



Ana Raquel Fernandes

**Otimização do dimensionamento de frota alugada para
distribuição urbana em uma empresa do setor alimentício**

Dissertação de Mestrado (Opção Profissional)

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Logística do Departamento de
Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rafael Martinelli Pinto
Co-Orientador: Prof. Igor Tona Peres

Rio de Janeiro,
agosto de 2024



Ana Raquel Fernandes

**Otimização do dimensionamento de frota alugada para
distribuição urbana em uma empresa do setor alimentício**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Logística da PUC-Rio. Aprovada pela
Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Rafael Martinelli Pinto
Orientador
Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Igor Tona Peres
Co-orientador
Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Profa. Luciana de Souza Pessoa
Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Orivalde Soares da Silva Júnior
IME

Rio de Janeiro, 22 de agosto de 2024

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Ana Raquel Fernandes

Graduada em Engenharia Química no Centro Universitário FEI em 2011, pós-graduada em Gestão Industrial pela Fundação Vanzolini em 2015, pós-graduada no programa *Graduate Certificate in Logistics and Supply Chain* (GCLOG) pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) em 2024. É Especialista de Logística em empresa alimentícia de grande porte, com atuação em planejamento integrado, projetos de Excelência Operacional e controle financeiro e operacional.

Ficha Catalográfica

Fernandes, Ana Raquel

Otimização do dimensionamento de frota alugada para distribuição urbana em uma empresa do setor alimentício / Ana Raquel Fernandes ; orientador: Rafael Martinelli Pinto ; co-orientador: Igor Tona Peres. – 2024.

33 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2024.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Problema de dimensionamento de frota. 3. Programação inteira. 4. Distribuição urbana. I. Martinelli Pinto, Rafael. II. Peres, Igor Tona. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado e me dado oportunidades para seguir meus sonhos.

Aos meus familiares, minha mãe Roseli, meu pai Vanderlei, minha irmã Ana Carolina, por serem a origem dos meus valores, caráter e integridade, por terem sempre me incentivado a estudar, dar o meu melhor e buscar meu caminho e minha felicidade.

Aos meus amigos Bruno, Gabriela e Melissa, por despertarem o melhor de mim, e por terem ficado sempre ao meu lado, me ajudando a encontrar o equilíbrio. À minha amiga Maria Rafaela que me ensina todos os dias como ser uma pessoa melhor, mais positiva e acreditar que tudo tem um propósito. Ao meu orientador do projeto do MIT, professor e amigo David, por me ajudar em momentos difíceis, me guiar e acreditar em mim e no meu futuro.

Também agradeço à PUC-Rio por proporcionar essa oportunidade de desenvolvimento e abertura de novos caminhos. Agradeço a todos os professores do departamento, principalmente aos meus orientadores Rafael e Igor, por todos os ensinamentos e paciência durante a execução desse trabalho.

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

Resumo

Fernandes, Ana Raquel; Martinelli Pinto, Rafael; Peres, Igor Tona.
Otimização do dimensionamento de frota alugada para distribuição urbana em uma empresa do setor alimentício. Rio de Janeiro, 2024. 33p.
Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O transporte de carga é processo fundamental das empresas e garante a continuidade da cadeia de suprimentos, porém é também a maior fonte de custos, representando cerca de 60% dos custos logísticos. Dada essa representatividade, ineficiências do modal rodoviário e busca por redução de emissões, a pressão por aumento de eficiência e redução de custos é constante nas empresas brasileiras. Em empresas de alimentos, há também a necessidade do controle de lead-times e nível de serviço a fim de não comprometer a qualidade do produto. Desta forma, esse trabalho busca contribuir para redução de custos de frete por meio de otimização do dimensionamento de frota para distribuição de produto acabado, mesclando entre frota alugada e terceira, considerando diferentes perfis, custos e eficiências. Para isso, um estudo de caso foi realizado em uma empresa de alimentos, cuja fábrica localizada na cidade do Rio de Janeiro atende clientes localizados em todo o estado, os mesmos segregados por seis regiões. A empresa em questão possui contrato de aluguel de veículos e de cessão de mão de obra, além de valor tabelado para frete terceiro. Utilizando o suplemento OpenSolver no MS Excel, foi criada uma ferramenta para otimização visando minimizar o custo, considerando a demanda semanal para cada região do estado, capacidade dos veículos, custos de aluguel, mão de obra e frota terceira. Foram analisados diferentes cenários, com restrições de perfis maiores na capital, e de disponibilidade geral de veículos contratados. Como resultado, há a oportunidade de redução entre 15 e 53% do custo de frete sem considerar restrições de perfil por regiões, apenas a possibilidade de revisão da frota contratada. Já considerando também a restrição de perfis na capital, há a oportunidade de redução entre 3 a 9% do custo total de frete.

Palavras-chave

Problema de dimensionamento de frota; Programação Inteira; Distribuição Urbana.

Abstract

Fernandes, Ana Raquel; Martinelli Pinto, Rafael (Advisor); Peres, Igor Tona(Co-advisor). **Optimization of Rental Fleet Sizing for Urban Distribution in a Food Industry Company.** Rio de Janeiro, 2024. 33p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Freight transportation is a fundamental process for companies and ensures the continuity of the supply chain, but it is also the largest source of costs, representing about 60% of logistics costs. Given this significance, inefficiencies in the road transport mode, and the pursuit of emission reductions, the pressure to increase efficiency and reduce costs is constant in Brazilian companies. In food companies, there is also a need to control lead times and service levels to avoid compromising product quality. Thus, this work aims to contribute to freight cost reduction through the optimization of fleet sizing for the distribution of finished products, mixing between rented and third-party fleets, and considering different types of vehicles, costs, and efficiencies. For this purpose, a case study was conducted in a food company, whose factory in Rio de Janeiro serves customers throughout the state, segmented into 6 regions. The company in question has vehicle rental contracts, labor outsourcing agreements, and fixed rates for third-party freight. Using the OpenSolver add-in in MS Excel, a tool was created for optimization aiming to minimize cost, considering weekly demand for each region of the state, vehicle capacities, rental costs, labor, and third-party fleet. Different scenarios were analyzed, with higher profile constraints in the capital and general availability of contracted vehicles. As a result, there is an opportunity to reduce freight costs by 15 to 53% without considering regional profile constraints, just by reviewing the contracted fleet. When considering the constraints related to types of vehicles in certain areas, there is an opportunity to reduce total freight costs by 3 to 9%.

Keywords

Fleet sizing problem; Integer Programming; Urban Distribution.

Sumário

1. Introdução	10
1.1. Objetivos	12
1.2. Estrutura	12
2. Referencial Teórico	13
2.1. Otimização, Programação Linear e Programação Inteira	13
2.1.1. Solução de problema de programação inteira	14
2.2. OpenSolver	15
2.3. Problema de dimensionamento e composição de frota	17
3. Metodologia	18
4. Estudo de Caso	20
4.1. Definição do Modelo	20
4.2. Definição do Problema	23
4.2.1. Cenário 1 - Sem restrições de quantidade	25
4.2.2. Cenário 2 – Restrições de quantidades atuais	26
4.2.3. Cenário 3 – Restrição de perfil para capital	26
4.2.4. Cenário 4 – Restrição de quantidades atuais e Restrição de perfil para capital	27
5. Conclusões	29
6. Referências Bibliográficas	31

Lista de Figuras

Figura 1 - Suplemento OpenSolver na barra de tarefas do MS Excel	16
Figura 2 - Caixa de diálogo para definição do modelo no OpenSolver	16
Figura 3 - Etapas da pesquisa	18
Figura 4 - Segregação de Rotas no estado do Rio de Janeiro	23
Figura 5 - Volumes transportados semanalmente em toneladas, por Rota	24

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dados operacionais e financeiros da Frota Alugada	24
Tabela 2 - Cenário 1 - Quantidade frota alugada	25
Tabela 3 - Cenário 2 - Quantidade frota alugada	26
Tabela 4 - Cenário 3 - Quantidade frota alugada	27
Tabela 5 - Cenário 4 - Quantidade frota alugada	27
Tabela 6 - Resultados por Cenário e Baseline Atual	28

1

Introdução

O transporte de carga é processo fundamental nas empresas, pois, como processo meio, garante a continuidade da cadeia de suprimentos movimentando tanto insumos quanto produtos para todos os setores (CNT, 2021). Anderson et al. (2005) reforçam razões pelas quais se torna importante o estudo de transportes de carga e logística urbana, dentre elas o impacto de um transporte eficiente na competitividade das empresas, o efeito dos custos de transportes nos custos de *commodities* consumidas em uma determinada região, impacto do custo total de logística na economia, e o efeito ambiental, como emissões de CO₂, poluições sonoras etc.

De acordo com a Confederação Nacional de Transportes – (CNT, 2021), o transporte rodoviário é o mais utilizado no Brasil, sendo responsável por 64,7% da matriz de cargas do país, de forma não isolada dos outros modais, ou seja, pode atuar tanto no elemento alimentador de cargas para modais mais pesados como ferroviário e aquaviário, quanto no *last mile* para o consumidor final.

Segundo Equipe TOTVS (2024), é incontestável a importância do modal rodoviário no Brasil, devido à flexibilidade de horários de entregas, compatibilidade com outros modais, acessibilidade a áreas mais remotas, menos burocracias, facilidade de rastreamento, adaptação aos diferentes tamanhos de cargas, entre outros motivos. Por outro lado, não está isento dos desafios como dependência da infraestrutura brasileira, roubos de carga, congestionamentos, manutenções etc.

Dos Santos Macedo et al. (2023) afirmam que esses desafios e as ineficiências desse modal de transporte impactam diretamente no encarecimento dos produtos, bem como no resultado operacional das empresas. Adicionalmente, segundo o CNT (2022), a má qualidade e a pouca disponibilidade das rodovias brasileiras impactam diretamente os custos de manutenção e consumo de combustível, estimando aumento médio de 30,9% no custo operacional das empresas embarcadoras.

Dada a representatividade dos custos de transportes no custo logístico total e a ineficiência do modal rodoviário, a busca pelo cenário ótimo com minimização de custos se torna crucial para as empresas se manterem competitivas. Estima-se que o transporte de carga nas grandes empresas brasileiras represente cerca de 60% do custo total de logística, e o valor do frete *spot* gire em torno de 25% a mais do frete contratado (BARROS, 2023). Além disso, de acordo com Hoff et. al (2010), as mudanças climáticas e questões ambientais se tornaram fatores relevantes que impulsionam a busca por aumento de eficiência em transportes e consequente redução de emissão de CO₂.

Otimização de transportes e suas variações formam, portanto, uma sólida linha de pesquisa com o clássico Problema de Roteamento de Veículos (*Vehicle Routing Problem* – VRP), problema de frota heterogênea, roteamento com janela de tempo, dimensionamento de frota, entre outros temas relacionados (SARANGI et al., 2023).

As empresas de alimentos brasileiras sofrem uma pressão constante não apenas no controle de custos e redução de emissões, mas também no controle de *lead-time* de transportes e nível de serviço, uma vez que, segundo Acevedo-Chedid et al. (2023), o tempo em transporte e o manuseio dos produtos pode impactar a qualidade ou até gerar perdas.

A utilização de frota alugada fixa garante a disponibilidade de veículos e permite o controle direto de *lead-times* pela empresa embarcadora. Por outro lado, se não for bem dimensionada, pode gerar custos com ociosidade ou impacto no nível de serviço caso a frota contratada não atenda a demanda.

As alavancas para redução de custo e aumento da eficiência de transportes que serão abordadas nessa pesquisa são referentes ao dimensionamento da frota utilizada para distribuição de produto acabado de uma empresa de alimentos, bem como a decisão entre frota alugada e frete contratado de terceiros (*spot*).

Essa dissertação consiste em um estudo de caso no qual o objeto refere-se a uma empresa de alimentos, localizada na cidade do Rio de Janeiro, RJ. A empresa faz uso de software de roteirização, porém a decisão referente à frota utilizada é realizada por meio de análises pontuais com restrições locais, sem avaliar uma solução ótima. Atualmente o transporte de distribuição é realizado de duas formas, com frota alugada heterogênea e com transportadoras *spot*. De forma geral, há uma

relevante concentração de vendas nas últimas semanas do mês, fazendo com que haja ociosidade na frota alugada no início do mês, e aumento de *spot* no fim do mês.

1.1 Objetivos

O objetivo principal dessa pesquisa é responder à seguinte questão:

- Como o dimensionamento de frota fixa alugada pode aumentar a eficiência em transportes *last mile* e, consequentemente, reduzir os custos de transportes em um centro de distribuição de uma empresa alimentícia?

Como objetivos secundários, ou seja, base para o alcance do objetivo principal, são divididos em:

- Criar ferramenta para otimização da frota fixa alugada, que possa ser utilizada a nível estratégico para revisão de composição de frota;
- Propor cenários para análise;
- Validar potencial de ganhos e identificar alavancas para cumprimento da solução proposta.

1.2 Estrutura

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta uma revisão de literatura referente a otimização e problema de dimensionamento de frota heterogênea. O capítulo 3 apresenta a metodologia adotada nesse trabalho, bem como a formulação do problema. O capítulo 4 mostra os resultados e as discussões e o capítulo 5 apresenta a conclusão e sugestão para trabalhos futuros.

2

Referencial Teórico

Nessa seção serão apresentados os conceitos teóricos referentes a programação linear e dimensionamento de frota heterogênea. Além disso, serão apresentadas pesquisas com aplicação desses conceitos a fim de resolver problemas de composição e dimensionamento de frota heterogênea.

2.1

Otimização, Programação Linear e Programação Inteira

Otimização é o ato de obter o melhor resultado dadas certas circunstâncias, buscando, portanto, maximizar os benefícios ou minimizar os esforços. Ou seja, determinar as condições que maximizem ou minimizem o valor de uma Função Objetivo. Os métodos de otimização e tomada de decisão buscando soluções ótimas são estudados dentro da Pesquisa Operacional (RAO, 2019).

Segundo Rao (2019), um problema de otimização pode ser descrito conforme equação (1) a seguir.

$$\begin{aligned} \text{Encontrar } \mathbf{X} = & \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \text{ que minimize } f(\mathbf{X}) \\ \text{Sujeito às restrições} \\ g_j(\mathbf{X}) \leq 0, & \quad j = 1, 2, \dots, m \\ l_j(\mathbf{X}) = 0, & \quad j = 1, 2, \dots, p \end{aligned} \tag{1}$$

Onde \mathbf{X} é um vetor de dimensão n , $f(\mathbf{X})$ é a função objetivo, $g_j(\mathbf{X})$ é uma restrição de desigualdade (inequação) e $l_j(\mathbf{X})$, uma restrição de igualdade (equação).

Quando a função objetivo e as restrições aparecem como funções lineares das variáveis de decisão, o método aplicável para a solução do problema é a programação linear (PL) e pode ser descrita conforme equação (2) a seguir (RAO, 2019).

$$\begin{aligned}
 & \underset{\text{s. a:}}{\text{max/min}} \quad f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\
 & \quad a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \geq b_1 \\
 & \quad a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \geq b_2 \\
 & \quad \vdots \\
 & \quad a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \geq b_m \\
 & \quad x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

Onde c_j , b_j e a_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$) são constantes e x_j são as variáveis de decisão.

Na programação linear, as variáveis podem assumir qualquer valor real. Porém, em muitos casos reais as variáveis não podem assumir valores fracionados, e o arredondamento simples podem facilmente violar alguma restrição, impactar alguma outra variável, ou até resultar em uma solução distante da ótima. Portanto, para esses casos, o modelo e solução são tratados como problema de programação inteira (RAO, 2019)

A programação inteira (PI) é uma variação da programação linear, onde todas as variáveis são inteiras. Quando apenas parte das variáveis são inteiras, trata-se da programação inteira mista (WOLSEY e NEMHAUSER, 2020). Analogamente à programação linear, a programação inteira pode ser representada conforme equação (3) a seguir.

$$\begin{aligned}
 & \underset{\text{s. a:}}{\text{max/min}} \quad f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\
 & \quad a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \geq b_1 \\
 & \quad a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \geq b_2 \\
 & \quad \vdots \\
 & \quad a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \geq b_m \\
 & \quad x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \\
 & \quad x_1, x_2, \dots, x_n \in \mathbb{Z}
 \end{aligned} \tag{3}$$

2.1.1 Solução de problema de programação inteira

De acordo com Hillier e Lieberman (2015), um problema de programação inteira pode parecer simples de ser resolvido, pois teria uma quantidade finita e menores de soluções do que um problema de programação linear. Porém, os problemas de programação inteira na verdade são mais complexos, pois a quantidade de soluções finitas pode ser extremamente grande. Além disso, removendo as soluções possíveis (as não inteiras), o problema fica ainda mais restrito e mais difícil de se resolver.

O método *Branch and Bound* criado por Land e Doing (1960) e aprimorado por Dakin (1965) é bastante efetivo para solução de problemas de programação inteira (RAO, 2019). Consiste basicamente em dividir o problema em soluções menores em busca de uma solução ótima (WOLSEY e NEMHAUSER, 2020).

Segundo Rao (2019), no *Branch and Bound* o problema de programação inteira não é diretamente resolvido. Primeiramente é resolvido como uma programação linear, obtido pela relaxação das restrições inteiras. A partir dos valores não inteiros encontrados para ao menos uma variável, são encontrados mais dois subproblemas (*branching*), um assumindo um valor inteiro superior e outro inferior para a variável em questão. Esses dois subproblemas são resolvidos novamente pela relaxação linear, e divididos em mais subproblemas, até que a divisão é interrompida quando o problema é infactível (poda por inviabilidade), ou quando a solução é inteira (poda por otimalidade), ou quando a solução é pior do que a melhor solução atual (poda por limite) (HILLIER e LIEBERMAN, 2015).

Já o *Branch-and-Cut* combina o método de *Branch-and-Bound* com aplicação de algoritmos de plano de corte. Em resumo, o que é feito é encontrar planos de corte válidos e verificar se a solução da relaxação linear atende à essas inequações. Se sim, as restrições são adicionadas ao subproblema, e resolvidos novamente. Dessa forma, o modelo se torna mais eficiente pois aproxima as relaxações a serem testadas da região viável (WOLSEY e NEMHAUSER, 2020).

2.2 OpenSolver

Embora o suplemento *Solver* nativo do MS Excel possibilite encontrar soluções para problemas de otimização, há uma limitação quanto ao tamanho do problema. OpenSolver foi desenvolvido como um suplemento gratuito para Microsoft Windows que utiliza o otimizador CBC (COIN-OR *Branch and Cut*) criado por COIN-OR (*Computational Infrastructure for Operations Research*), e possibilita a solução para modelos mais complexos de programação linear e programação inteira, apresentando performance mais rápida, com mais variáveis e com uma interface tão amigável quanto à do Solver (MASON, 2012).

Para o estudo em questão o *OpenSolver*, foi selecionado devido à sua capacidade de solucionar o modelo de programação inteira e à interface simples,

além de ser de fácil instalação e possuir interface com MS Excel. Análogo ao Solver, o suplemento *OpenSolver* é disponibilizado na aba “Dados”, conforme demonstrado na Figura 1. A interface do modelo conta com uma caixa de diálogo com campos para serem inseridos a função objetivo, as variáveis e as restrições, conforme Figura 2.

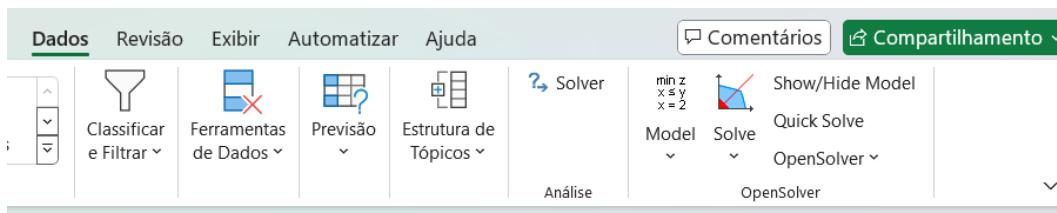


Figura 1 - Suplemento OpenSolver na barra de tarefas do MS Excel
Fonte: Elaborado pela Autora

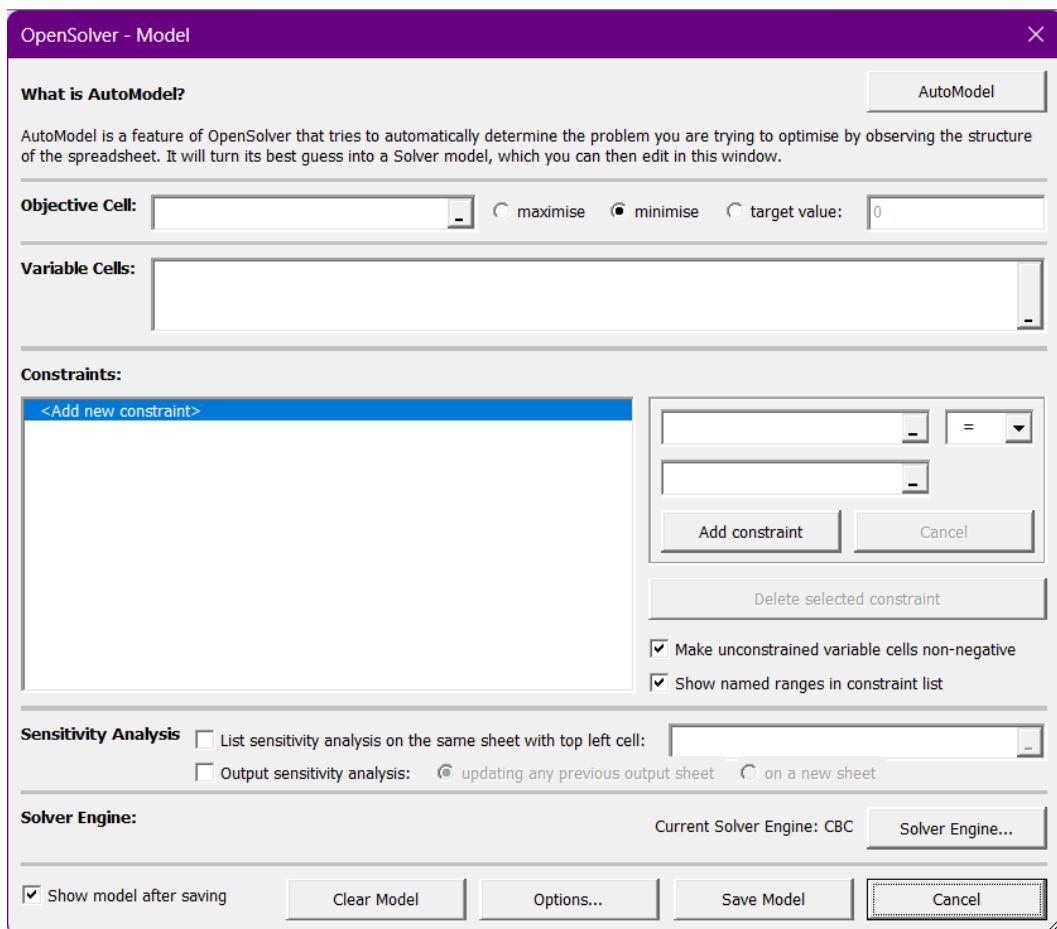


Figura 2 - Caixa de diálogo para definição do modelo no OpenSolver
Fonte: Elaborado pela Autora

2.3

Problema de dimensionamento e composição de frota

Segundo Baykasoglu et al. (2017), o problema de dimensionamento de frota pode ser definido como a otimização da quantidade de veículos na frota para atendimento da demanda, de forma a reduzir ociosidades e evitar altos custos fixos.

Já o problema de composição da frota é definido como o dimensionamento e definição dos perfis da frota, válido, portanto, em caso de frota heterogênea (HOFF et al., 2010). De acordo com Koç et al. (2016), a otimização de composição e dimensionamento de frota heterogênea é um desafio comum para as empresas, principalmente durante a decisão entre aquisição de veículos ou utilização de transporte terceirizado.

A importância de equilibrar oferta e demanda de maneira eficiente é ressaltada por Redmer (2015), que destaca a necessidade de uma frota versátil e intercambiável. Redmer argumenta que uma frota bem equilibrada não apenas atende às necessidades imediatas de transporte, mas também proporciona flexibilidade operacional, permitindo ajustes rápidos às mudanças de mercado e às variações na demanda.

Gould (1969) aborda o uso da programação linear para otimização da frota em um estudo de caso que analisou a demanda sazonal. Nesse estudo, o autor mostrou como a programação linear pode otimizar a alocação de recursos em resposta às flutuações sazonais, garantindo que a frota seja dimensionada para atender à demanda variável, considerando restrições de perfis para cada tipo de produto carregado.

Fabricio e Subramanian (2008) propõem um modelo de programação inteira para dimensionamento de frota de uma indústria de bebidas, determinando a quantidade de veículos próprios para cada unidade produtora. Nesse estudo, encontra-se uma redução média de 12% no custo total de frete, comparado ao cenário anterior.

Os trabalhos citados possuem objetivos similares ao estudo de caso em questão, porém sem considerar as particularidades operacionais por cada perfil (como por exemplo ocupação máxima ou quantidade de entregas máxima) ou por rota atendida (*drop-size* máximo, duração da rota, entre outras).

3 Metodologia

Conforme citado na seção anterior, essa pesquisa trata-se de um estudo de caso aplicado. Segundo Rashid et al. (2019), um estudo de caso consiste numa pesquisa detalhada e intensiva de um caso específico, a fim de obter um entendimento das complexidades e nuances envolvidas em um determinado assunto.

Rashid et al. (2019) propõem um *checklist* com 4 fases para a condução de um estudo de caso: fase de fundação, fase pré-campo, fase de campo e fase de relatório. Cumprindo as fases, essa pesquisa segue os passos descritos na Figura 3 e detalhados a seguir. A fase de fundação corresponde à etapa 1 (entendimento), onde deve ser feita a primeira reflexão sobre o problema e adotadas as premissas para a construção do modelo. Já a fase pré-campo corresponde à etapa 2 (construção do modelo e da ferramenta) e a fase de campo, à etapa 3 (coleta de dados) e 4 (análise dos dados). Por fim, a fase de reporte corresponde à etapa 5 (conclusões).



Figura 3 - Etapas da pesquisa
Fonte: Elaborado pela Autora

- I. Etapa 1 – Entendimento: o primeiro passo foi o entendimento detalhado do perfil de transporte do centro de distribuição estudado. Nessa etapa foram identificados o tamanho e perfil da frota atual, modelo de contratação da equipe de entrega, as principais rotas realizadas e seus agrupamentos (regiões), e principais restrições.
- II. Etapa 2 – Construção do modelo e da ferramenta: a ferramenta para otimização foi construída em MS Excel (*OpenSolver*) após definição da Função Objetivo e definidas as restrições. O modelo é descrito na seção 4.1.

- III. Etapa 3 – Coleta de dados: nessa etapa foram coletados os dados históricos de volume (últimos 3 meses), capacidade dos veículos, custos fixos e variáveis, restrições referentes à ocupação e quantidade de viagens por perfil, demanda semanal para cada região, e por fim, o custo real por tonelada do frete *spot*.
- IV. Etapa 4 – Análise dos dados: após construção da ferramenta e validadas as restrições, foram utilizados dados históricos de volume transportado dos últimos 3 meses e comparado com o perfil de frota utilizada na realidade, bem como os custos reais.
- V. Etapa 5 – Conclusões: Após análise dos cenários, foram comparados os custos com o baseline atual, e propostos próximos passos para viabilizar a implantação dos cenários mais viáveis.

4

Estudo de Caso

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos em cada uma das cinco etapas citadas anteriormente, bem como a definição do modelo e comparação entre o cenário de dimensionamento de frota ótima e o dimensionamento atual.

4.1

Definição do Modelo

No modelo construído para o dimensionamento da frota é utilizada a seguinte notação:

Índices

v Perfil de veículo alugado

j Regiões de atendimento

t Semana

Parâmetros

D_{jt} Demanda por região por semana

FC_{vt} Custos fixos do veículo alugado por mês

VC_v Custos variáveis do veículo alugado

F_j Custo de frete *spot* por tonelada por região

Cap_v Capacidade em toneladas dos veículos alugados

O_v Ocupação por veículo

p Produtividade máxima do veículo

m_v Quantidade de entregas máxima por perfil

P_j *Drop-Size* por região

n_j Tempo por viagem para a região em dias

d_j Distância percorrida por região por viagem

w Dias úteis

N_v Dias úteis na semana disponível para cada veículo alugado

Variáveis

S_{jt} Toneladas utilizando frete *spot* para região j

Q_v Quantidade de veículo alugado por perfil, no mês

Q_{vt} Quantidade de veículo alugado por perfil, na semana

T_{vjt} Viagens com veículo v para a região por semana

W_{vjt} Toneladas transportadas pelo veículo v para região j

E_{vjt} Entregas no veículo v para região j

O modelo proposto visa otimizar a quantidade de veículos alugados Q_v para atendimento da demanda D_{jt} , dado um grupo de perfis de veículos v , segregados por regiões de atendimento j , num período de t semanas com w dias úteis. Caso os veículos alugados não atendam à demanda semanal, o volume S_{jt} é destinado a frete *spot*.

Cada região atendida possui um tempo médio de viagem n_j por conta da distância d_j entre cada região e o centro de distribuição, e um *drop-size* médio P_j , devido ao perfil de clientes em cada região.

Os veículos alugados Q_v possuem capacidade Cap_v , ocupação máxima do veículo O_v , com produtividade p e quantidade de entregas máxima m_v . Esses veículos possuem custos fixos FC_{vt} , referentes aos valores de aluguel e mão de obra, e custos variáveis VC_v , referentes principalmente ao consumo de combustíveis pela distância d_j percorrida.

Já os veículos *spot* possuem custo F_j pelo volume em toneladas S_{jt} transportado.

O modelo matemático proposto para otimizar a frota alugada é demonstrado a seguir.

$$\text{Min } Z = \sum_v \sum_t FC_{vt} Q_v + \sum_v \sum_j \sum_t VC_v d_j T_{vjt} + \sum_j \sum_t F_j S_{jt} \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_v W_{vjt} + S_{jt} \geq D_{jt}, \forall j, t \quad (2)$$

$$W_{vjt} \leq O_v Cap_v T_{vjt}, \forall v, j, t \quad (3)$$

$$\sum_j n_j T_{vjt} \leq N_v p, \forall v, t \quad (4)$$

$$\sum_j n_j T_{vjt} \geq w Q_{vt}, \forall v, t \quad (5)$$

$$Q_v \geq Q_{vt}, \forall v, t \quad (6)$$

$$W_{vjt} \leq P_j E_{vjt}, \forall v, j, t \quad (7)$$

$$\sum_j E_{vjt} \geq (m_v w) Q_{vt}, \forall v, t \quad (8)$$

$$S_{jt}, W_{vjt} \geq 0, \forall v, j, t \quad (9)$$

$$T_{vjt} \in Z, \forall v, j, t \quad (10)$$

$$Q_v \in Z, \forall v \quad (11)$$

$$Q_{vt} \in Z, \forall v, t \quad (12)$$

$$E_{vjt} \in Z, \forall v, j, t \quad (13)$$

A função (1) do modelo acima citado representa a função objetivo, que visa minimizar os custos totais de transportes – custos fixos com aluguel e mão de obra, custos variáveis por quilômetro e custo de frete terceiro por tonelada. A restrição (2) representa a demanda atendida, sendo a soma entre o atendimento pela frota alugada e por frete spot. A restrição (3) garante que a demanda atendida pela frota alugada esteja dentro de sua capacidade. As restrições (4) e (5) garantem que a demanda semanal atendida esteja dentro da disponibilidade de veículos por semana. A restrição (6) garante que a quantidade de veículos alugados no período completo de t semanas seja considerada a maior entre as quantidades por semana. As restrições (7) e (8) garantem que a demanda atendida pela frota alugada por cada região estejam dentro do *drop-size* médio por região. Por fim, as restrições (9), (10), (11), (12) e (13) referem-se a restrições de natureza e não negatividade.

O modelo da ferramenta construída e utilizada nesse estudo pode ser encontrado no link:

[<https://drive.google.com/drive/folders/1aPJLvAIQRDpJ_CpzxBjZJl10FPfeEpI_?usp=sharing>](https://drive.google.com/drive/folders/1aPJLvAIQRDpJ_CpzxBjZJl10FPfeEpI_?usp=sharing)

4.2. Definição do Problema

Este estudo de caso é baseado em um dos centros de distribuição de uma empresa alimentícia, localizado na cidade do Rio de Janeiro. Esse centro de distribuição atende todo o estado do Rio de Janeiro, sendo as entregas em caixas ou paletes. Para a entrega *last mile*, essa unidade conta prioritariamente com utilização de frota fixa alugada com equipe de entrega terceirizada (motorista e ajudante de entrega), e com frete *spot* e por peso previamente acordado, caso a frota alugada não atenda ao volume necessário.

A partir dos dados de atendimento, foi realizada a quebra por regiões, de acordo com as rotas utilizadas. As regiões identificadas podem ser observadas na Figura 4.

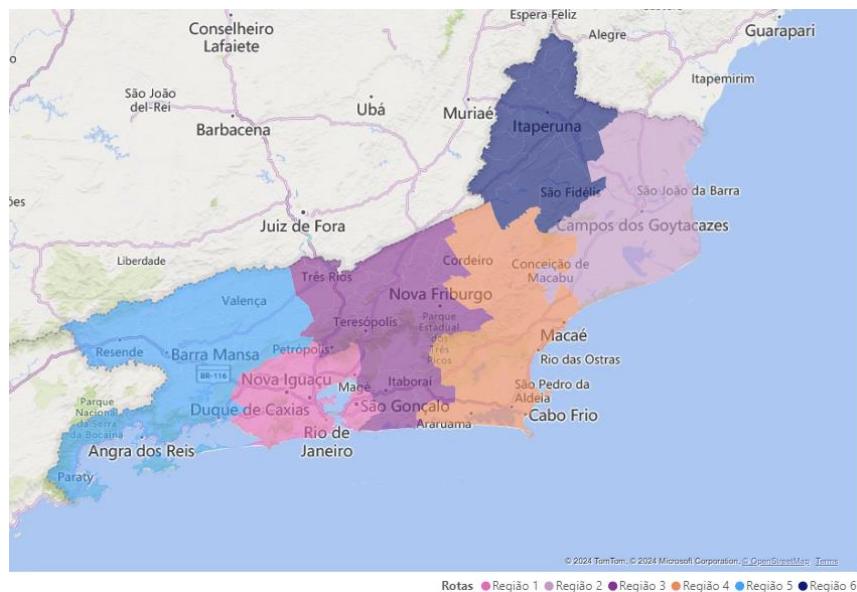


Figura 4 - Segregação de Regiões no estado do Rio de Janeiro
Fonte: Elaborado pela Autora

Atualmente a empresa em questão conta com veículos alugados para distribuição urbana, sendo os perfis e quantidades definidos em contrato. Cada perfil possui capacidade máxima em toneladas, custo fixo mensal, custo variável por quilômetro rodado, ocupação máxima e quantidade de entrega máxima por viagem. Esses dados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados operacionais e financeiros da Frota Alugada

Perfil	Quantidade	Capacidade (ton)	Custo Fixo mensal unitário	Custo variável por km	Ocupação máxima	Entregas/viagem
	Q_v	Cap_v	FC_{vt}	VC_v	O_v	m_v
(3/4)	46	4	R\$ 18,435.12	R\$ 0.99	65%	40
Toco	19	8	R\$ 19,409.93	R\$ 1.18	75%	10
Truck MB	4	13.5	R\$ 21,959.59	R\$ 1.18	85%	15
Truck VW	2	13.5	R\$ 20,688.87	R\$ 1.48	85%	15
VUC	35	2.5	R\$ 17,839.34	R\$ 0.59	70%	20

Fonte: Elaborado pela Autora

Para o estudo foram coletados os volumes de venda de doze semanas (três meses) para cada Região, conforme exposto na Figura 5.

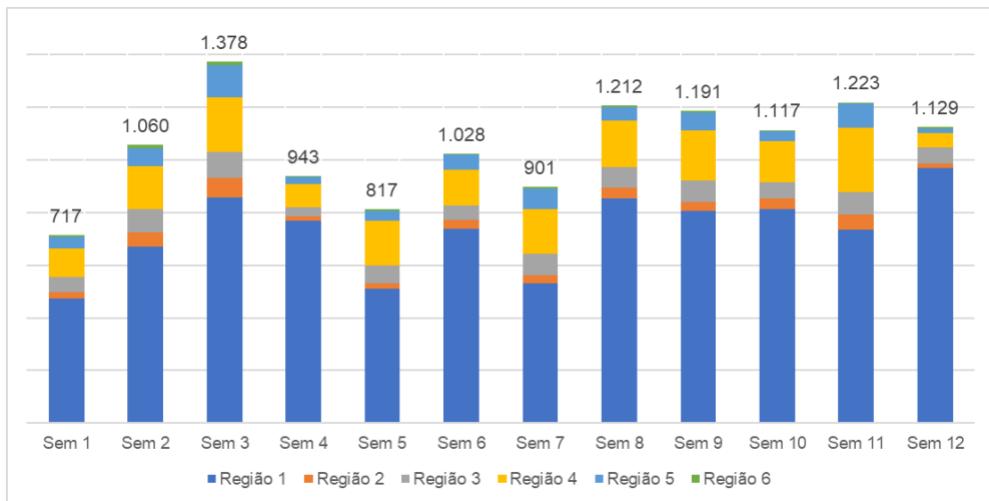


Figura 5 - Volumes transportados semanalmente em toneladas, por Região

Fonte: Elaborado pela Autora

Apesar da empresa em questão utilizar um *software* para roteirização no nível operacional, é considerada a disponibilidade diária de frota alugada informada pela equipe operacional, desconsiderando veículos em rota e em manutenção, e ditadas as prioridades sem análise quantitativa. Além disso, pode-se observar pela Figura 5 que há uma variação significativa de demanda entre as semanas, porém não há atualmente a decisão quantitativa entre manter a frota alugada ociosa em certo período para poder atender aos picos de demanda, ou reduzir a frota alugada e

utilizar o frete *spot* para atendimento dos picos de demanda. Faz-se, portanto, necessário um estudo no nível estratégico de dimensionamento de frota visando a identificação de oportunidades de redução de custos e aumento de eficiência, como renegociação de contrato de aluguel ou realocação da frota entre unidades.

Para o estudo com a aplicação do modelo, foram utilizados os dados de volume e de características da frota, e assim definidos quatro cenários, conforme descrito nas seções a seguir.

4.2.1.

Cenário 1 - Sem restrições de quantidade

O primeiro cenário consiste na aplicação do modelo sem restrições operacionais. Na prática, essa situação não é viável pois há outras restrições contempladas nos próximos cenários, porém essa primeira análise é necessária para entender o potencial total de redução de custos.

Nesse cenário nota-se a redução de 53% dos custos em relação ao baseline, reflexo de redistribuição de todo o volume para o perfil de menor custo da frota alugada.

Na Tabela 2 abaixo é demonstrada a diferença entre a quantidade de frota alugada proposta no modelo e a quantidade do baseline atual.

Tabela 2 - Cenário 1 - Quantidade frota alugada

Perfil	Quantidade	Qtde atual
(3/4)	0	46
TOCO	0	19
TRUCK MB	0	4
TRUCK VW	27	2
VUC	0	35

Fonte: Elaborado pela Autora

4.2.2.

Cenário 2 – Restrições de quantidades atuais

O segundo cenário consiste na aplicação do modelo restringindo as quantidades pela frota atual contratada, sem possibilidade de contratação de novos veículos. Esse cenário continua sendo operacionalmente inviável pois não restringe os perfis utilizados para atendimento da Capital (Região 1).

Nesse cenário nota-se a redução de 15% dos custos em relação ao baseline, aumentando o volume para frota alugada e utilizando menos veículos, ou seja, aumentando a produtividade da frota alugada. Isso mostra uma oportunidade de desmobilização de frota no cenário atual.

Na Tabela 3 abaixo é demonstrada a diferença entre a quantidade de frota alugada proposta no modelo e a quantidade do baseline atual.

Tabela 3 - Cenário 2 - Quantidade frota alugada

Perfil	Quantidade	Qtde atual
(3/4)	10	46
TOCO	18	19
TRUCK MB	4	4
TRUCK VW	2	2
VUC	0	35

Fonte: Elaborado pela Autora

4.2.3.

Cenário 3 – Restrição de perfil para capital

O terceiro cenário consiste na aplicação do modelo adicionando a restrição de perfis para a Capital, limitando o uso de Truck e Toco para região 1. Esse cenário é operacionalmente viável, porém ainda seria necessária uma revisão do contrato para adicionar ou desmobilizar veículos à frota atual.

Nesse cenário nota-se a redução de 9% dos custos em relação ao baseline, aumentando a quantidade do perfil com maior capacidade (Truck) e desmobilizando os perfis Toco e VUC.

Na Tabela 4 é demonstrada a diferença entre a quantidade de frota alugada proposta no modelo e a quantidade do baseline atual.

Tabela 4 - Cenário 3 - Quantidade frota alugada

Perfil	Quantidade	Qtde atual
(3/4)	33	46
TOCO	0	19
TRUCK MB	0	4
TRUCK VW	13	2
VUC	0	35

Fonte: Elaborado pela Autora

4.2.4.

Cenário 4 – Restrição de quantidades atuais e Restrição de perfil para capital

Por fim, o quarto cenário consiste na aplicação do modelo adicionando as duas restrições, tanto a de quantidades pela frota atual contratada, quanto a de perfis para a Capital, limitando o uso de Truck e Toco para região 1. Esse cenário é o mais viável, pois não requer contratação de veículos e considera a restrição operacional da Capital.

Ainda assim, nesse cenário nota-se a redução de 3% dos custos em relação ao baseline, desmobilizando os VUCs.

Na Tabela 5 é demonstrada a diferença entre a quantidade de frota alugada proposta no modelo e a quantidade do baseline atual.

Tabela 5 - Cenário 4 - Quantidade frota alugada

Perfil	Quantidade	Qtde atual
(3/4)	33	46
TOCO	11	19
TRUCK MB	4	4
TRUCK VW	2	2
VUC	0	35

Fonte: Elaborado pela Autora

Os resultados e comparativos entre os mesmos estão explícitos na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Resultados por Cenário e Baseline Atual

Cenário	Descrição	Valor total	Impacto	Volume Frota Alugada (ton)	%	Volume Frete Terceiro (ton)	%
	<i>Baseline</i>	R\$ 4.662.983,76		7.981.488	63%	4.734.189	37%
1	Cenário 1	R\$ 2.192.086,76	-53%	11.974.617	94%	741.061	6%
2	Cenário 1 + restrição de quantidades atuais	R\$ 3.950.367,27	-15%	9.906.350	78%	2.809.327	22%
3	Cenário 1 + restrição de perfil para capital	R\$ 4.241.480,26	-9%	9.445.170	74%	3.270.507	26%
4	Cenário 1 + restrição de quantidades atuais + restrição de perfil para capital	R\$ 4.502.399,24	-3%	9.236.054	73%	3.479.623	27%

Fonte: Elaborado pela Autora

5 Conclusões

Analizando os resultados consolidados, é possível observar potencial de redução de custo de frete com a utilização do modelo proposto em todos os cenários, mesmo no mais restrito. O Cenário 4 é o mais viável dentre os analisados, pois leva em conta todas as restrições operacionais, porém apresenta a menor redução de custo. Para viabilizar a captura dos ganhos dos demais cenários, seriam necessárias algumas ações a fim de flexibilizar ou eliminar as restrições consideradas.

Para restrição de quantidades atuais na frota, a ação recomendada para viabilizar o aumento de determinados perfis seria a renegociação dos contratos de aluguel, com proposta de revisão periódica da frota. Porém, deve ser analisada a viabilidade desse cenário, levando em consideração o possível aumento do valor do aluguel com o aumento da flexibilidade do contrato, comparado com a redução de custo de frete.

Já para a flexibilizar a restrição de perfis para a Capital, a ação depende de uma revisão do modelo de atendimento dos clientes. Por exemplo, clientes localizados em regiões onde apenas são permitidos perfis menores poderiam ser atendidos por canais indiretos, como distribuidores ou atacado. Essa ação envolveria outras áreas para revisão da estratégia de *go-to-market* e a comparação entre a redução do custo de frete e o impacto de margem de contribuição com essa mudança de atendimento.

De forma geral, a empresa analisada no estudo de caso pode implementar o uso da ferramenta de otimização construída a partir do modelo proposto para o planejamento de frota. Segundo Baykasoglu et al. (2019), o dimensionamento e composição da frota fazem parte idealmente do planejamento a nível estratégico para longo prazo, enquanto a alocação da frota, a nível tático para médio prazo. Traçando um paralelo com o estudo de caso em questão, o estudo da frota ótima para a empresa analisada pode ser realizado anualmente avaliando a demanda estimada no ciclo anual já existente de planejamento de 5 anos a fim de renegociar contratos de locação, tomar decisões de aquisições de veículos, entre outras ações

estratégicas. Além disso, a revisão pode também ser feita semestralmente, para buscar oportunidades de realocação de veículos entre unidades, desmobilização de perfis, entre outras ações táticas, ou até mesmo traçar ações operacionais relacionadas a melhoria de ocupação e utilização dos veículos alugados.

Para estudos futuros sugere-se utilizar a demanda aleatória ou o plano de vendas como entrada da ferramenta, já que a análise com dados passados apresentado nesse artigo apresenta oportunidades de redução de custo. Além disso, sugere-se também complementar o modelo proposto com o VRP (*Vehicle Routing Problem*), a fim de utilizar o modelo para planejamento a nível operacional no processo de roteirização, definindo exatamente qual perfil deve atender cada conjunto de clientes.

6

Referências Bibliográficas

ACEVEDO-CHEDID, Jaime et al. An optimization model for routing—location of vehicles with time windows and cross-docking structures in a sustainable supply chain of perishable foods. **Operations Management Research**, p. 1-24, 2023.

ALLEN, Julian et al. A framework for considering policies to encourage sustainable urban freight traffic and goods/service flows. **Transport Studies Group, University of Westminster, London**, 2000.

ANDERSON, Stephen; ALLEN, Julian; BROWNE, Michael. Urban logistics—how can it meet policy makers' sustainability objectives?. **Journal of transport geography**, v. 13, n. 1, p. 71-81, 2005.

BALDACCI, Roberto; BATTARRA, Maria; VIGO, Daniele. Valid inequalities for the fleet size and mix vehicle routing problem with fixed costs. **Networks: An International Journal**, v. 54, n. 4, p. 178-189, 2009.

BALDACCI, Roberto; BATTARRA, Maria; VIGO, Daniele. Routing a heterogeneous fleet of vehicles. **The vehicle routing problem: latest advances and new challenges**, p. 3-27, 2008.

BARROS, Monica. Como controlar os gastos com transporte e a importância do benchmarking. **ILOS Insights**, 2023. Disponível em: <<https://ilos.com.br/como-controlar-os-gastos-com-transporte-e-a-importancia-do-benchmarking/>>. Acesso em: 10 de jan. de 2024.

BAYKASOĞLU, Adil et al. A review of fleet planning problems in single and multimodal transportation systems. **Transportmetrica A: Transport Science**, v. 15, n. 2, p. 631-697, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa Perfil Empresarial Transporte Rodoviário de Cargas**, 2021.

DOS SANTOS MACEDO, Francielli Martins; FERRARI, Giovana; FERREIRA, Tânia Augusta. A INEFICIÊNCIA DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO BRASILEIRO E SUA INFLUÊNCIA NO CUSTO DOS PRODUTOS ALIMENTÍCIOS NO PAÍS. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 3, p. 619-637, 2023.

EQUIPE TOTVS. Transporte rodoviário no Brasil: história, cenário atual e importância. **TOTVS Blog Gestão Logística**, 2024. Disponível em: <<https://www.totvs.com/blog/gestao-logistica/transporte-rodoviario-no-brasil/>>. Acesso em: 01 de jun. de 2024.

FABRÍCIO, Alexandre de Siqueira Figueiredo; SUBRAMANIAN, Anand. Um modelo de programação inteira para o problema de dimensionamento de frota própria em uma indústria de bebidas. **XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 2008.

FORREST, John et al. coin-or/Cbc: Release releases/2.10. 11. **Zenodo, Oct**, v. 25, 2023.

GOULD, J. The size and composition of a road transport fleet. **Journal of the Operational Research Society**, v. 20, n. 1, p. 81-92, 1969.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introduction to operations research**. McGraw-Hill, 2015.

HOFF, Arild et al. Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 12, p. 2041-2061, 2010.

KOÇ, Çağrı et al. Thirty years of heterogeneous vehicle routing. **European Journal of Operational Research**, v. 249, n. 1, p. 1-21, 2016.

MASON, Andrew J. OpenSolver-an open source add-in to solve linear and integer programmes in Excel. In: **Operations Research Proceedings 2011: Selected Papers of the International Conference on Operations Research (OR 2011), August 30-September 2, 2011, Zurich, Switzerland.** Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 401-406.

RAO, Singiresu S. **Engineering optimization: theory and practice.** John Wiley & Sons, 2019.

RASHID, Yasir et al. Case study method: A step-by-step guide for business researchers. **International journal of qualitative methods**, v. 18, p. 1609406919862424, 2019.

REDMER, Adam. Strategic vehicle fleet management-the composition problem. **LogForum**, v. 11, n. 1, p. 119--126, 2015.

SARANGI, Subrat; SARANGI, Sudipta; SABOUNCHI, Nasim S. How managerial perspectives affect the optimal fleet size and mix model: a multi-objective approach. **OPSEARCH**, v. 60, n. 1, p. 1-23, 2023.

WOLSEY, Laurence A.; NEMHAUSER, George L. **Integer and combinatorial optimization.** John Wiley & Sons, 2014.

WOLSEY, Laurence A. **Integer programming.** John Wiley & Sons, 2020.