

BÁRBARA DA COSTA RODRIGUES

**MÉTODOS PARA MINIMIZAR
MOVIMENTOS DE CAMINHÕES SEM
CARGA EM VIAGENS DE LONGA
DISTÂNCIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R696m
2018
Rodrigues, Bárbara da Costa, 1994-
Métodos para minimizar movimentos de caminhões sem
carga em viagens de longa distância / Bárbara da Costa
Rodrigues. – Viçosa, MG, 2018.
ix, 53 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: André Gustavo dos Santos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 51-53.

1. Pesquisa operacional. 2. Otimização Combinatória.
3. Logística. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Informática. Programa de Pós-Graduação em Ciência da
Computação. II. Título.

CDD 22. ed. 003

BÁRBARA DA COSTA RODRIGUES

**MÉTODOS PARA MINIMIZAR MOVIMENTOS DE CAMINHÕES
SEM CARGA EM VIAGENS DE LONGA DISTÂNCIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 06 de julho de 2018.



José Elias Cláudio Arroyo



Heleno do Nascimento Santos



André Gustavo dos Santos
(Orientador)

Dedico este trabalho aos meus pais Roberto e Edirça que sempre me apoiaram.

Agradecimentos

Agradeço a Deus que esteve sempre presente em todos os momentos, por ser meu sustento, proteção e por todas as oportunidades concedidas.

Agradeço ao professor e orientador André Gustavo dos Santos por todos conhecimentos passados durante as aulas e reuniões, que foram essenciais para realização deste trabalho e meu desenvolvimento como profissional.

Agradeço aos meus pais, Roberto Rodrigues e Edirça Costa, por toda a dedicação, apoio, preocupação e incentivo aos meus estudos. Sem dúvidas eles foram essenciais para a realização deste trabalho. Aos meus irmãos Isabel e Guilherme, em especial, à Isabel que contribuiu com minha estadia em Viçosa, com sua companhia e sua amizade.

Agradeço às agências de pesquisa e financiamento, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro para realização deste trabalho com dedicação exclusiva. Ao Departamento de Informática da UFV, seus professores e colaboradores que contribuíram para minha formação.

Agradeço à minha amiga e irmã, Dâmaris Bento, por me acompanhar durante toda essa trajetória, que teve início na graduação e que perdurou durante o mestrado. Agradeço por toda cumplicidade, amizade, proteção, carinho e por ser minha revisora de texto oficial.

Aos meus amigos de mestrado Dâmaris A., Daniel, Guidson, Gilson, Joana, Vinicio, Cleyton e Rubens, aos meus amigos de longa data e os que conheci em Viçosa (não irei citar nomes para evitar esquecimentos), agradeço por todo apoio, amizade, companheirismo e pelos momentos de diversão.

Agradeço a todos que, diretamente e indiretamente, contribuíram para que eu chegasse até aqui e para que este trabalho fosse desenvolvido.

Sumário

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Resumo	viii
Abstract	ix
1 Introdução	1
1.1 Problema	2
1.2 Hipótese	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivos Específicos	3
1.4 Estrutura da Dissertação	3
2 Reducing empty truck trips in long distance network by combining trips	6
2.1 Introduction	7
2.2 Literature Review	9
2.3 Problem definition	10
2.4 Solution method	12
2.4.1 Pre-processing combinations	13
2.4.2 Pre-processing heuristically	16
2.4.3 Set-covering ILP formulation	16
2.5 Experimental results	17
2.5.1 Instances	17
2.5.2 Results	18
2.6 Conclusions	22

3	Alocação de motoristas para um conjunto de viagens utilizando heurística	24
3.1	Introdução	25
3.2	Definição do Problema	26
3.2.1	Modelo Rodrigues & Santos (2018b)	27
3.3	Método de Solução	28
3.3.1	Geração de Colunas	28
3.4	Resultados	31
3.4.1	Instâncias	31
3.4.2	Resultados Computacionais	32
3.5	Conclusão	33
4	Heurística para redução do número de caminhões em viagens com prazo de entrega	35
4.1	Introdução	36
4.2	Referencial Teórico	37
4.3	Definição do Problema	38
4.4	Métodos de Solução	39
4.4.1	Heurística para o modelo Rodrigues & Santos (2018b)	39
4.4.2	Variação do modelo Rodrigues & Santos (2018a)	40
4.5	Resultados e Discussão	42
4.5.1	Instâncias	42
4.5.2	Resultados referentes à heurística para o modelo Rodrigues & Santos (2018b)	43
4.5.3	Resultados da variação do modelo Rodrigues & Santos (2018a)	44
4.6	Conclusão	45
5	Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros	48
5.1	Trabalhos Futuros	49
	Referências Bibliográficas	51

Lista de Figuras

1.1	Dependência dos artigos apresentados, mostrando a estrutura dos capítulos seguintes.	5
2.1	Import scenario	7
2.2	Export scenario.	8
2.3	Inland trips	8
2.4	Combination of export, import and inland trips.	9
2.5	Trip arriving inside the time window.	11
2.6	Trip arriving before the time window.	11
2.7	Trip arriving after the time window.	12
2.8	Objective value	20
2.9	Number of trucks for all combination types, including no combinations	20
2.10	Number of trucks for all combination types	21
3.1	Combinação de viagens de exportação, importação e entre cidades.	27
3.2	Número de caminhões	32
4.1	Comparação dos métodos de solução para o modelo Rodrigues & Santos (2018b)	44
4.2	Função Objetivo X Custo Reduzido da instância 3.	45
4.3	Função Objetivo X Custo Reduzido da instância 7.	46

Lista de Tabelas

2.1	Summary of the instances.	18
2.2	Experimental results for all instances, approaches and combinations type	19
3.1	Número de caminhões necessários.	32
3.2	Número de iterações e tempo de execução do subproblema.	33
4.1	Tamanho instâncias.	43
4.2	Número de caminhões necessários.	45

Resumo

RODRIGUES, Bárbara da Costa, Universidade Federal de Viçosa, julho de 2018. **Métodos para minimizar movimentos de caminhões sem carga em viagens de longa distância.** Orientador: André Gustavo dos Santos.

Este trabalho aborda o problema de viagens que são realizadas por caminhões sem carga. Tal problema é decorrente da falta de planejamento logístico do cenário brasileiro de exportação e importação. Dois modelos matemáticos são propostos com o objetivo de minimizar o número de caminhões que trafegam sem carga e minimizar o número de caminhões necessários para executar um conjunto de viagens combinadas. O primeiro modelo contém restrições de leis de jornada de trabalho e janelas de tempo dos estabelecimentos e portos. A solução do modelo foi por meio de método exato e por outras heurísticas propostas. A segunda heurística, baseada em busca exaustiva, mostrou-se a melhor abordagem para o modelo, encontrando a mesma solução do método exato em um tempo inferior. O segundo modelo, além das restrições de leis trabalhistas e tempo limite das rotas, já presentes no primeiro, contém ainda uma restrição que estabelece datas de entregas à cada combinação de viagem, permitindo somente viagens com tempo compatível aos intervalos de entrega estipulados. A solução do modelo foi por meio do método de geração de colunas, sendo o subproblema solucionado por uma heurística. Foi possível reduzir cerca de 80% o número de caminhões necessários, em comparação com uma solução que associa um caminhão a cada viagem, o que contribui para redução de emissão de gases poluentes na atmosfera, congestionamentos em cidades e portos e viagens realizadas sem carga.

Abstract

RODRIGUES, Bárbara da Costa, Universidade Federal de Viçosa, July, 2018.
Methods to minimize empty truck movements on long distance travel.
Advisor: André Gustavo dos Santos.

This paper addresses the problem of trips performed by empty trucks. This problem is due to the lack of logistical planning of the Brazilian export and import scenario. Two mathematical models are proposed with the objective of minimizing the number of trucks traveling empty and minimizing the number of trucks necessary to execute a set of combined trips. The first model contains constraints modelling working day laws and time windows of establishments and ports. The solution of the model was by means of an exact method and by two proposed heuristics. The second heuristic, based on exhaustive search, showed to be the best approach for the model, finding the same solution of the exact method at a shorter time. The second model, besides the working day laws and time windows constraints already included in the first model, contains also constraints about delivery times for each travel combination, allowing only travels with compatible time according to the defined delivery intervals. The solution of the model was by means of a column generation method, being the subproblem solved by a heuristic. Compared to a solution that assigns a different truck for each trip, it was possible to reduce the number of trucks around 80%, which contributes to the reduction of polluting gases into the atmosphere, congestion in cities and ports and trip performed by empty trucks.

Capítulo 1

Introdução

Os avanços tecnológicos e as condições de clima e solos favoráveis tornam o Brasil um grande exportador de grãos no mercado internacional. Porém, quando se trata de escoamento de grãos, o país perde toda sua competitividade em relação aos outros países, por não oferecer outras alternativas de escoamento em todas as regiões do país, sendo a mais comumente utilizada o modal rodoviário (CNT, 2015).

A falta de planejamento logístico nas viagens de exportação, importação e entre cidades acarreta em um compilado de problemas gerados pelo número de caminhões que trafegam sem carga. Dentre esses problemas, temos o índice maior de caminhões trafegando nas rodovias e portos, que gera congestionamento e atrasos no processo de atracamento, carga e descarga dos navios. Esse atraso causa prejuízos aos importadores e exportadores, com multas nos portos, perda de produtos perecíveis e negócios que podem ser desfeitos pelo não cumprimento dos prazos acordados.

Islam (2017a) e Caballini et al. (2015) apontaram como solução para esse problema o compartilhamento de viagens, ou seja, viagens que eram realizadas por dois ou mais caminhões distintos, podem ser realizadas somente por um. Esse compartilhamento reduz o número de caminhões, bem como os congestionamentos e emissões de gases poluentes na atmosfera e, ainda, reduz o número de motoristas necessários pra realizar um conjunto de viagens, contribuindo para a redução de custo operacionais.

O compartilhamento de viagens enfrenta alguns desafios devido à existência de restrições para garantir que as viagens sejam realizadas de modo que nenhuma das partes (exportadores e importadores) sejam prejudicadas. Essa restrições incluem: os horários de funcionamento dos estabelecimentos e portos, leis de jornada de trabalho (que garantem o bem-estar do motoristas), os prazos de entrega, o tipo

de carga e a capacidade dos caminhões.

1.1 Problema

O modelo rodoviário é o mais utilizado para fretes de carga, pois apresenta uma maior flexibilidade e capacidade de oferecer um serviço porta-a-porta ao cliente. Porém, a falta de planejamento do transporte rodoviário, somado às condições que as rodovias apresentam, deixa esse modal de transporte ineficaz.

Uma das consequências dessa falta de planejamento é a quantidade de viagens em que os caminhões trafegam sem carga, acarretando em maior número de caminhões no trânsito, e em portos que, conseqüentemente, causa congestionamentos, maior emissão de gases poluentes (gerado pela queima de combustível), atrasos em entregas e perda de janela de tempo (horário disponível para atendimento).

Esse problema é mais encontrado em viagens de importação (veículo carrega no porto, viaja com a carga para empresas ou depósitos, volta para o porto sem carga) e viagens de exportação (veículo carrega em empresas e/ou depósitos, viaja com a carga para o porto, volta para empresas e/ou depósitos sem carga).

Nos portos, a falta de planejamento promove atrasos e congestionamentos. Esse atraso gera prejuízos aos exportadores e importadores, devido às mercadorias perecíveis que podem acabar estragando, negócios que podem ser desfeitos por conta de atrasos e multas quando o navio excede o tempo proposto para atracar e descarregar.

1.2 Hipótese

Nossa hipótese é que viagens de importação e exportação que seriam realizadas por três ou mais caminhões diferentes, quando combinadas, poderiam ser realizadas somente por um caminhão. Dessa maneira, reduziria o número de caminhões trafegando sem carga, a emissão de gases poluentes, os congestionamentos e o fluxo de caminhões em portos e cidades. Essa combinação seria possível por meio de técnicas de otimização e modelos matemáticos, incluindo restrições de jornada de trabalho, janela de tempo e intervalos para que essas entregas sejam realizadas. A solução do problema será obtida por heurísticas e métodos exatos.

1.3 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo propor métodos para solução de dois problemas relacionados a transporte de carga por viagens rodoviárias de longa de distância. O primeiro tem como propósito minimizar o número de viagens que são realizadas sem carga, com restrições de jornada de trabalho e de janela de tempo. No segundo temos como objetivo minimizar o número de caminhões necessários para realizar um conjunto de viagens combinadas e apresenta restrições de leis trabalhistas e prazos de entregas. Para isso são propostos dois modelos matemáticos, um para cada problema, e a solução dos modelos é realizada por métodos exatos e heurísticas.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo para minimizar viagens que são realizadas sem cargas.
- Desenvolver um modelo para minimizar o número de caminhões para executar um conjunto de viagens.
- Incluir restrições de leis trabalhistas, janela de tempo e prazos de entrega.
- Implementar heurísticas para os dois modelos propostos.
- Analisar os resultados das heurísticas e dos modelos.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação foi elaborada em formato de coletânea de artigos que foram produzidos durante a pesquisa. O primeiro capítulo apresenta uma introdução geral do problema discutido nessa dissertação e apresenta a hipótese e os objetivos gerais e específicos da pesquisa. Os capítulos a seguir apresentam três artigos, que representam todo trabalho desenvolvido nessa dissertação.

O Capítulo 2 apresenta o artigo “*Reducing empty truck trips in long distance network by combining trips*”, publicado nos anais da 20th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2018). O artigo propõe um modelagem para reduzir o número de viagens que são realizadas sem carga, combinando viagens de exportação, importação e entre cidades. O modelo contém restrições de jornada de trabalho, incluindo os horários de descanso no tempo total da combinação. O modelo inclui ainda restrições de janela de tempo em que as viagens

combinadas são forçadas a chegar dentro do intervalo de funcionamento dos depósitos/estabelecimentos e portos. Caso isso não seja possível, o tempo de espera até a abertura depósitos/estabelecimentos e portos é adicionado ao tempo total das viagens combinadas. Foram realizadas combinações de 3 viagens agrupadas, combinações de 2 viagens agrupadas e combinações de 2 e 3 viagens combinadas simultaneamente. Para solucionar o modelo foi utilizado um método exato e uma heurística. As combinações que possuem 2 e 3 viagens obtiveram melhores resultados, reduzindo o tempo e o número de caminhões necessários para executar todas as viagens. O modelo conseguiu executar todas as instâncias criadas para o problema, porém, o tempo computacional tornou o modelo inviável para instâncias maiores. A heurística conseguiu solucionar o modelo em um tempo viável mas sem obter resultados de mesma qualidade.

O segundo artigo, “Alocação de motoristas para um conjunto de viagens utilizando heurística”, publicado nos anais do 50º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2018), é apresentado no Capítulo 3. O artigo apresenta uma modelagem para minimizar o número de caminhões necessários para realizar um conjunto de viagens combinadas. Tais viagens foram obtidas por meio do modelo presente no primeiro artigo, apresentado no capítulo anterior (RODRIGUES & SANTOS, 2018B). O modelo contém restrições de leis de jornada de trabalho e define um tempo limite para as jornadas. Foi solucionado pelo método de geração de colunas, sendo o subproblema resolvido por uma heurística gulosa. O método conseguiu reduzir ainda mais o número de caminhões necessários para realizar um conjunto de viagens, respeitando as restrições impostas.

O terceiro artigo, “Heurística para redução do número de caminhões em viagens com prazo de entrega”, está presente no Capítulo 4. O artigo propõe uma nova heurística para o modelo presente no primeiro artigo (RODRIGUES & SANTOS, 2018B). A heurística define qual o melhor horário para iniciar a primeira viagem, de modo que o tempo de espera das viagens seja nulo ou mínimo possível. Sendo assim, a heurística se tornou a abordagem mais eficaz para o modelo, pois consegue os mesmos resultados obtidos pelo método exato em um tempo bem inferior. O artigo contém ainda uma variação para o modelo do segundo artigo (RODRIGUES & SANTOS, 2018A) que inclui datas de entregas das viagens combinadas. A solução da variação do modelo foi por meio do método de geração de colunas, em que o subproblema é constituído por uma abordagem gulosa que gera novas colunas selecionando as combinações com maiores valores duais. O método conseguiu reduzir em cerca de 65% o número de caminhões em relação ao resultado do modelo de Rodrigues & Santos (2018b) e 80% em relação ao número original das instâncias

utilizadas. Na época de finalização desta dissertação, este artigo ainda não havia sido submetido para publicação.

Por fim, o Capítulo 5 contém um resumo dos resultados encontrados durante a pesquisa e as conclusões obtidas. Neste capítulo também incluímos possíveis trabalhos futuros para continuação da pesquisa.

A Figura 1.1 ilustra a dependência dos artigos apresentados. O artigo 1 presente no capítulo 2 tem como parâmetro de entrada o conjunto de viagens ainda não combinadas e tem como saída o conjunto de viagens combinadas. O artigo 2 que se encontra no capítulo 3 tem como parâmetro de entrada o conjunto de viagens combinadas e retorna o conjunto de rotas. O artigo 3, apresentado no Capítulo 4, repete os mesmo processos dos artigos 1 e 2, mas apresenta um novo método para combinar as viagens e inclui uma nova restrição no processo de criação das rotas. Dessa forma, no método da Seção 4.4.1 temos como saída o conjunto de viagens combinadas, que é parâmetro de entrada para o método da Seção 4.4.2, que retorna o conjunto de rotas.

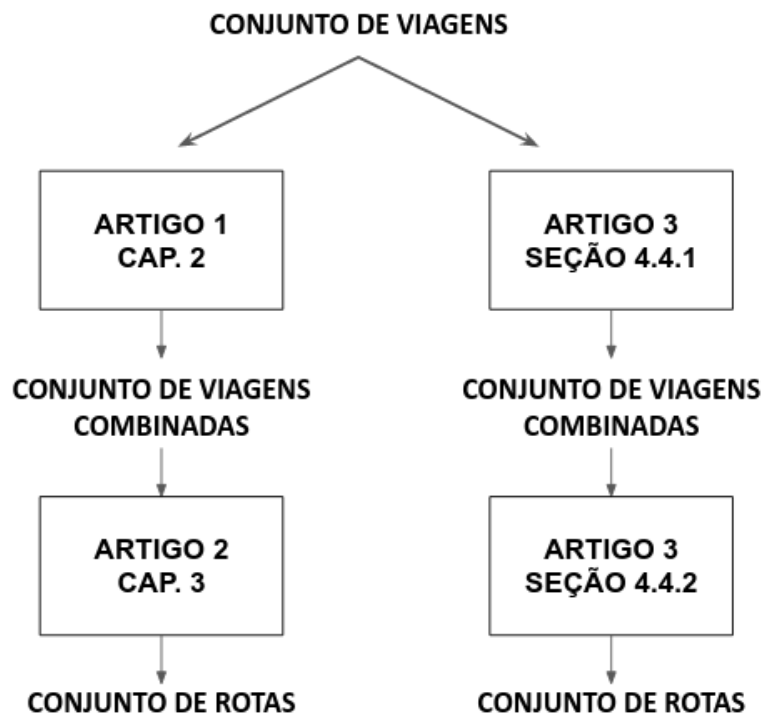


Figura 1.1: Dependência dos artigos apresentados, mostrando a estrutura dos capítulos seguintes.

Capítulo 2

Reducing empty truck trips in long distance network by combining trips



Abstract

Brazilian import and export activities on ports are subject to considerable slow queues and congestion, revealing a lack of medium and/or short-term logistic planning. One of the causes is the number of trucks traveling with empty containers, performing one-way trips, from inland cities to the port or from the port to the cities. This issue may be reduced by combining trips, i.e., after bringing goods to the port (export trip), a truck should, when possible, carry goods from the port to the origin or a nearby city (import trip). In this paper we investigate a combinatorial optimization problem where a set of import/export/inland trips should be combined in order to reduce total traveling time, which in turn reduces the number of empty trucks traveling to/from the port. Individual trips and combined trips must obey national law regulation of resting time, as typical road trips in Brazil covers hundreds, even thousands of kilometers. We also consider opening operation hours on each location (time windows), which may force a driver to wait upon arriving. We test exact and heuristic approaches, and present the total travel time and number of trucks needed for each solution, considering instances based on real freight data.

¹RODRIGUES, Bárbara da Costa; SANTOS, André Gustavo. Reducing Empty Truck Trips in Long Distance Network by Combining Trips. In: **Proceedings of the 20th International Conference on Enterprise Information Systems - Volume 1: ICEIS**. 2018. p. 319-327.

2.1 Introduction

Due to the lack of infrastructure for grain storage, most of the Brazilian production is destined to exportation, leading to a high demand of freightage to the ports, as well as import of fertilizers and other agricultural inputs to the grain exporting regions (CAIXETA FILHO, 2010). Most of the freight transport is done by road modal, which may bring practicality, agility and flexibility in cases of route exchanges. Nevertheless, a number of disadvantages may be listed, for example, high cost of fuel and tolls, poor condition of roads in some regions, among others. Those disadvantages, allied to lack of good logistic planning, cause an extra cost to the final price of the transported goods, congestion in the port area, delivery delays and also empty trucks, traveling without any freight.

Empty truck trips may be found specially on import/export trips, when the carrier take care only of incoming or outgoing trips. The result is a somehow needless increasing in the number of trucks using the roads and ports, consequently increasing congestion and polluting gas emission generated by fuel combustion (SCHULTE ET AL., 2015).

In the context of this work we have import trips, as shown in Figure 2.1. The truck collects a freight (container, bagged or bulk goods) at the port. Then travels to a customer or depot that demands that freight. After unloading, the truck travels back to the port unladen.

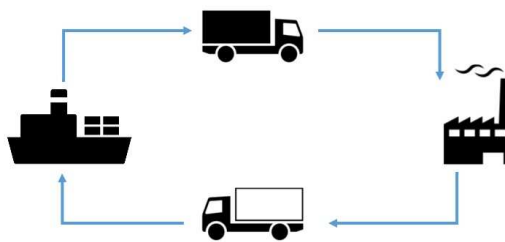


Figura 2.1: Import scenario

An empty truck travel also occurs in export trips, as shown in Figure 2.2. The truck collects goods at a customer or a depot and travels to the port, where sometimes faces a queue of trucks waiting for unloading, due to congestion or ships that are not ready to receive the load. After unloading the truck comes back to the customer empty.

A third situation of empty trucks traveling occurs in inland trips, between cities. The truck travels from one city to another to transport goods from customer

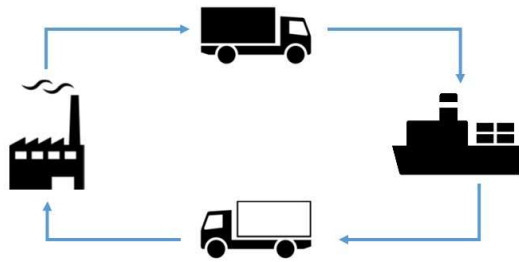


Figura 2.2: Export scenario.

to customer and returns empty to the origin point, due to lack of return demand or vice versa (Figure 2.3).

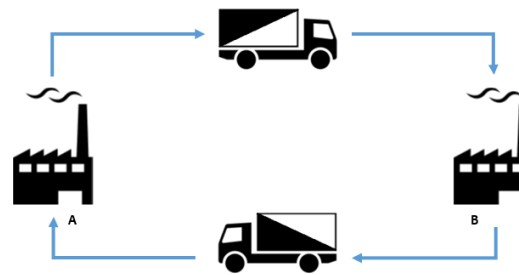


Figura 2.3: Inland trips

Those are, of course, inefficient ways to use the trucks and the road network. It may be the case that a customer that exports goods does not import any goods, at least not from the same port. But generally the customer demands goods as well, and the truck may return loaded if it visits a company that sells the goods the customer needs. Even more, from the port to that company the truck may bring goods imported by the company that are on the port waiting to be transported. Thus, an export trip may be combined to an import trip, or an import trip followed by an inland trip, as shown in Figure 2.4. A perfect combination would include a sequence of trips in which the destination of a trip is the origin of the next one. A good combination allows a repositioning trip between the end of a trip and the start of the next one, as long as those locations are not far away, i.e., when the repositioning may be done by a small trip.

The combination of trips becomes an alternative to avoid such problem. Import and export trips that would be performed by different trucks may be performed sequentially by the same truck, thus decreasing the number of empty trucks traveling in the road system, which contributes to the transportation network as a whole (reduction of truck traffic and road congestion) besides to the environment (reduc-

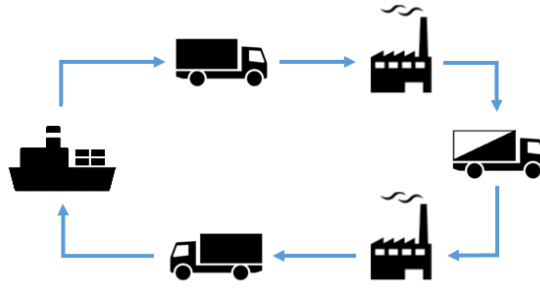


Figura 2.4: Combination of export, import and inland trips.

tion of emission of polluting gases) (ISLAM, 2017A). Furthermore, Schulte et al. (2015) mention that such combination contributes also to decrease operational costs and additional gains to drivers.

The objective of this work is to propose a mathematical model to find a good (possible the best) combination of trips (export, import and inland trips) to reduce empty trucks travelling through the roads, which besides the contributions aforementioned, may reduce the waiting time in ports and congestion in ports area. The model includes constraints to assure drivers welfare by enforcing current laws regulation.

This paper is organized as follows: in Section 2.2 we present related works from the literature; a formal definition of the problem is presented in Section 2.3; in the following, in Section 2.4, the proposed method is described, which consists of a mixed integer linear programming, a heuristic for evaluating each possible combination of trips, and an integer linear programming for choosing a set of those combinations; experimental results are presented in Section 2.5 and conclusions and future works in Section 2.6.

2.2 Literature Review

The combination of trips to decrease empty trucks traveling along the roads have already been addressed in the literature. Gavish & Schweitzer (1974) are among the first to propose such approach. Özener & Ergun (2008) study a logistic network in which shippers collaborate to share a common carrier. Their study has identified routes in which a collaborative scheme may reduce the shared costs among shippers. Audy et al. (2011) shows that in their context both the cost and the delivery time may be reduced using collaborative transportation.

[Caballini et al. \(2015\)](#) studied a problem similar to the one we study here, with export, import and inland trips in a port context, where all trucks may transport two 20 ft containers. They proposed a Mixed Integer Linear Programming formulation (MILP) to minimize the overall costs of trips subject to time windows and time limit in the routes. They study the impact of trips combination on real data in the port of Genoa, Italy, showing that trip combination may reduce the costs and the number of empty trucks traveling to/from the port.

[Schulte et al. \(2015\)](#) developed simulation models for coordinated truck appointments and used the proposed approach to solve the problem as a TSP with time windows allowing collaboration. They used instances based on real data of the port of Santo Antonio, Chile, and integrated their approach to a Truck Appointment System (TAS), a tool to schedule and follow cargo arriving, allowing collaboration among ports and transportation companies. As a result, ports could reduce port-related polluting gas emission using the model in real-time.

[Islam \(2017b\)](#) also simulated the sharing of trucks in a port environment. He compared two scenarios, the first considering sharing/collaboration and the second without it. Using data of a local port, he showed that the collaboration between trucks increases the use of the port capacity as well reduces polluting gas emission and congestion around the port.

A more recent work of [Caballini et al. \(2017\)](#) proposes a model to reduce costs and the number of trips that trucks travel empty, take advantage of the capacity of the trucks. They show the efficacy of the proposed approach by computational experiments.

The present work differs from the ones cited above by including local transport regulation laws and time windows, thus adapting previous ideas towards the Brazilian exportation context. [Caballini et al. \(2015\)](#) is the one more similar, but here we include a heuristic phase, due to the complexity of the resulting model, when all considered characteristics are included.

2.3 Problem definition

We are given as input a set \mathcal{T} of trips. For each trip $i \in \mathcal{T}$ we have its origin and destination location, respectively O_i and D_i , and the distance d_i between those locations, in Km. We also have the distance e_{il} between the destination of a trip $i \in \mathcal{T}$ and the origin of a trip $l \in \mathcal{T} \setminus i$, also in Km. This distance is traveled by a truck covering two trips i, l sequentially when $D_i \neq O_l$ (considered 0 when they

coincide) and is called repositioning trip. The duration of each trip i is defined by $t_i = d_i/speed$, and the duration of repositioning trip is $e_{il}/speed$. In all cases we consider a constant speed of 80 km/h. This is in fact the maximum speed for heavy trucks in Brazilian roads, but as most of the trips are long distance trips, trucks will use this speed most of the time, and then may be used as average speed. Moreover, there is a service time S that is included in all trips, covering the loading and unloading service at cities and ports.

Trips are under transport regulation laws that impose 30 min of rest after each 5,5 hours of travel, and 8 hours after each 12 hours. The first one imposes a small rest during a trip, and the second one a long rest (night/sleep resting, for example). Besides mandatory resting times, drivers are subject to waiting times due to opening and closing time of locations (deposit in cities and ports). For each location there is a time window, and operations may be done only inside the time window. This is represented in Figure 2.5; in this case, the truck arrived within the time window. For each trip i we know the time window of the origin location, $[P_i^O, P_i^{\hat{O}}]$, and of the destination location, $[P_i^D, P_i^{\hat{D}}]$. If the truck arrives before the opening time, it must wait until the window opens (see Figure 2.6). If the truck arrives after the closing time, it must wait until the next day, for the following time window, as represented in Figure 2.7. This may happen also when starting a trip and in repositioning trips. Those waiting times are added to the total duration of the combination of trips. For some trips there is a good combination to avoid those wasted time, but for some the total duration time may include many hours due to waiting times. The choice of combinations must be carefully done to avoid or minimize that.



Figure 2.5: Trip arriving inside the time window.



Figure 2.6: Trip arriving before the time window.

We consider combinations of at most 3 trips. A good example of combination of 3 trips is the one depicted in Figure 3.1 where an import trip is followed by an inland trip and then an export trip. This case happens when the destination of the first trip does not have any goods to send to the port. Instead of coming back to the port

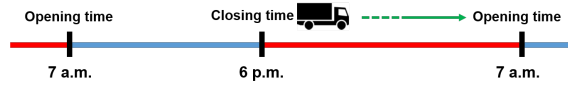


Figura 2.7: Trip arriving after the time window.

empty, the driver travels to a nearby city and carries the truck with goods prepared for exportation. Another case is the combination of export/inland/inland trips: a rural producer exports goods and imports agricultural inputs; after unloading the goods at the port, the driver travels to a nearby city to load the agricultural inputs to bring to the producer. A combination of more than 3 trips would include a double trip to the port or from the port, which can be modeled as two combinations.

The objective is then to find the best combinations of trips in order to minimize the total duration time, considering the duration of all combinations chosen and trips performed as single trip, if a trip is chosen not to be combined. The formal definition of the objective and the aforementioned constraints is detailed in the MILP formulations proposed in the following section.

2.4 Solution method

Our first attempt was to propose a MILP formulation that includes all characteristics of the problem, as the one proposed by Caballini et al. (2015). The formulation had variables to control which trips belongs to each combination and their sequence in the combination. Moreover there were a considerable number of variables to control resting/waiting time within trips (following law regulations) and between trips (due to time windows). However, we are working with a more complex problem, mainly because we have to deal with some very long distance trips, that may span more than one day, even when performed as a single trip. The control of the starting and ending of each trip becomes more complex due to different restring times that are mandatory along the way. Although we could indeed include all characteristics in a MILP formulation, it turns out to solve only instances with very small number of trips, and using a long CPU time. Nevertheless we can still solve the problem using exact MILP formulation by decomposing the problem: firstly we do a pre-processing to determine the best way to combine each sequence of 2 or 3 trips, and then we search the best set of combinations that covers all trips at a minimum cost.

For the first phase, we propose a MILP formulation to determine the best duration of a given sequence of trips. This includes determining the best starting and ending time of each trip in order to reduce the total duration time. The proposed

formulation is presented in Section [2.4.1](#). Although the formulation can handle at a reasonable time all the subsets of 2 or 3 trips, it may be impracticable to use it for large instances because of the exponential number of possible combinations to be solved. We then propose, in Section [2.4.2](#), a constructive heuristic to be used when needed as an alternative in this phase. After the pre-processing phase, independently of the method used, a set-covering based formulation (Section [2.4.3](#)) is used to determine the best set to cover all trips.

2.4.1 Pre-processing combinations

In order to choose the best combinations for a given set of trips, we first do a pre-processing to define the optimal cost (in terms of total duration) for each possible combination of 2 or 3 trips, i.e., we generate all sequence of 2 and 3 trips, and for each one of them, we evaluate its total duration time by deciding the start and finish time of each trip, besides the resting and waiting times. In this section we describe a MILP formulation for this task, and in the following section we describe a greedy constructive heuristic.

We propose the following MILP formulation to define the minimal cost for the combination of trips $i, l, k \in \mathcal{T}$ sequentially.

We use indexes i, il, ilk when describing variables or data respectively for trip i , trip l (performed after i) and trip k (performed after i and l). For example, if q denotes the starting time of a trip, q_i, q_{il} and q_{ilk} denote the starting time of trips i, l, k in the combination. Moreover, we use $'$ to indicate a given time in a day, i.e., remaining hours discounting full days. For example, if $q_{ilk} = 83$, the starting time of trip k is 83 hours after time 0 of the planning horizon, i.e., 3 days and 11 hours, then $q'_{ilk} = 11$.

We use the following decision variables:

- q : starting time of a trip;
- f : ending time of a trip;
- f' : ending hour of a trip;
- r^j : resting time of a daily journey (8h every 12h);
- r^t : resting time during a trip (30' every 5:30h);
- w^q : waiting time to start a trip;

- w^f : waiting time after finishing a trip;
- b^f : binary, if a trip ends before time window;
- a^f : binary, if a trip ends after time window;
- b^q : binary, if a trip is ready to start before time window;
- a^q : binary, if a trip is ready to start after time window;
- z : number of full days of a given duration time;
- m^j, m^t : number of required resting periods;

The constraints below show how f'_i is defined from f_i (2.1)-(2.2), how binaries b_i and a_i are set when trip i did not finish within the operation time $[P_i^O, P_i^{\hat{O}}]$ of the destination of trip i (2.3)-(2.6) and how the waiting time is set in these cases (2.7): the remaining hours until the opening time if arrived early, or the hours until the opening time of the next day if arrive tardy. Similar constraints are defined for $f_{il}, f_{ilk}, q_{il}, q_{ilk}$.

$$z_i = f_i/24 \quad (2.1)$$

$$f'_i = f_i - 24[z_i] \quad (2.2)$$

$$f'_i b_i \leq P_i^O \quad (2.3)$$

$$f'_i \geq P_i^O(1 - b_i) \quad (2.4)$$

$$(24 - f'_i)a_i \geq (24 - P_i^{\hat{O}}) \quad (2.5)$$

$$24 - f'_i \geq (24 - P_i^{\hat{O}})(1 - a_i) \quad (2.6)$$

$$w_i = (P_i^O - f'_i)b_i + (24 - f'_i + P_i^O)a_i \quad (2.7)$$

$$b_i \in \{0,1\} \quad (2.8)$$

$$a_i \in \{0,1\} \quad (2.9)$$

$$w_i \geq 0 \quad (2.10)$$

The integer value $\underline{z}_i = [z_i]$ may be defined for a continuous value z_i by the constraint $z_i - 1 \leq \underline{z}_i \leq z_i$.

The following expressions define the total resting time of different types while performing trip i . Similar expressions are used for trips l and k (variables $r_{il}^j, r_{il}^t, r_{ilk}^j, r_{ilk}^t$).

$$m_i^j = t_i/12 \quad (2.11)$$

$$m_i^t = t_i/5.5 \quad (2.12)$$

$$r_i^j = 8[m_i^j] \quad (2.13)$$

$$r_i^t = 0.5[m_i^t] \quad (2.14)$$

The complete MILP formulation is then:

$$\min B_{ilk} = (f_{ilk} + w_{ilk} - q_i) \quad (2.15)$$

subject to:

$$P_i^O \leq q_i \leq P_i^{\hat{O}} \quad (2.16)$$

$$f_i = q_i + t_i + r_i^j + r_i^t \quad (2.17)$$

$$q_{il} = f_i + w_i + e_{il} + r_{il}^q + r_{il}^{lq} + s \quad (2.18)$$

$$f_{il} = q_{il} + w_{il} + t_l + r_{il}^j + r_{il}^t \quad (2.19)$$

$$q_{ilk} = f_{il} + w_{il} + e_{lk} + r_{ilk}^q + r_{ilk}^{lq} + s \quad (2.20)$$

$$f_{ilk} = q_{ilk} + w_{ilk} + t_k + r_{ilk}^j + r_{ilk}^t \quad (2.21)$$

$$(2.22)$$

$$(2.1)-(2.9) \text{ for } f_i, f_{il}, f_{ilk}, q_{il}, q_{ilk}$$

$$(2.11)-(2.14) \text{ for } r_i^j, r_i^t, r_{il}^j, r_{il}^t, r_{ilk}^j, r_{ilk}^t$$

$$f_i, f_{il}, f_{ilk}, f'_i, f'_{il}, f'_{ilk} \geq 0 \quad (2.23)$$

$$q_i, q_{il}, q_{ilk}, q'_{il}, q'_{ilk} \geq 0 \quad (2.24)$$

Objective function (2.15) minimizes the cost (total duration time) of the combination. The starting time of the first trip, i , must be within the operation hour of the origin location of the trip (2.16). The finishing time of this trip is the starting time plus the time needed to go from its origin to its destination plus the mandatory resting times (2.17). As for the next trip, l , it may start after finishing the previous one, plus the repositioning time from the destination of i to the origin of l plus the resting times, if any, during this repositioning (2.18). Constraints (2.19)-(2.21) do the same for other trips.

We run the above formulation for all triplets $i, l, k \in \mathcal{T}$. If the solution is

feasible, we have the minimal cost B_{ilk} of the combination. Otherwise we have that trips i,l,k cannot be combined sequentially.

The MILP formulation to define the minimal cost for the combination of two trips $i,l \in \mathcal{T}$ is similar:

$$\min C_{il} = f_{il} + w_{il} - q_i \quad (2.25)$$

subject to all constraints except the ones including variables with index ilk .

2.4.2 Pre-processing heuristically

Here we propose a greedy constructive heuristic to quickly define an upper bound on the cost and total duration of a sequence of trips i,l,k , considering that each trip departs and arrives as early as possible. For example, the starting time of the first trip is the opening time of its origin point: $q_i = P_i^O$. The ending time f_i includes the service time, the distance to the destination point, mandatory resting time, and waiting time due to time windows. The starting time of the following trips include also the repositioning from the destination point of the previous trip and the possible incurring resting and waiting time.

It is easy to see that this heuristic gives an upper bound on the cost/total duration because the sequence thereby constructed is feasible: all constraints are considered. One may also notice that it may not be optimal, because starting a trip as early as possible may force waiting times in the future that may increase the total duration time. It is, however, very fast.

Therefore we have an exact ILP formulation that, given a set of trips i,l,k determine the best starting/end time of each trip in order to minimize the cost (albeit costly in terms of computational time), and a heuristic that quickly determines a possible good value. Regardless the method used for this pre-processing time, or even a mixed of both, we still have to decide which trips to combine. This task is done by the set-covering based ILP formulation given in the next section.

2.4.3 Set-covering ILP formulation

After pre-processing all combinations up to 3 trips, let \mathcal{T}^2 and \mathcal{T}^3 be the sets of all feasible combinations of 2 and 3 trips respectively, and let B_{ilk} be the total cost of combining trips i,l,k sequentially, C_{il} the total cost of combining trips i,l sequentially, and D_i the cost of a single travel i (in our case twice the distance because it would be a round trip). We then define the following compact ILP formulation, using variables v_{il} and y_{ilk} as binary decision variables equals to 1 if

trips i,l and i,l,k respectively are to be combined and 0 otherwise, and x_i a binary decision variable equals to 1 if the trip i is to be performed as a single trip (i.e., not part of any combination) and 0 otherwise.

$$\min Z = \sum_{ilk \in \mathcal{T}^3} B_{ilk} y_{ilk} + \sum_{il \in \mathcal{T}^2} C_{il} v_{il} + \sum_{i \in \mathcal{T}} D_i x_i \quad (2.26)$$

subject to:

$$\sum_{\substack{ilk \in \mathcal{T}^3 \\ i=j \vee l=j \vee k=j}} y_{ilk} + \sum_{\substack{il \in \mathcal{T}^2 \\ i=j \vee l=j}} v_{il} + x_j = 1 \quad \forall j \in \mathcal{T} \quad (2.27)$$

$$y_{ilk}, v_{il}, x_i \in \{0,1\} \quad (2.28)$$

Objective function (2.26) minimizes the overall cost. Constraints (2.27) state that each trip may be at most in one chosen combination or performed as a single trip. The last constraints state that all variables are binary.

2.5 Experimental results

The MILP formulations were implemented in C/C++ using the Concert Technology Library, and solved by CPLEX 12.5 academic license. The heuristic was implemented in C/C++. The experiments were run on an IntelR Core TM i7-4790K CPU @ 4.00GHz x 8 with 32GB RAM, running Ubuntu 14.04 LTS 64 bits.

2.5.1 Instances

We generate a set of instances based on real data from the Brazilian transportation network. Data were collected from Fretebras², a website containing thousands of freightage offers, filled by drivers and companies in real-time, covering all Brazilian states and some nearby countries. One may freely consults information such as origin and destination of freightage, distance between those sites, vehicle type, freight type, and others.

We selected 10 cities, including Santos - SP, Cubatão - SP, Manhuaçu - MG, Contagem - MG, Passos - MG, Arcos - MG, Rondonópolis - MT, Sorriso - MT, Dourados - MS and Itumbiara - GO, which are among the main origin or destination points for export of grains (coffee and soy), and import of agricultural inputs (fertilizers and agricultural plaster), thus generating most of the import and export

²<http://www.fretebras.com.br>

trips on the roads network of the southeast region of Brazil. Santos is a port city that receive plenty of trucks everyday, both for import and export freights. We created seven instances, ranging from 15 to 124 trips, using data from selected trips of the Fretebras website.

The distances of the trips range from 20 to 2246 km, while the estimated duration ranges from 15 min to almost 30 hours (including the repositioning trips, which can be very short). Table 2.1 shows a summary of the data for each instance, considering the import, export and inland trips.

Tabela 2.1: Summary of the instances.

ID	Trips	Duration (h)		
		min	max	avg
1	15	3.7	26.7	14.0
2	31	3.7	26.7	15.8
3	47	3.7	26.7	14.5
4	62	3.7	26.7	13.1
5	76	3.7	26.7	15.0
6	94	3.7	26.7	13.5
7	124	3.7	26.7	13.9

We consider the same operation time for all cities: 7 am as the opening time and 6 pm as the closing time.

2.5.2 Results

The instances were solved by the two approaches proposed: pre-processing the combinations by the exact MILP model or the constructive heuristic and then select a subset of combinations by the set-covering model. The results are presented in Table 3.1, for 4 types of tests: trips allowed to combine in sequence of 2 and/or 3 trips; trips allowed to combine only in sequence of 3 trips; only in sequence of 2 trips; and no combination allowed (last rows, combined type = 1). Notice that for this last type, none of the formulations or approaches are used, one truck is used for each trip, and the total cost may be evaluated at practically zero time.

For each type of test, we report the objective function value (accumulated duration time of all trips), the number of trucks used, and the total time for each approach for pre-processing: MILP of Section 2.4.1 and Heuristic (Heur) of Section 2.4.2. We do not report gaps of the formulations because all formulations were solved until a proved optimal is found. For the case of no combination (type 1), each trip is considered as a round trip, then the duration of a trip is twice the travel time and mandatory resting and waiting times.

Tabela 2.2: Experimental results for all instances, approaches and combinations type

Comb. type	Instance		Total duration		CPU time (s)		#Trucks	
	ID	Size	MILP	Heur	MILP	Heur	MILP	Heur
2&3	1	15	318.5	339.2	28	<1	7	6
	2	31	720.1	807.1	394	<1	15	14
	3	47	1033.7	1082.6	2789	4	23	19
	4	62	1241.6	1388.3	10792	12	31	25
	5	76	1740.5	1841.0	44535	20	37	32
	6	94	1832.3	1998.2	110329	49	44	38
	7	124	2584.6	2783.5	591482	170	55	53
3	1	15	323.2	341.7	33	<1	7	7
	2	31	790.0	829.9	402	<1	10	13
	3	47	1058.0	1110.2	2840	2	17	21
	4	62	1268.2	1379.7	10829	8	22	30
	5	76	1767.8	1865.5	33358	13	26	34
	6	94	1928.4	2033.1	112263	35	32	40
	7	124	2642.4	2906.2	544535	104	42	62
2	1	15	320.7	372.5	<1	<1	7	10
	2	31	774.3	813.3	4	<1	15	18
	3	47	1035.9	1113.8	19	2	23	27
	4	62	1241.6	1379.4	56	5	31	37
	5	76	1742.7	1881.9	134	8	39	46
	6	94	1876.6	2047.0	356	21	47	57
	7	124	2584.6	2862.4	1329	76	62	72
1	1	15	594.3	-	-	-	15	-
	2	31	1486.7	-	-	-	31	-
	3	47	2975.6	-	-	-	47	-
	4	62	2290.6	-	-	-	62	-
	5	76	3320.7	-	-	-	76	-
	6	94	3538.8	-	-	-	94	-
	7	124	4859.6	-	-	-	124	-

From the results we can see that for all instances, the proposed approaches could combine the trips, decreasing the overall duration time and the number of trucks, compared to the case of no combinations. This can be seen on the table, and on Figures 2.8 and 2.9, which show respectively the objective value and number of trucks for all instances and combination types. In Figure 2.8, the objective values were scaled to the cost of the 1-type, which was always the highest. In order to have a clearer visualization of the results for the number of trucks, Figure 2.10 shows the results only for types that allow combinations.

The combination type that reached the minimum objective value was, as expected, the 2&3 combination type, when pre-processing is done exactly. This can be seen on the table and on the graphic of Figure 2.8. However, the combination that minimizes the most the number of trucks was the 3-combination type, which can be seen on the table and on the graphic of Figure 2.10.

We may conclude that, using only combinations of 3 trips, we may minimize the number of trucks, but this may not be the best option in terms of total time.

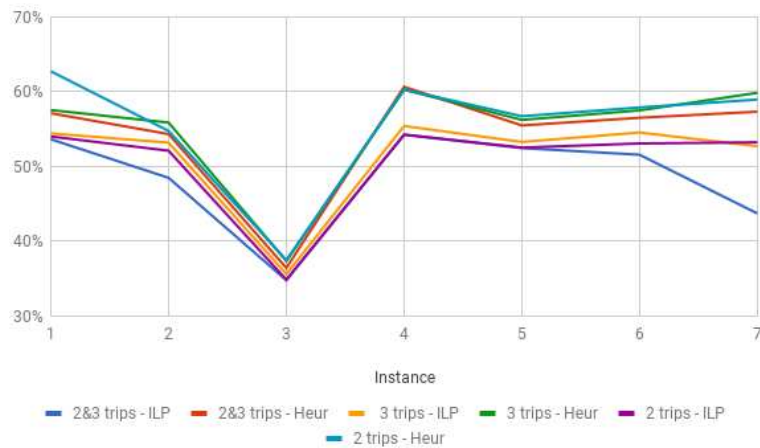


Figura 2.8: Objective value

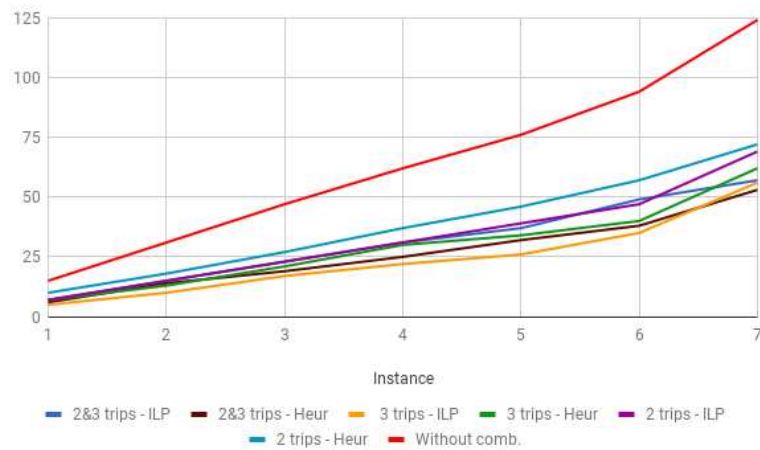


Figura 2.9: Number of trucks for all combination types, including no combinations

In some cases a third trip may force a long waiting time, and the best option is to combine only two trips. Therefore, we have to allow combinations of 2 and of 3 trips, if we want to reduce the overall time.

In general, results obtained by pre-processing using heuristics have higher objective values, regardless the combination type (see Figure 2.8). This happens because not all trips are combined. In the other hand, pre-processing the combinations by the exact ILP formulation yields lower costs for each combination, and the result is that in the second phase almost all trips are combined, reducing the overall costs.

The exact pre-processing, however, is computational costly. For the larger instances, the exponential number of combinations and the high cost to solve all of them, lead the algorithm to run for more than one day, reaching almost one week

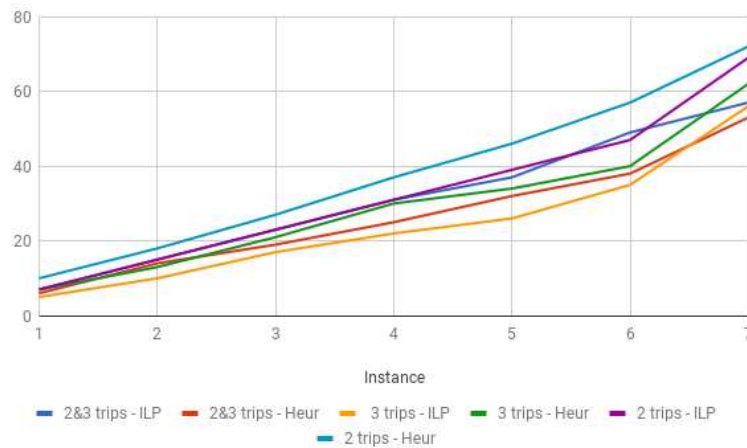


Figura 2.10: Number of trucks for all combination types

for the largest instance allowing 3 or 2&3 combinations. The running time of the heuristic was at most 2 minutes.

The approach here proposed reached all the expected objectives, while satisfying the imposed constraints:

- Minimization of costs

The combination of trips allows a given driver to perform two or three trips. Doing this, we avoid to use a new driver to cover some trips, reducing the operational costs. Another reason is the smaller distances traveled for repositioning trips, which reduces empty truck trips.

- Minimization of empty truck trips and maximization of the use of trucks capacity

When choosing the best combined route, the model prefers low cost combinations. A low cost combination has generally a small distance for repositioning or no repositioning at all. As those travel times are considered in the objective function, a preference is given for smaller distance for repositioning (which is also empty truck trips), using the capacity of trucks as long as possible.

- Minimization of polluting gas emission

This is a direct consequence of the combination of trips. As well as the reduction of the number of drivers, lesser vehicles on the road reduces the emission of polluting gases. Another cause is the reduction on the number and distance travelled on repositioning trips.

- Minimization of waiting on port area

The proposed approach takes in account the arriving and departure time on ports and cities. When a trip arrives outside the time window, the waiting time is added to the objective function. Therefore, the waiting time is reduced in order to minimize the overall time. Moreover, the formulation decides also the best departure time of the first trip, aiming to minimize the required waiting time.

- Solutions conforme to Brazilian transport regulation laws

The formulation include regulations of the Brazilian transport law 13103/2015, adding the mandatory resting periods. This includes daily rests, of 30 minutes for each 5:30h of driving, and long rest of 8h after 12h driving.

2.6 Conclusions

This paper proposes a mathematical programming formulation to meet the needs of a transportation network including export, import and inland trips. The main objective is to reduce empty truck trips, i.e., the number and distance traveled by empty trucks. This task was accomplished by minimizing the total duration of trips, which forces the combination of 2 or 3 trips in order to avoid needless trips. The combination was done respecting regulation laws imposed to drivers traveling long distances and also the operation times of ports. Using real-based data of Brazilian scenery, we show that the number of empty trucks was reduced, which directly contributes to reduce the congestion on port areas and polluting gases emission.

For a small number of trips, the MILP formulation showed to be a useful tool for route planning. But as the number of trips increase, the computational time becomes impracticable. In such case, a fast heuristic may find a reasonable solution, not far from the optimal, in short computational time.

As future works we plan to improve the model in order to reduce the computational time, and use other strategies to reach the optimal solution, for example dynamic programming. Other work would be to improve the quality of the heuristic, maintaining the short computational time. This would allow the set-cover formulation to be used in almost real-time for replanning the combination in case of eventualities. A further step would be to assign the combinations or sequence of combinations of trips to a set of drivers. In this last case, we may have to use metaheuristics, as the problem may become more complex and a simple greedy heu-

ristic, despite the good results achieved in this paper, may not give a good result in this more complex scenery.

Capítulo 3

Alocação de motoristas para um conjunto de viagens utilizando heurística



Resumo

O planejamento de rotas de viagens é uma tarefa desafiadora tanto para humanos quanto para sistemas computacionais, uma vez que é necessário considerar vários fatores como, por exemplo, custo das viagens, viabilidade das rotas, número de caminhões, bem como viagens que atendam às leis trabalhistas vigentes no Brasil. Este artigo propõe um modelo matemático para minimizar o número de motoristas necessários para cobrir um conjunto de viagens de exportação, importação e entre cidades, agrupando viagens que possuem menor deslocamento e realizar um planejamento de uma sequência de viagens para cada motorista. O modelo foi solucionado pelo método de geração de colunas, utilizando uma heurística para solucionar o subproblema. Os resultados, comparados ao número inicial de viagens e aos de [Rodrigues & Santos \(2018b\)](#), se demonstraram satisfatórios, reduzindo o número de motoristas e gerando sequências apropriadas de viagens para cada motorista.

Abstract

¹RODRIGUES, Bárbara da Costa; SANTOS, André Gustavo. Alocação de motoristas para um conjunto de viagens utilizando heurística. **50º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)**. 2018.

Routes scheduling and planning is a challenge task for humans and computer systems, as it is necessary to consider several features, like trips costs, keep routes feasibility, number of trucks, as well routes that fulfill current working laws. This paper proposes a mathematical formulation to minimize the number of drivers to cover a set of exporting, importing and inland trips, grouping and sequencing trips that requires shorter displacements and then plan a sequence of trips to each truck driver. The formulation is solved by column generation, using a greedy heuristic to solve the subproblem. The results compared to the initial number of trips and the results of the method proposed by [Rodrigues & Santos \(2018b\)](#) show a satisfactory performance, decreasing the number of drivers by generating a sequence of trips to each driver.

3.1 Introdução

O planejamento de rotas observa diversas variáveis que envolvem o transporte de cargas. Mais especificamente, ele não se preocupa apenas em decidir a melhor rota a ser realizada em termos de distância, mas também considera os custos operacionais (como, por exemplo, gasto com motoristas, combustíveis, dentre outros) e as restrições dos clientes (janelas de tempo). Gerenciar todos estes fatores torna o planejamento de rotas uma tarefa difícil, porém, uma tarefa essencial.

A utilização de métodos matemáticos possibilita atender parte de tais exigências e traz benefícios como: otimização das rotas, eficiência nas entregas, redução dos atrasos causadas pela falta de planejamento, redução de gastos com motoristas e combustíveis, redução de viagens que são realizadas sem cargas e redução do número de caminhões que trafegam nas estradas.

A minimização do número de caminhões de uma frota contribui para redução de gases poluentes e de congestionamento em cidades e portos ([ISLAM, 2017A](#)). [Schulte et al. \(2015\)](#) destacam que essa redução de caminhões por meio de agrupamento de viagens traz benefícios econômicos, como ganho adicional aos motoristas e a redução de custos operacionais.

Na literatura encontram-se trabalhos que empregaram modelos matemáticos para agrupar viagens com intuito de reduzir o número de caminhões, agendamento de rotas e minimização de custos. [Rix et al. \(2015\)](#) propuseram um modelo de agendamento de rotas para uma indústria florestal, o qual possibilitou antecipar oportunidades de cargas para viagem de volta, economia de combustível e a diminuição do tempo de espera dos transportadores. O modelo foi solucionado pelo

método de geração de colunas e o subproblema utilizou programação dinâmica para gerar as colunas.

Rey et al. (2009) propuseram um modelo para agendar e atribuir caminhões disponíveis para entrega de produtos florestais. A modelagem tem como objetivo minimizar custos associados às diárias dos transportadores. Para solução do modelo foi utilizado o método de geração de colunas.

Seguindo ideias de Caballini et al. (2015), Rodrigues & Santos (2018b) agruparam viagens de importação, exportação e entre cidades, com intuito de minimizar viagens que trafegam sem cargas. O modelo matemático proposto combinou viagens em sequências de duas e três viagens, reduzindo viagens sem carga e o número de caminhões utilizados. A modelagem apresentava restrições de janela de tempo e exigências prevista por leis trabalhistas.

O objetivo desse artigo é propor um modelo matemático para minimizar o número de caminhões de um conjunto de viagens, agrupando as viagens que possuem menor deslocamento quando realizadas em sequência, e realizar um planejamento de uma sequência de viagens para cada motorista. A modelagem contém restrições de leis trabalhistas vigentes no Brasil para garantir o bem-estar dos motoristas.

Este artigo está estruturado da seguinte maneira: na Seção 3.2 apresentamos uma definição formal do problema. Na Seção 3.3 é descrito o método proposto e os resultados são apresentados na Seção 3.4. As conclusões e trabalhos futuros estão contidos na Seção 3.5.

3.2 Definição do Problema

O problema proposto tem como entrada um conjunto de viagens T , que podem ser viagens de exportação, importação e entre cidades. Cada viagem i possui uma cidade de origem e uma de destino e valores de reposicionamento, que são as distâncias de uma viagem a outra, ou seja, a distância entre o destino da viagem i e a origem de cada outra viagem l . Todas as distâncias entre as cidades são mensuradas em quilômetros (km).

Cada viagem desse conjunto T é realizada por um caminhão, que muitas vezes acarreta em viagens em que os caminhões trafegam sem cargas (por exemplo, a volta descarregado à cidade de origem), aumentando o fluxo de caminhões nas rodovias, além de contribuir para os congestionamentos nas cidades e nos portos.

Para reduzir o número de viagens sem cargas e, conseqüentemente a redução do número de caminhões, foram realizadas combinações de viagens que não possuem

deslocamento, utilizando a modelagem presente no trabalho de [Rodrigues & Santos \(2018b\)](#), que será detalhada em [3.2.1](#). As combinações podem realizadas por duas ou três viagens, como representado na [Figura 3.1](#).

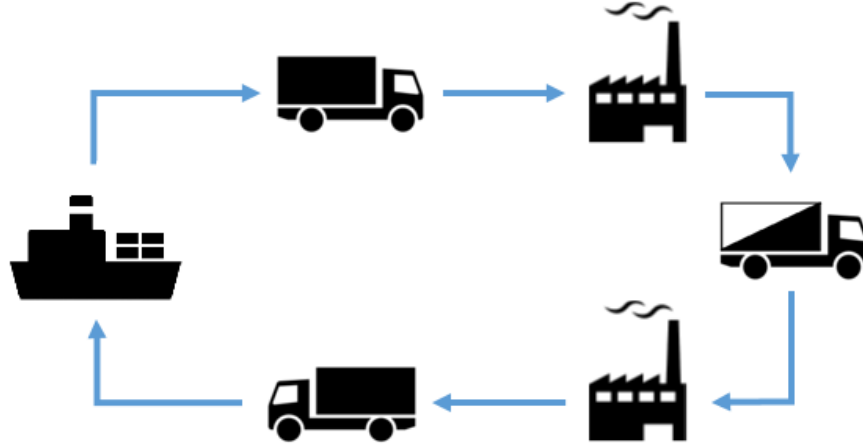


Figura 3.1: Combinação de viagens de exportação, importação e entre cidades.

3.2.1 Modelo [Rodrigues & Santos \(2018b\)](#)

Para o agrupamento de viagens que não possuem deslocamento foram geradas combinações de duas e três viagens por meio de dois métodos: um modelo matemático e uma heurística. Ambos métodos tinham como restrições as janelas de tempo dos portos e das cidades, incluindo também os horários de descanso acrescentados no tempo total de viagem, decorrente das leis trabalhistas vigentes no Brasil, e retornavam o tempo total de combinação das viagens, determinando o melhor horário de partida de cada viagem da sequência.

As combinações geradas que atendiam às restrições foram submetidas ao modelo a seguir:

$$\min Z = \sum_{ilk \in \mathcal{T}^3} B_{ilk} y_{ilk} + \sum_{il \in \mathcal{T}^2} C_{il} v_{il} + \sum_{i \in \mathcal{T}} D_i x_i \quad (3.1)$$

sujeito a:

$$\sum_{\substack{ilk \in \mathcal{T}^3 \\ i=j \vee l=j \vee k=j}} y_{ilk} + \sum_{\substack{il \in \mathcal{T}^2 \\ i=j \vee l=j}} v_{il} + x_j = 1 \quad \forall j \in \mathcal{T} \quad (3.2)$$

$$y_{ilk}, v_{il}, x_i \in \{0,1\} \quad \forall \quad ilk \in \mathcal{T}^3, il \in \mathcal{T}^2, i \in \mathcal{T} \quad (3.3)$$

As variáveis de decisão y , v e x representam respectivamente combinações de 3 e 2 viagens e viagens feitas de forma isolada. O modelo tem como função objetivo (3.1) minimizar o tempo total do conjunto de viagens. As restrições (3.2) indicam que todas as viagens devem ser realizadas e só podem ser combinadas apenas uma vez.

Através da modelagem foi possível reduzir o número de motoristas para executar todas as viagens, reduzir o tempo estimado para executar todas as viagens e, ainda, determinar que as combinações de 2 e 3 viagens, simultaneamente, fossem mais eficazes que combinar 2 ou 3 viagens solos.

A geração de combinações pela heurística apresentou, como esperado, um tempo computacional menor em relação à geração de combinações feita pelo modelo (combinações). Porém, o modelo apresentou resultados melhores porque os horários de saída das viagens eram determinadas de forma otimizada, dessa forma, o modelo reduzia o tempo de espera em portos e cidades causados por chegadas fora da janela de tempo. Na heurística esse tempo era determinado antes da execução, o que gerou um aumento no tempo de espera.

Para gerar as combinações usadas no modelo proposto nesse artigo, foram utilizados os resultados gerados pelo modelo de combinações.

3.3 Método de Solução

As combinações geradas pelo modelo do artigo Rodrigues & Santos (2018b) foram enumeradas e a partir dessa numeração foram criadas combinações (sequências de viagens combinadas), que indicam um roteiro a ser realizado a um motorista. Para algumas instâncias, devido ao tempo computacional, não foi possível gerar todas as combinações. Para solucionar este problema foi utilizado o método geração de colunas de forma heurística.

3.3.1 Geração de Colunas

Geração de colunas é um método de solução para modelos matemáticos quando se tem um grande número de variáveis, dividido em duas partes: problema mestre e subproblema (Gendreau & Potvin (2010)). O problema mestre contém as restrições de um modelo restrito. Após sua solução e análise dos valores duais são geradas novas colunas pelo subproblema. Para obtenção dos valores duais, resolve-se na verdade a relaxação linear do modelo mestre restrito. As colunas geradas são equivalentes a soluções do subproblema, que são incluídas ou não no modelo mestre, por

meio do resultado do cálculo do custo reduzido. Se o custo reduzido for interessante (negativo ou positivo dependendo do contexto), a nova solução é acrescentada como variável no problema mestre, podendo ser adicionada mais de uma por iteração. O método se encerra quando o custo reduzido da melhor solução do subproblema não tiver custo reduzido interessante para o problema mestre e, dessa maneira, não existe nenhuma solução a ser inserida.

3.3.1.1 Problema Mestre

O conjunto inicial de combinações para o problema foi gerado por meio da heurística apresentada no Algoritmo 1. Essa heurística gera combinações aleatórias, possibilitando que o problema tenha um espaço de busca maior. Ela descarta combinações que ultrapassam o tempo de 240 horas (10 dias) e adiciona o tempo de jornada que equivale a 11 horas, sendo esse tempo de descanso entre as viagens, prevista por lei.

Algorithm 1 Heurística da geração do conjunto inicial de combinações

```

Ci ← geraCombinação()
while !verificaSolucao(Ci) do
    retiraElemento(Ci)
end while
salvaSolucaoViavel(Ci)

```

No modelo matemático foi realizada uma relaxação linear para a utilização do método de geração de colunas. Ele apresenta as seguintes variáveis:

- x_i : variável binária que indica se a i -ésima combinação de viagens foi selecionada;

No modelo temos dois conjuntos: \mathcal{T} , o conjunto de viagens combinadas, geradas conforme descrição na seção 3.2.1, e \mathcal{C} , um conjunto de sequências de combinações de viagens, geradas pelo subproblema descrito a seguir, na seção 3.3.1.2. Os valores binários b_{ij} representam as colunas geradas pelo subproblema, indicando se a combinação i faz parte da sequência j ou não.

$$\min Z = \sum_{i \in \mathcal{C}} x_i \quad (3.4)$$

sujeito a:

$$\sum_{i \in \mathcal{C}} b_{ij} x_i = 1 \quad \forall j \in \mathcal{T} \quad (3.5)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in \mathcal{C} \quad (3.6)$$

A função objetivo (3.4) minimiza o número de caminhões, pois cada combinação de viagens representada pela variável x é uma sequência viável de viagens considerando todas as janelas de tempo e descansos previstos na lei, sendo possíveis de serem realizadas por um único motorista. A restrição (3.5) verifica e garante que todas as viagens foram combinadas, obrigando que cada viagem faça parte de alguma combinação selecionada. Como critério de parada foi adotado o valor do custo reduzido positivo do subproblema (ou seja, sem novas colunas adicionadas) e o tempo de máximo de geração de colunas equivalente a 1 hora. Depois que colunas geradas foram inseridas, o modelo foi convertido para um modelo linear inteiro e solucionado novamente. Por enquanto não foi usado o método de *branch-and-price* para continuar gerando novas colunas, uma vez que elas estão ainda sendo geradas heurísticamente.

3.3.1.2 Subproblema

O subproblema, ou *pricing*, identifica as variáveis que serão incluídas no problema mestre. É interessante que seja um método de fácil solução, podendo ser por meio de heurística gulosa, algoritmos evolucionários, programação dinâmica e geração de combinações aleatórias. Entretanto, para garantir a correta parada do método quando não há mais condições de melhoria, ou seja, garantir otimalidade do problema mestre, deve-se usar, pelo menos nas últimas iterações, um método exato. Isto não foi usado neste trabalho devido ao alto custo computacional de tratar todas as restrições do problema.

O custo reduzido de uma sequência de viagens combinadas i é dado pela expressão (4.4):

$$1 - \sum_{j \in \mathcal{T}} \pi_j b_{ij} \quad (3.7)$$

sendo 1 o custo da coluna no problema mestre (1 motorista), π_j o preço dual de cada viagem, correspondente à cada restrição (3.5) do problema mestre, e b_{ij} um vetor binário para a combinação i que indica se a combinação de viagens j faz parte ou não da sequência gerada. Estas variáveis são os coeficientes das restrições do problema mestre.

O presente trabalho utilizou uma abordagem gulosa, representada no Algoritmo 2, em que ordenamos os preços duais do conjunto de restrições presentes no modelo mestre. Dessa maneira foram geradas combinações que possuíam os maiores valores duais, conseqüentemente os menores custos reduzidos. Essas combinações

foram submetidas à uma verificação que analisava se as mesmas não ultrapassaram o tempo de 240 horas (equivalente a 10 dias), que foi o limite de espera para uma viagem completa designada a um motorista ser considerada viável.

Algorithm 2 Heurística do subproblema para gerar sequência (coluna) j

```

 $\pi \leftarrow obterValoresDuais$ 
 $ordenaValoresDuais(\pi)$ 
 $S_j \leftarrow \emptyset$ 
for all  $i \in C$  do
  if  $verificaSolucao(S_j + C_i)$  then
     $S_j \leftarrow S_j + C_i$ 
     $b_{i,j} \leftarrow 1$ 
  end if
end for

```

3.4 Resultados

As formulações do modelo foram implementadas em C/C++ usando a Biblioteca de Tecnologia da Concert e foram solucionadas pela licença acadêmica do CPLEX 12.5. As heurísticas foram implementadas em C/C++. Os experimentos foram executados em uma CPU Intel® Core™ i7-4790K @ 4.00GHz x 8 com 32GB de RAM, rodando o Ubuntu 14.04 LTS 64 bits.

3.4.1 Instâncias

As instâncias utilizadas nesse artigo foram geradas por meio do resultado da modelagem presente no artigo Rodrigues & Santos (2018b). Apresenta as viagens combinadas de exportação, importação e entre cidades, das cidades de: Santos - SP, Cubatão - SP, Manhuaçu - MG, Passos - MG, Arcos - MG, Rondonópolis - MT, Sorriso - MT, Dourados - MS e Itumbiara - GO. Essas cidades exportam grãos (café, milho e soja) e importam insumos agrícolas (fertilizantes e gesso agrícola) de Santos, cidade portuária que recebe diariamente diversas viagens de exportação e importação. As instâncias contêm originalmente dados de 15 a 124 viagens. Quando combinadas, Rodrigues & Santos (2018b) encontraram soluções que usam de 7 a 55 veículos, reduzindo praticamente pela metade o número de veículos se fossem feitas isoladamente, sem compartilhamento, assim diminuindo o número de veículos trafegando sem carga. Os resultados foram usados neste trabalho, como uma fase além, que sequencia as combinações e atribui a número reduzido de motoristas.

Além das viagens combinadas (que podem ser combinações de duas ou três viagens) a instância apresenta o tempo que foi necessário para realização das viagens, a origem e destino de cada viagem e as distâncias entre as cidades.

3.4.2 Resultados Computacionais

A tabela 3.1 contém o número presente de viagens de cada instância, o número de caminhões combinados pelo modelo de Rodrigues & Santos (2018b) e o número de motoristas, calculados pelo método que foi proposto no presente artigo.

Tabela 3.1: Número de caminhões necessários.

ID	Nº de caminhões necessários.		
	Sem Combinação	Rodrigues & Santos (2018b)	Modelo Proposto
1	15	7	2
2	31	15	4
3	47	23	6
4	62	31	7
5	76	37	10
6	94	44	11
7	124	55	15

Por meio da tabela pode-se observar que o modelo proposto neste artigo aloca as viagens combinadas do modelo Rodrigues & Santos (2018b) em um número menor de caminhões, como pode ser visualizada por meio do gráfico da Figura 3.2.

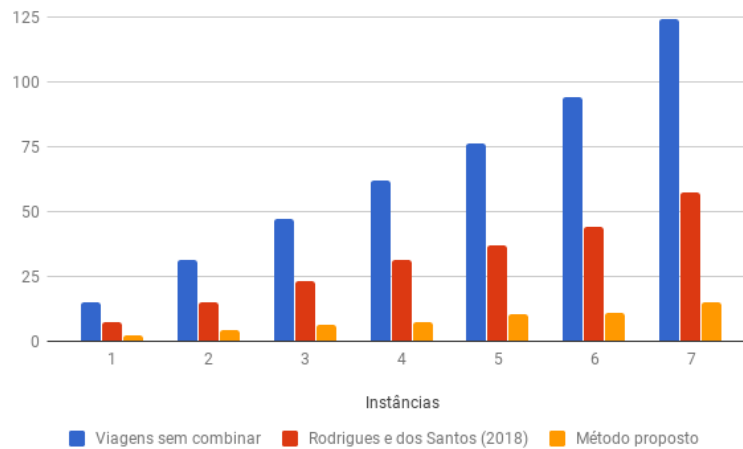


Figura 3.2: Número de caminhões

O modelo apresentado contribui para o planejamento com antecedência para empresas que prestam serviços de fretes de exportação, importação e entre cidades. Os resultados obtidos por meio do modelo matemático apresentam uma redução no número de caminhões necessários pra realizar um conjunto de viagens. Pode ainda ser usado por um consórcio de empresas que compartilham o atendimento de grande volume de viagens, permitindo a realização de mais viagens dentro de um tempo limitado.

O planejamento possibilita a maximização do uso dos caminhões e a minimização da frota de caminhões necessários para executar todas as viagens programadas, através do agrupamento dessas viagens de acordo com o valor do reposicionamento, que quando existe é o mínimo possível. Dessa forma, contribui para a redução de caminhões que trafegam sem cargas.

A redução do número de caminhões da frota contribui nos aspectos econômicos, pois quanto menor a quantidade de caminhões menor os custos gastos com e por eles; contribui nos aspectos ambientais como a minimização emissões de gases poluentes; contribui ainda no benefício aos transportadores que tem o tempo de espera reduzido em portos e congestionamentos em cidades.

Como dados adicionais, apresentamos na tabela 3.2 o número de iterações do método (quantidade de execuções do subproblema) e o tempo médio de execução dos subproblemas de cada instância. Nota-se o baixo número de iterações, inferior ao número de viagens de cada instância, e o baixo custo computacional da heurística, independentemente do número de viagens.

Tabela 3.2: Número de iterações e tempo de execução do subproblema.

ID	Número de viagens	Número de iterações	Tempo médio (s)
1	15	0	-
2	31	12	0.030
3	47	26	0.036
4	62	41	0.032
5	76	52	0.049
6	94	65	0.057
7	124	82	0.053

3.5 Conclusão

Para a realização de um planejamento de rotas de viagens é necessário considerar vários fatores. Este trabalho contribuiu para a modelagem deste planejamento ao incluir a combinação de viagens de exportação, importação e entre cidades, de maneira que o número de caminhões utilizado neste conjunto de viagens fosse reduzido. A modelagem considera como restrições as leis de jornada de trabalho vigentes no Brasil e um tempo máximo pra execução das viagens. A modelagem foi aplicada em um conjunto de viagens que representa o cenário brasileiro de exportação e importação. Os resultados obtidos mostram a redução do número de caminhões necessários para realizar as viagens. Além disto, a modelagem apresenta como resultado uma sequência de viagens que devem ser realizadas por cada motorista. Essa sequência não ultrapassa o valor de 240 horas, sendo este o tempo máximo de uma combinação.

Como trabalhos futuros, pretende-se adicionar como restrição nesta modelagem, as datas limites de entrega. Esta restrição torna-se importante, devido ao tipo de produto a ser transportado, por exemplo, os grãos possuem uma validade e é necessário que ele chegue ao seu destino em boas condições. Outros fatores para a inclusão das datas limites de entrega são viagens de importação que em que alguns produtos importados possuem data de entrega e precisam ser levadas em consideração, bem como a preocupação com o bem-estar dos motoristas. Além das datas limites de entrega, outras restrições estão sendo estudadas para serem incluídas na modelagem proposta. Tais restrições tornam a geração de novas colunas mais complexa, mas podem reduzir o espaço de busca. Após a inclusão dessas restrições será analisado o real impacto das mesmas no custo computacional e no valor da solução.

Capítulo 4

Heurística para redução do número de caminhões em viagens com prazo de entrega

Resumo

Viagens que são realizadas sem cargas acarretam em um aumento de caminhões nas rodovias e portos, contribuindo para os congestionamentos em cidades e áreas portuárias. Esse artigo propõe uma nova heurística para o modelo presente no artigo [Rodrigues & Santos \(2018b\)](#). A heurística define qual o melhor horário para iniciar a primeira viagem, reduzindo o tempo de espera das viagens. A heurística tornou-se a abordagem mais eficaz para o modelo, conseguindo os mesmos resultados obtidos pelo método exato em um tempo bem inferior. O artigo contém uma variação para o modelo do artigo [Rodrigues & Santos \(2018a\)](#) que inclui datas de entregas das viagens combinadas. A solução da variação do modelo foi por meio do método de geração de coluna, em que o subproblema é constituído por uma abordagem gulosa que gera novas colunas selecionando as combinações com maiores valores duais. O método conseguiu reduzir em cerca de 65% o número de caminhões em relação ao resultado do modelo de [Rodrigues & Santos \(2018b\)](#) e 80% em relação ao número original das instâncias utilizadas.

Abstract

Trips empty are contributes to the increase of trucks traveling on highways and ports, contributing to congestion in cities and port areas. This article proposes a new heuristic for the model present in the paper [Rodrigues](#)

(Santos & Santos (2018b)). The heuristic defines the best time to start the first trip, reducing travel time. The heuristic became the most effective approach to the model, achieving the same results obtained by the exact method at a much lower time. This paper contains also variation for the model presented in (Rodrigues & Santos (2018a)) which includes delivery dates for the combined trips. The solution of the model variation was by means of the column generation method, whereby, the subproblem consists of a greedy approach that generates new columns selecting the combinations with highest dual values. The method was able to reduce the number of trucks in around 65% when compared to the results of (Rodrigues & Santos (2018b)) and 80% compared to the original number from the instances used.

4.1 Introdução

O custo da produção de grãos no cenário brasileiro é baixo, devido às condições climáticas favoráveis, às grandes áreas para plantios e aos estudos voltados para o melhoramentos dos grãos. Mas, mesmo com todas essas vantagens em relação a outros países produtores de grãos, o Brasil fica em desvantagem quando os grãos são escoados até os portos. Sem investimentos nas infraestruturas das rodovias (BRANCO & CAIXETA FILHO, 2008) somados aos congestionamentos causados pela falta de planejamento logístico e o número de caminhões, causam atrasos que ocorrem frequentemente nos portos.

Em portos brasileiros, multas por atrasos (*demurrage*) ocorrem quando as embarcações são impedidas de atracar e de descarregar fora do intervalo de *free-time*¹. Essa situação é frequente devido a problemas operacionais e burocracias impostas no processo de importação e exportação e aos congestionamentos no portos. A *demurrage* acarreta grandes prejuízos, que são acrescentados no preço finais dos produtos (DA COSTA SIMÕES ET AL., 2018).

As datas de entregas em viagens que transportam grãos são essenciais para preservar a qualidade do produto em transporte e podem contribuir para redução de congestionamentos. Em alguns portos, os caminhões chegam sem um horário estipulado, fazendo que em alguns períodos do dia a demanda se exceda, causando congestionamentos (CABRAL RIBEIRO ET AL., 2017).

Este artigo tem como objetivo propor uma nova heurística para o modelo presente no artigo (Rodrigues & Santos (2018b)) e o acréscimo de uma nova restrição no modelo do artigo (Rodrigues & Santos (2018a)) que inclui prazos de entrega.

¹intervalo de tempo que os navios possuem para atracar e descarregar

Pretende-se com esse trabalho reduzir o número de caminhões que trafegam sem carga, minimizar o número de caminhões necessários para realizar um conjunto de viagens, respeitar datas de entrega impostas por clientes e reduzir multas de *demurrage* ocasionadas pelo congestionamentos em portos.

A nova restrição que define os intervalos de entrega propostos no presente trabalho permite que as viagens sejam realizadas no tempo estipulado pelos exportadores e importadores, reduzindo a perda da qualidade dos grãos, prejuízos causados por negócios cancelados que não foram realizados no tempo combinado e redução do tempo em que os navios ficam atracados nos portos fora do intervalo de *free-time*.

Esse artigo é organizado da seguinte maneira: na Seção 4.2 apresentamos trabalhos encontrados na literatura relacionados ao problema e na Seção 4.3 a definição do problema. Na Seção 4.4 são descritas a heurística e a variação do modelo proposto e os resultados são apresentados na Seção 4.5. As conclusões e trabalhos futuros estão contidos na Seção 4.6.

4.2 Referencial Teórico

Na literatura, encontramos trabalhos voltados para os problemas encontrados no cenário de exportação de grãos no Brasil. Por exemplo, dos Santos Lopes et al. (2017) propuseram um modelo com objetivo de minimizar os custos e analisar as melhores opções de rotas para o cenário de exportação de soja. Com o modelo proposto, foi possível reduzir custos operacionais. Dessa forma, o modelo se torna uma alternativa para reduzir os custos, investimentos na logística e inclusão de fretes de retorno.

Encontramos trabalhos que têm como objetivo minimizar os impactos ambientais causados com a emissão de gases poluentes geradas por caminhões. Turkensteen & Hasle (2017) propuseram um modelo que define rotas para reduzir a distância total das viagens e combina viagens de coleta e entrega de um conjunto de viagens, essas que eram realizadas por um caminhão cada. O objetivo do trabalho é determinar a economia das distâncias das viagens que implica na redução de emissão de carbono. Diferente do modelo proposto nesse artigo, os autores utilizam os pontos de coletas e entregas uniformemente, e as distâncias dos depósitos aos lugares de entregas são pequenos.

Islam (2017b) em seu trabalho simulou o compartilhamento de caminhões em um ambiente portuário, comparando dois cenários: o primeiro considerando

compartilhamento e o segundo sem uso de colaboração. Usando dados de uma porto local, o autor conseguiu mostrar que a colaboração entre caminhões aumenta o uso da capacidade do porto, além de reduzir as emissões de gases poluentes e o congestionamento ao redor do porto.

Trabalhos que combinam viagens de exportação e importação com intuito de reduzir o número de caminhões que trafegam sem carga também são encontrados. Caballini et al. (2015) empregaram seu trabalho em um ambiente portuário que inclui viagens de exportação, importação e interior (entre cidades). Além disso, o trabalho teve como foco o transporte de contêineres de 20 pés. Elas propuseram um modelo com objetivo de diminuir o custo das viagens e com restrições de janela de tempo e horas de condução. Utilizaram-se instâncias reais do porto de Gênova, Itália e os resultados mostraram uma diminuição de custo e de movimentos vazios (caminhão sem carga) quando se tem a combinação de viagens.

Baseando-se nesse trabalho de Caballini et al. (2015), Rodrigues & Santos (2018b) agruparam viagens de importação, exportação e entre cidades, com objetivo de minimizar viagens que trafegam sem cargas nas rodovias brasileiras. O modelo matemático proposto combinou viagens em sequências de duas e três viagens, que respeitavam as restrições de janelas de tempo dos portos e cidades e das exigências de leis trabalhistas. Por meio desse trabalho foi possível reduzir o número de caminhões que trafegam sem carga. As soluções do modelo foram por meio de método exato e heurística.

Em outro trabalho, Rodrigues & Santos (2018a) reduziram ainda mais o número de caminhões necessário para realizar um conjunto de viagens. Por meio dos resultados encontrado no modelo do artigo anterior, foi realizada uma alocação das viagens combinadas para um número reduzido de caminhões, incluindo restrições de leis trabalhistas e tempo máximo em que as viagens podem ser realizadas. Para solucionar o problema foi utilizada heurística com método de geração de colunas.

O presente trabalho apresenta uma nova heurística para o modelo de Rodrigues & Santos (2018b) e uma variação do modelo presente no artigo Rodrigues & Santos (2018a), contribuindo para redução de caminhões que trafegam sem carga e, conseqüentemente, para a diminuição de congestionamento e emissão de gases poluentes.

4.3 Definição do Problema

Rodrigues & Santos (2018b) propuseram um modelo que tem como entrada um

conjunto de viagens. Esse modelo agrupa as viagens em combinações de 2 e 3 viagens, reduzindo o número de caminhões necessários para executar um conjunto de viagens. Os métodos de solução apresentados no artigo não foram eficazes para solucionar o modelo usado para combinar viagens, pois o método exato era custoso computacionalmente e a heurística gerava combinações com horários inapropriados de chegada ao destino, causando altos tempos de espera. Devido a essa necessidade propõe-se nesse artigo uma nova heurística para resolver o modelo.

Além disto, apresentamos uma variação do modelo do artigo [Rodrigues & Santos \(2018a\)](#). O modelo tem como objetivo alocar um conjunto de viagens a um número menor de caminhões, com restrições de jornada de trabalho e tempo limite para as viagens. Nossa variação adiciona uma nova verificação que consiste em analisar se o tempo da combinação está entre o intervalo do limite inferior e superior de cada viagem. Os limites inferior e superior de cada viagem definem o intervalo válido de sua realização, e são dados de entrada do problema. Isto permite, por exemplo, considerar cargas perecíveis.

4.4 Métodos de Solução

Nesta seção apresentamos a nova heurística proposta para o modelo de [Rodrigues & Santos \(2018b\)](#) e a variação do modelo do artigo [Rodrigues & Santos \(2018a\)](#).

4.4.1 Heurística para o modelo [Rodrigues & Santos \(2018b\)](#)

A nova heurística proposta é baseada em busca exaustiva, em que os horários de início das viagens (valores para a variável q_i do modelo), são definidos após a verificação do melhor horário para a primeira viagem iniciar. Todos os valores do intervalo do horário de abertura até o horário de fechamento são testados. O horário que minimiza o valor do tempo de espera é selecionado como o novo valor de q_i . A heurística verifica qual o melhor horário para iniciar a primeira viagem, com o intuito de minimizar o tempo total. Essa escolha do melhor horário faz com que a primeira viagem seja iniciada em um horário que permite a mesma chegar dentro dos horários de funcionamento das cidades e porto, evitando que o tempo de espera seja adicionado e, quando vários horários permitem chegada dentro da janela de tempo, escolhe o que permite que as viagens subsequentes cheguem dentro ou o mais próximo da janela de tempo.

4.4.2 Variação do modelo [Rodrigues & Santos \(2018a\)](#)

Para a solução da variação do modelo [Rodrigues & Santos \(2018a\)](#) continuamos utilizando o método de geração de colunas.

O método de geração de colunas divide o problema em duas partes: problema mestre e subproblema. Utiliza-se o método de geração de colunas em problemas que possuem uma grande quantidade de variáveis ([GENDREAU & POTVIN, 2010](#)). Após a solução do problema mestre, o método analisa os valores duais da solução e, no subproblema, gera novas colunas para inserir no modelo.

4.4.2.1 Problema Mestre

No modelo do problema mestre temos um conjunto \mathcal{S} de sequências de combinações de viagens. Os valores binários b_{ij} representam as combinações do conjunto inicial mais as combinações (colunas) geradas pelo subproblema, indicando se a combinação i faz parte da sequência j ou não.

$$\min Z = \sum_{i \in \mathcal{S}} x_i \quad (4.1)$$

sujeito a:

$$\sum_{i \in \mathcal{S}} b_{ij} x_i = 1 \quad \forall j \in \mathcal{T} \quad (4.2)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in \mathcal{S} \quad (4.3)$$

Cada combinação de viagens é representada pela variável x que representa uma sequência viável. A função objetivo [\(4.1\)](#) minimiza o número de caminhões necessário para realizar um conjunto de viagens. A restrição [\(4.2\)](#) obriga que cada viagem faça parte de alguma combinação selecionada.

A heurística para gerar combinações de viagens (colunas) iniciais do problema mestre gera aleatoriamente um conjunto inicial de combinações para o modelo. As combinações passam por uma validação até serem aceitas, como mostra o algoritmo [3](#).

Algorithm 3 Heurística da geração do conjunto inicial de combinações

```

 $S_i \leftarrow \text{geraCombinacao}()$ 
while !verificaSolucao( $S_i$ ) do
    retiraElemento( $S_i$ )
end while
salvaSolucaoViavel( $S_i$ )

```

A heurística adiciona um tempo de descanso de 11 horas entre cada viagem da combinação e não permite viagens em que:

- o tempo total das combinações geradas ultrapasse o tempo de 240 horas, que é equivalente a 10 dias;
- o tempo de cada viagem exceda os limites inferiores e superiores de cada viagem.

Podemos observar esse processo no Algoritmo 4, em que o tempo total da jornada é representada pela variável *CustoJornada*, o tempo de cada viagem pela variável *CustoV* e as datas de entrega de cada viagem são definidas pelas constantes *limiteInferior* e *limiteSuperior*.

Algorithm 4 Função que verifica se a combinação é válida.

```

bool verificaSolucao()
if CustoJornada + CustoVi ≥ limiteInferiori and CustoJornada + CustoVi ≤ limiteSuperiori then
  CustoJornada → CustoJornada + CustoVi + tempoDescanso
else
  return false
end if
if CustoJornada ≤ 240 then
  return true
else
  return false
end if

```

4.4.2.2 Subproblema

O subproblema tem como objetivo gerar e selecionar novas variáveis que podem ser incluídas no problema mestre. Essa identificação e inclusão das novas variáveis são definidas por meio de outro modelo matemático, abordagens gulosas ou evolutivas, programação dinâmicas, entre outros. O critério de parada da geração de novas soluções é por meio do valor do custo reduzido. O custo reduzido é definido pela fórmula:

$$1 - \sum_{j \in \mathcal{T}} \pi_j b_{ij} \quad (4.4)$$

Temos:

- 1 representa o custo da coluna no problema mestre (1 motorista);
- π_j o preço dual de cada viagem, de cada restrição do problema mestre;
- b_{ij} um vetor binário que indica se a combinação de viagens j faz parte ou não da sequência gerada.

Os preços duais π_j são dados de entrada do subproblema, fornecidos pelo problema mestre. Os valores b_{ij} são variáveis do subproblema, e determinam a

combinação de viagens gerada, que serão passados para o problema mestre, para inclusão de uma variável com a nova combinação gerada.

O subproblema desse artigo é resolvido por uma heurística gulosa, apresentada no Algoritmo 5, que gera as colunas que serão adicionadas ao modelo. Essa geração de novas colunas ordena os valores duais em ordem decrescente e gera uma nova combinação que é verificada pela função apresentada no Algoritmo 4. Caso a combinação seja válida é inserida no modelo, caso contrário, é retirado o primeiro elemento da combinação. Esse processo se repete até quando a solução seja aceita. Escolhendo-se as combinações nesta ordem tenta-se priorizar aquelas que terão melhores custos reduzidos.

Algorithm 5 Heurística do subproblema para gerar sequência (coluna) i

```

 $\pi \leftarrow obterValoresDuais$ 
 $ordenaValoresDuais(\pi)$ 
 $S_i \leftarrow \emptyset$ 
for all  $j \in C$  do
  if  $verificaSolucao(S_i + C_j)$  then
     $S_i \leftarrow S_i + C_j$ 
     $b_{ij} \leftarrow 1$ 
  end if
end for

```

4.5 Resultados e Discussão

As formulações do modelo foram implementadas em C/C++ usando a Biblioteca de Tecnologia Concert e foram solucionadas pela licença acadêmica do CPLEX 12.5. As heurísticas foram implementadas em C/C++. Os experimentos foram executados em uma CPU Intel® Core™ i7-4790K @ 4.00GHz x 8 com 32GB de RAM, rodando o Ubuntu 14.04 LTS 64 bits.

4.5.1 Instâncias

As instâncias utilizadas apresentam as viagens combinadas de exportação, importação e entre cidades, das cidades de: Santos-SP, Cubatão-SP, Manhuaçu-MG, Contagem - MG, Passos-MG, Arcos-MG, Rondonópolis-MT, Sorriso-MT, Dourados-MS e Itumbiara-GO. Essas cidades importam insumos agrícolas (fertilizantes) e exportam grãos (café, milho, soja) e têm como destino Santos, principal porto de exportação de grãos do centro-sudeste ou possui indústrias que entregam produtos em todo Brasil. O tamanho das instâncias varia de 15 a 124 viagens, como representado na tabela 4.1, que apresenta ainda o tempo mínimo, máximo e a média do tempo de cada instância.

Tabela 4.1: Tamanho instâncias.

ID	Viagens	Duração (h)		
		min	max	med
1	15	3.7	26.7	14.0
2	31	3.7	26.7	15.8
3	47	3.7	26.7	14.5
4	62	3.7	26.7	13.1
5	76	3.7	26.7	15.0
6	94	3.7	26.7	13.5
7	124	3.7	26.7	13.9

As instâncias utilizadas no modelo do presente trabalho foram geradas por meio dos resultados do modelo presente no artigo (RODRIGUES & SANTOS, 2018B) com a heurística apresentada nesse artigo e as datas de entrega foram geradas aleatoriamente. Quando as viagens são combinadas, o número de veículos necessários para realizar todas as viagens reduz praticamente pela metade, reduzindo o tamanho das instâncias para 7 a 55 viagens (combinadas). As instâncias são constituídas das viagens combinadas (2 ou 3 viagens), o tempo necessário para realizar cada viagem e o acréscimo de datas de entregas.

Além disso, foram acrescentados nas instâncias o intervalo que cada viagem deve ser realizada. Assim, cada combinação possui um limite inferior e superior que indica em qual intervalo de tempo ela pode ser realizada.

4.5.2 Resultados referentes à heurística para o modelo

Rodrigues & Santos (2018b)

A heurística proposta por Rodrigues & Santos (2018b) considerava o valor de q_i fixo, tendo como horário inicial o valor de 7 horas, que é o horário de abertura dos portos e estabelecimentos. Dessa forma, a heurística não convergia a um valor ótimo, porque as viagens iniciadas nesse horário podem chegar ao seu destino final em um horário fora da janela de tempo, acarretando o acréscimo de tempo no valor final.

A nova heurística proposta nesse trabalho define qual melhor horário para iniciar a primeira viagem e, conseqüentemente, consegue encontrar os mesmos valores do modelo, pois, os tempos de espera são minimizados ou nulos.

No gráfico representado na figura 4.1 é possível visualizar que a heurística proposta é a melhor opção para resolução do problema. Ele apresenta, para cada instância e para cada método, o valor de função objetivo da solução encontrada (barras) e o tempo de execução (linhas). Temos que os valores da Função Objetivo

(FO) são os mesmos para o modelo e a heurística proposta, enquanto, a heurística de Rodrigues & Santos (2018b) tem o valor maior. Porém, em relação ao tempo computacional, a heurística proposta tem um valor inferior em relação ao tempo do modelo, tornando a heurística mais eficaz para resolução do modelo.



Figura 4.1: Comparação dos métodos de solução para o modelo Rodrigues & Santos (2018b)

4.5.3 Resultados da variação do modelo Rodrigues & Santos (2018a)

Na Tabela 4.2 temos os resultados do modelo de Rodrigues & Santos (2018b) em que as viagens são combinadas em 2 e 3 viagens, os resultados do modelo de Rodrigues & Santos (2018a) em que as viagens combinadas pelo modelo anterior são alocadas ao menor número de motoristas e os resultados deste novo trabalho, que são do modelo anterior com adição de uma nova restrição que define prazo de entrega as viagens. Por meio da tabela é possível observar que o número de caminhões necessários em comparação ao artigo Rodrigues & Santos (2018b) aumentou. Este aumento ocorre pois as combinações são submetidas a uma verificação que não permite que as viagens cheguem fora do intervalo permitido para entrega. Porém, independente do valor ser maior que no modelo inicial, o número de caminhões é reduzido cerca de 65% em relação ao resultado encontrado no modelo de Rodrigues & Santos (2018b) e 80% em relação ao conjunto inicial de viagens.

Os custos reduzidos das colunas que foram inseridas no modelo decresceram a cada iteração, chegando na última iteração com valor próximo de 0. Nesse ponto, a

Tabela 4.2: Número de caminhões necessários.

ID	Nº de caminhões necessários			
	Valores Iniciais	Rodrigues & Santos (2018b)	Rodrigues & Santos (2018a)	Modelo Proposto
1	15	7	2	3
2	31	15	4	5
3	47	23	6	8
4	62	31	7	9
5	76	37	10	13
6	94	44	11	16
7	124	55	15	21

heurística não encontra mais colunas interessantes para reduzir o custo da solução. Esse comportamento pode ser observado nos gráficos representados nas figuras 4.2 e 4.3, em que temos o custo reduzido em relação à Função Objetivo das instâncias 3 e 7 obtidas em cada iteração do método.

Vale lembrar que o subproblema foi resolvido de forma heurística, então o fato de não haver mais colunas de custo reduzido negativo não significa que não existam tais colunas. Deve-se ainda desenvolver um método exato que não seja tão caro computacionalmente.

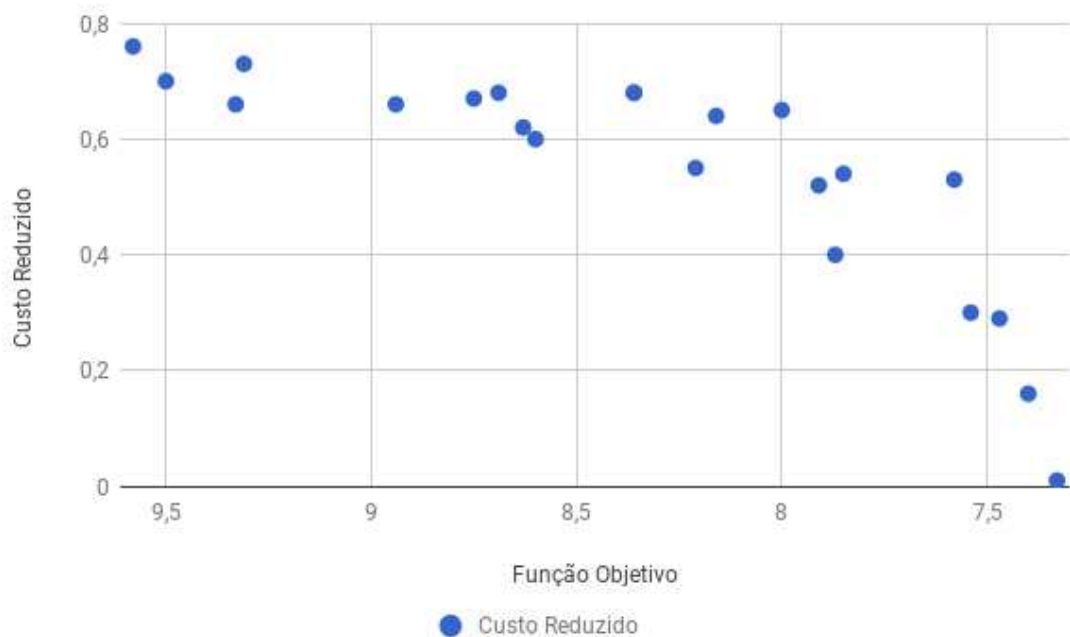


Figura 4.2: Função Objetivo X Custo Reduzido da instância 3.

4.6 Conclusão

Este trabalho apresenta uma nova heurística para o modelo do artigo Rodrigues & Santos (2018b). A heurística consegue encontrar o mesmo valor de solução encon-

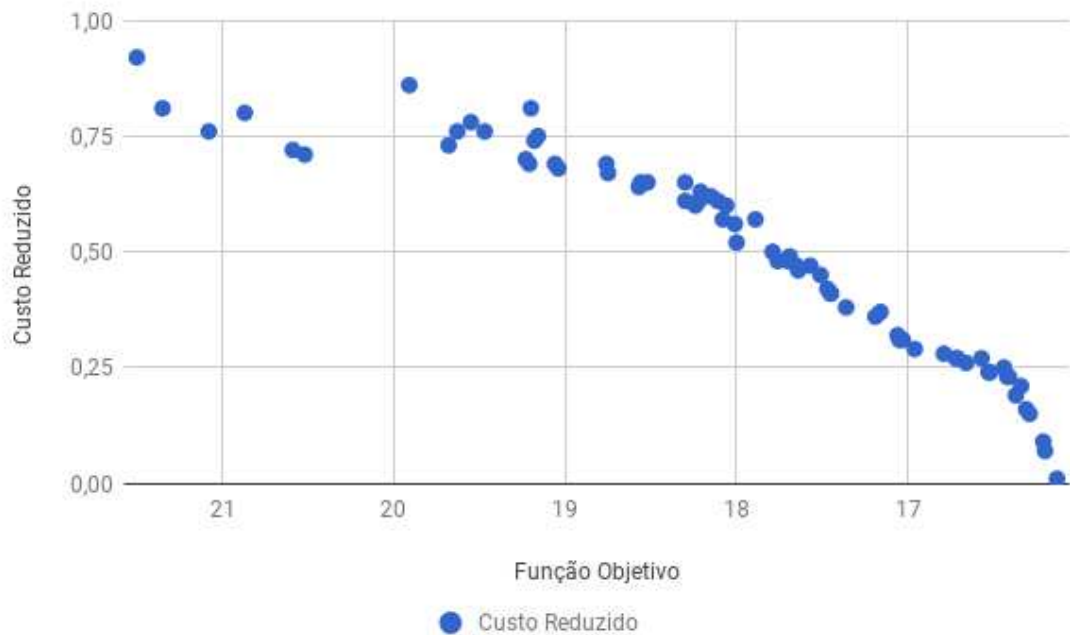


Figura 4.3: Função Objetivo X Custo Reduzido da instância 7.

trado por meio do método exato, porém, o tempo computacional é bem inferior. Dessa forma, a heurística proposta se torna a melhor abordagem para o modelo.

O artigo também apresenta uma nova variação do modelo do artigo [Rodrigues & Santos \(2018a\)](#), que considera apenas as rotas em que as viagens respeitem os intervalos determinados para entrega e não ultrapasse o tempo limite de cada rota. Por meio dessa variação foi reduzido cerca de 65% o número de caminhões em comparação ao resultado obtido no artigo [Rodrigues & Santos \(2018b\)](#) e 80% de redução em relação ao número original de caminhões das instâncias.

A minimização de caminhões para realizar viagens de exportação e importação contribui para redução de emissão de gases poluentes, congestionamentos em portos e cidades e custos operacionais para manutenção dos condutores e caminhões. O cumprimento das datas de entrega permite que os produtos não tenham perda na qualidade e que os caminhões cheguem nos horários estipulados evitando atrasos nos portos, que contribui para redução de multas por atraso dos navios.

Pretende-se como trabalhos futuros acrescentar na modelagem novas restrições com intuito de torná-la mais próxima do cenário de exportação e importação brasileiro. As novas restrições seriam em relação à capacidade dos caminhões e o tipo de carga, que são restrições importantes e que ainda não foram abordadas na modelagem. Além disso, encontrar formas mais eficientes de se resolver o subproblema

da variação proposta, que por enquanto, embora com bons resultados, é resolvida apenas heurísticamente.

Capítulo 5

Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros

A falta de planejamento no transporte rodoviário acarreta no aumento de viagens que são realizados sem cargas. Essas viagens são encontradas em viagens de exportação, importação e entre cidades, e contribuem para um índice maior de caminhões trafegando sem cargas, gerando congestionamentos e atrasos nas entregas. O compartilhamento de viagens foi adotado nessa dissertação para minimizar o número de caminhões trafegando sem cargas e o atraso em entregas. Essa dissertação propôs dois modelos matemáticos.

O primeiro modelo consiste em minimizar o número de caminhões que trafegam sem carga, agrupando viagens que antes eram realizadas por veículos diferentes. Essas viagens combinadas eram submetidas às restrições que incluem tempo de descanso e período de folga aos condutores e restrições de janelas de tempo que incluem o tempo de espera (quando as viagens chegam após o fechamento ou antes da abertura dos portos e estabelecimentos). Para solucionar o problema foram implementados três métodos de solução: MILP (método exato), a heurística 1 e a heurística 2. O método exato conseguiu encontrar o valor ótimo, porém o tempo computacional não tornou o método viável para solucionar este problema. A heurística 1 conseguiu resolver o modelo em um tempo computacional muito pequeno, mas não conseguiu encontrar o valor ótimo. A heurística 2 foi o método mais eficaz, conseguindo atingir o valor ótimo em um tempo computacional aceitável para todas as instâncias utilizadas.

O segundo modelo tem como parâmetro de entrada as viagens combinadas pelo primeiro modelo. O objetivo do modelo é alocar as combinações ao menor número possível de motoristas. Inicialmente, foram impostas restrições de jornada

de trabalho, incluindo período de descanso a cada execução de viagem e restrição que define um tempo limite para executar um conjunto de viagens combinadas. Por fim, foi incluída a restrição que impõe prazos de entrega. Cada combinação possui um limite superior e inferior que define o intervalo em que essa combinação pode ser realizada. Para solução deste modelo foi utilizado o método de geração de colunas, em que o subproblema era solucionado por uma heurística gulosa que adicionava combinações com os valores duais maiores no modelo. O modelo conseguiu reduzir cerca de 65% o número de caminhões em relação aos resultados obtidos no artigo [Rodrigues & Santos \(2018b\)](#) e 80% de redução em relação aos valores originais das instâncias utilizadas. O modelo consegue gerar sequências de viagens para cada motorista.

Essa dissertação contribui para redução do número de caminhões trafegando nas rodovias brasileiras; conseqüentemente, reduz também o número de caminhões trafegando sem carga. Os modelos propostos agrupam viagens e garante que as viagens de exportação, importação e entre cidades tenha viagens de retorno e, quando não é possível esse retorno, que o deslocamento até a próxima viagem seja minimizado. Dessa forma, conseguimos reduzir emissões de gases poluentes na atmosfera, custos operacionais com motoristas e caminhões, e congestionamentos nas cidades e portos.

O cumprimento nos prazos da entregas contribui para preservação da qualidade do produto que está sendo transportado e contribui indiretamente na minimização das multas de atrasos dos navios, que extrapolam o tempo de *free-time* devido aos congestionamentos presentes nos portos e a falta de planejamento dos exportadores e importadores.

5.1 Trabalhos Futuros

A dissertação apresenta um modelo que ainda não retrata todas as características do cenário brasileiro de exportação e importação por inteiro. Alguns aspectos devem ser levados em consideração para que o modelo seja uma ferramenta eficaz para a redução de caminhões trafegando sem carga.

Pretende-se, como trabalhos futuros, acrescentar na modelagem novas restrições. Essas novas restrições incluem tipos de veículos, porque algumas cargas só podem ser transportadas por tipos específicos de veículo. Restrições sobre a capacidade dos veículos, em que as viagens de retorno não sejam suficientes para utilizar a capacidade máxima do caminhão, ou às vezes não suporta a quantidade necessária

a ser transportada. Por fim, restrições sobre o tipo de carga, pois dependendo da natureza da carga o caminhão fica inviável para transportar algum produto mais sensível logo após ser utilizado para transporte de outra carga.

Referências Bibliográficas

- Audy, J.-F.; D'Amours, S. & Rousseau, L.-M. (2011). Cost allocation in the establishment of a collaborative transportation agreement—an application in the furniture industry. *Journal of the Operational Research Society*, 62(6):960--970.
- Branco, J. E. H. & Caixeta Filho, J. V. (2008). Estimating freight demand for north-south railway: a brazilian case study. Em *10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation*, pp. 1--14. Citeseer.
- Caballini, C.; Paolucci, M.; Sacone, S. & Ursavas, E. (2017). Towards the physical internet paradigm: A model for transportation planning in complex road networks with empty return optimization. Em *International Conference on Computational Logistics*, pp. 452--467. Springer.
- Caballini, C.; Rebecchi, I. & Sacone, S. (2015). Combining multiple trips in a port environment for empty movements minimization. *Transportation Research Procedia*, 10:694--703.
- Cabral Ribeiro, P. C.; Cosendey Fraga, N. & Torres Clarkson, C. (2017). Gestão de portos brasileiros e do brics: uma análise comparativa sobre seus problemas logísticos e a resolução por meio da tecnologia de informação. *Exacta*, 15(2):335--352.
- Caixeta Filho, J. V. (2010). Logística para a agricultura brasileira. *Revista Brasileira de Comércio Exterior*, 103:18--30.
- CNT (2015). Estudo da cnt aponta que infraestrutura ruim aumenta custo do transporte de soja e milho. Disponível em: http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Pesquisa%202015/pesquisasafra_resumo_atualizado.pdf. Acesso em: 11 de maio de 2018.
- da Costa Simões, D.; Caixeta-Filho, J. V. & Palekar, U. S. (2018). Fertilizer distribution flows and logistic costs in brazil: changes and benefits arising from

- investments in port terminals. *International Food and Agribusiness Management Review*, 21(3):407--422.
- dos Santos Lopes, H.; da Silva Lima, R.; Leal, F. & de Carvalho Nelson, A. (2017). Scenario analysis of brazilian soybean exports via discrete event simulation applied to soybean transportation: The case of mato grosso state. *Research in Transportation Business & Management*, 25:66--75.
- Gavish, B. & Schweitzer, P. (1974). An algorithm for combining truck trips. *Transportation Science*, 8:13--23.
- Gendreau, M. & Potvin, J.-Y. (2010). *Handbook of metaheuristics*. Springer.
- Islam, S. (2017a). Empty truck trips problem at container terminals: A review of causes, benefits, constraints and solution approaches. *Business Process Management Journal*, 23(2):248--274.
- Islam, S. (2017b). Simulation of truck arrival process at a seaport: evaluating truck-sharing benefits for empty trips reduction. *International Journal of Logistics Research and Applications*, pp. 1--19.
- Özener, O. Ö. & Ergun, Ö. (2008). Allocating costs in a collaborative transportation procurement network. *Transportation Science*, 42(2):146--165.
- Rey, P. A.; Muñoz, J. A. & Weintraub, A. (2009). A column generation model for truck routing in the chilean forest industry. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 47:215--221.
- Rix, G.; Rousseau, L.-M. & Pesant, G. (2015). A column generation algorithm for tactical timber transportation planning. *Journal of the Operational Research Society*, 66:278--287.
- Rodrigues, B. d. C. & Santos, A. G. (2018a). Alocação de motoristas para um conjunto de viagens utilizando heurística. Em *50^o Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.
- Rodrigues, B. d. C. & Santos, A. G. (2018b). Reducing empty truck trips in long distance network by combining trips. Em *Proceedings of the 20th International Conference on Enterprise Information Systems*, pp. 319--327. SCITEPRESS-Science and Technology Publications, Lda.

- Schulte, F.; González, R. G. & Voß, S. (2015). Reducing port-related truck emissions: coordinated truck appointments to reduce empty truck trips. Em *International Conference on Computational Logistics*, pp. 495--509, The Netherlands. Springer.
- Turkensteen, M. & Hasle, G. (2017). Combining pickups and deliveries in vehicle routing—an assessment of carbon emission effects. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80:117--132.