1;
```

```
//forall (i in N3)
// const38: sum (k in K3) X[i,i+n,k]==1;
```

```
//forall (i in N4)
// const39: sum (k in K4) X[i,i+n,k]==1;
```

```
}
```

```
execute{
  var ofile = new IloOplOutputFile("Solucao.txt");
  ofile.writeln("TeseGiovanni");
  for(var i in thisOplModel.N){
    for (var j in thisOplModel.N) {
      for (var k in thisOplModel.K) {
        if(X[i][j][k]==1){
          ofile.writeln("X["+i+"]["+j+"]["+k+"]="+thisOplModel.X[i][j][k]);
        }
      }
    }
  }
}
```

```
execute{
  var ofile = new IloOplOutputFile("Horario.txt");
  ofile.writeln("TeseGiovanni");
  for(var i in thisOplModel.N){
    ofile.writeln("B["+i+"]="+thisOplModel.B[i]);
  }
}
```

```
execute{
  var ofile = new IloOplOutputFile("Atraso.txt");
  ofile.writeln("TeseGiovanni");
  for(var i in thisOplModel.N){
    ofile.writeln("A["+i+"]="+thisOplModel.A[i]);
  }
}
```



```
}  
}  
execute{  
  var ofile = new IloOplOutputFile("FO.txt");  
  ofile.writeln("Optimal objective value="+cplex.getObjValue());  
}
```