

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS SOROCABA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE  
SOROCABA

LUIS FILIPE FIGUEIRA DE FARIA

**PROBLEMA DE COMPOSIÇÃO DE FROTA: UMA ABORDAGEM SEQUENCIAL  
DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO COM HORIZONTES ROLANTES**

Sorocaba

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS SOROCABA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE  
SOROCABA

LUIS FILIPE FIGUEIRA DE FARIA

**PROBLEMA DE COMPOSIÇÃO DE FROTA: UMA ABORDAGEM SEQUENCIAL  
DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO COM HORIZONTES ROLANTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção de Sorocaba, para realização do Exame de Defesa, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva.

Sorocaba

2019

Figueira de Faria, Luis Filipe

PROBLEMA DE COMPOSIÇÃO DE FROTA: UMA ABORDAGEM SEQUENCIAL DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO COM HORIZONTES ROLANTES / Luis Filipe Figueira de Faria. -- 2019.

121 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador: João Eduardo Azevedo Ramos da Silva

Banca examinadora: Eli Angela Vitor Toso; José Lázaro Ferraz

Bibliografia

1. Dimensionamento de frota. 2. Pesquisa operacional. 3. Horizontes rolantes. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

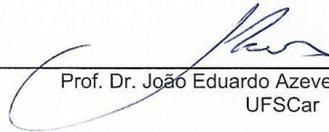
Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

---

**Folha de Aprovação**

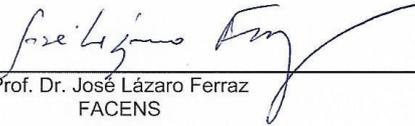
---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Luís Filipe Figueira de Faria, realizada em 19/03/2019:



---

Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva  
UFSCar



---

Prof. Dr. José Lázaro Ferraz  
FACENS



---

Profa. Dra. Eli Angela Vitor Toso  
UFSCar

## AGRADECIMENTOS

*Ao meu querido professor, amigo e orientador João Eduardo, que por anos guiou meus passos na pesquisa científica e contribuiu fortemente para me tornar o profissional que hoje sou.*

*Ao meu irmão e agora colega de profissão, Danilo, que por vezes discutiu assuntos fundamentais desse trabalho e da vida durante o meu curso de mestrado.*

*Aos demais membros da minha família – meus pais Silvia e Orlando e irmão mais velho, Luciano, pela paciência e estímulo durante toda a minha formação.*

*À minha companheira de jornada desde os primórdios da minha vida acadêmica, Ana, pelo amor, companheirismo e apoio durante todo o desenvolvimento desse trabalho, e à sua família, que agora também é minha.*

*Ao meu grande amigo Lucas Eric, parceiro de pós-graduação, que discutiu e criticou minhas entregas com olhar criterioso e experiente, além de compartilhar bons momentos durante toda o curso, e todos meus demais amigos.*

*Aos demais professores do PPGEP-So, especialmente a Virgínia e o José Geraldo, que mais do que colegas de universidade se tornaram grandes amigos.*

*À nossa ex-secretária Érica e nosso atual secretário Felipe, pelos excelentes serviços prestados à toda a comunidade do PPGEP-So.*

*Aos membros da banca, Prof<sup>ra</sup>. Eli, Prof. Rui e Prof. José Lázaro, que investiram tempo e esforço na leitura e avaliação dessa dissertação, fornecendo desde o exame de qualificação boas críticas e contribuindo para seu melhor desenvolvimento.*

*À CAPES, pela bolsa de mestrado que tanto auxilia estudantes na difícil vida acadêmica.*

## RESUMO

FIGUEIRA DE FARIA, Luis Filipe. Problema de composição de frota: uma abordagem sequencial de simulação-otimização com horizontes rolantes. 2019. 121 f. – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2019.

Para a distribuição física de produtos acabados, os embarcadores podem contratar empresas transportadoras para atender à demanda prevista pelos clientes. Entretanto, o contrato celebrado entre embarcadores e transportadores possui decisões conjuntas que devem ser tomadas em diversos horizontes de planejamento: estratégico, tático e operacional. Essa questão, conhecida como problema de dimensionamento ou composição de frota, possui diversas abordagens tradicionais reportadas na literatura, dividindo-se principalmente entre duas técnicas da Pesquisa Operacional: Simulação e Otimização de Sistemas. Contudo, sabe-se que essas técnicas, quando utilizadas de forma isolada, não são capazes de fornecer uma resposta adequada para o tomador de decisão, por demandarem muitas simplificações, no caso da otimização, ou por exigirem um exaustivo trabalho de análise, no caso da simulação. O objetivo desse trabalho é propor um método de combinação sequencial das técnicas de Simulação e Otimização de Sistemas com horizontes rolantes de planejamento, a fim de integrar as respostas fornecidas por ambas as técnicas e fornecer um resultado mais adequado para o tomador de decisão. Como resultado, obteve-se sucesso ao aliar o caráter das características dinâmicas e estocásticas de um modelo de simulação, mais aderente aos sistemas reais; ao dimensionamento ideal fornecido pelo modelo de otimização, inseridos em um ambiente de horizontes rolantes. A combinação das técnicas foi analisada por meio de três cenários com variações na demanda de 10 a 30%. Em comparação com a abordagem de otimização pura, destacam-se o aumento da quantidade de viagens esporádicas e de maior custo necessárias para suprir a imprevisibilidade das solicitações de transporte e o custo relativo da não consideração da simulação na decisão – que aumenta os custos finais do dimensionamento da frota em até 30%. Dessa forma, o embarcador pode reavaliar periodicamente o dimensionamento de sua frota, proporcionando um processo de tomada de decisão com mais segurança e melhor uso dos ativos.

Palavras-chave: Simulação. Otimização. Horizontes Rolantes. Pesquisa Operacional. Composição de frota.

## **ABSTRACT**

To physically distribute finished goods, shippers can hire third-party logistics (3PL) in order to meet the forecasted demand by the customers. Nevertheless, the contract made between shippers and 3PL is based on decisions that need to be considered over several time horizons: strategic, tactical and operational. This question, known as fleet dimensioning or fleet composition problem, has been vastly approached in literature, divided mainly into two Operational Research's techniques: Systems Simulation and Optimization. However, it is known that these techniques when applied in a pure or isolated form are not capable of delivering the adequate solution for the problem, once they need several simplifications, in the case of Optimization, or require an exhaustive analysis process, in the case of Simulation. The aim of this study is to propose a sequential simulation-optimization method with rolling horizons to integrate the solutions given by both techniques and provide a much more adequate result for the decision maker. As result, the more realistic dynamical and stochastic characteristics of the simulation model and the optimized fleet provided by the optimization model are successfully united in a rolling horizon environment. This combination has been analyzed over three different scenarios of demand variation, from 10 to 30%. When comparing to the isolated optimization, it can be highlighted the quantity of SPOT vehicles needed to overcome the unpredictability of transport solicitations and the relative costs of not considering simulation on decision making, which can increase the final costs of dimensioning implementation by up to 30%. Therefore, it becomes possible for the shipper to periodically re-evaluate his fleet dimensioning, providing a much safer decision-making process and a much better use of resources.

**Keywords:** Simulation. Optimization. Rolling horizons. Operational Research. Fleet composition.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Configuração dos modais no Brasil .....	11
<b>Figura 2:</b> Decisões estratégicas, táticas e operacionais do problema de seleção de frota.....	15
<b>Figura 3:</b> Sequência de conhecimento para a revisão da literatura.....	19
<b>Figura 4:</b> Problema de seleção de frota e seus componentes .....	21
<b>Figura 5:</b> Sequência de decisões para configurar o método de transporte .....	21
<b>Figura 6:</b> Métodos de Pesquisa Operacional .....	25
<b>Figura 7:</b> Estruturas hierárquicas para métodos SO.....	31
<b>Figura 8:</b> Técnica de horizontes rolantes.....	36
<b>Figura 9:</b> Planejamento sob horizontes rolantes .....	37
<b>Figura 10:</b> Etapas do estudo .....	43
<b>Figura 11:</b> Modelo conceitual do estudo completo.....	45
<b>Figura 12:</b> Modelo conceitual do sistema .....	46
<b>Figura 13:</b> Estrutura hierárquica para combinação SO. ....	52
<b>Figura 14:</b> Método completo para etapa de customização .....	55
<b>Figura 15:</b> Consolidação dos custos totais conforme a solução analisada .....	93

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Síntese dos trabalhos de métodos puros.....	30
<b>Tabela 2:</b> Síntese dos trabalhos de métodos híbridos.....	35
<b>Tabela 3:</b> Cenários executados para análise de sensibilidade.....	57
<b>Tabela 4:</b> Quantidade máxima de veículos utilizados por transportador (Otimização; C1)...	59
<b>Tabela 5:</b> Quantidade máxima de veículos utilizados por transportador (Simulação; C1). ...	59
<b>Tabela 6:</b> Resultados para viagens regulares e SPOT por mês (C1).....	60
<b>Tabela 7:</b> Quantidade de veículos SPOT simultâneos por cliente (Clientes 1-15; C1).....	62
<b>Tabela 8:</b> Quantidade de veículos SPOT simultâneos por cliente (Clientes 16-30; C1).....	63
<b>Tabela 9:</b> Variação na demanda por cliente por período (Clientes 1-15; C1). ....	65
<b>Tabela 10:</b> Variação na demanda por cliente por período (Clientes 16-30; C1). ....	66
<b>Tabela 11:</b> Custos totais no modelo de otimização e na combinação (em u.m.; C1).....	68
<b>Tabela 12:</b> Quantidade máxima de veículos utilizados por transportador (Otimização; C2). 68	
<b>Tabela 13:</b> Quantidade máxima de veículos utilizados por transportador (Simulação; C2). .	69
<b>Tabela 14:</b> Resultados para viagens regulares e SPOT por mês (C2).....	70
<b>Tabela 15:</b> Quantidade de veículos SPOT simultâneos por cliente (Clientes 1-15; C2).....	71
<b>Tabela 16:</b> Quantidade de veículos SPOT simultâneos por cliente (Clientes 16-30; C2).....	73
<b>Tabela 17:</b> Variação na demanda por cliente por período (Clientes 1-15; C2). ....	74
<b>Tabela 18:</b> Variação na demanda por cliente por período (Clientes 16-30; C2). ....	75
<b>Tabela 19:</b> Custos totais no modelo de otimização e na combinação (em u.m.; C2).....	77
<b>Tabela 20:</b> Quantidade máxima de veículos utilizados por transportador (Otimização; C3). 78	
<b>Tabela 21:</b> Quantidade máxima de veículos utilizados por transportador (Simulação; C3). .	78
<b>Tabela 22:</b> Resultados para viagens regulares e SPOT por mês (C3).....	79
<b>Tabela 23:</b> Quantidade de veículos SPOT simultâneos por cliente (Clientes 1-15; C3).....	80
<b>Tabela 24:</b> Quantidade de veículos SPOT simultâneos por cliente (Clientes 16-30; C3).....	82
<b>Tabela 25:</b> Variação na demanda por cliente por período (Clientes 1-15; C3). ....	83
<b>Tabela 26:</b> Variação na demanda por cliente por período (Clientes 16-30; C3). ....	84
<b>Tabela 27:</b> Custos totais no modelo de otimização e na combinação (em u.m.; C3).....	86
<b>Tabela 28:</b> Dimensionamento da frota do otimizador multiperíodo. ....	90
<b>Tabela 29:</b> Participação dos transportadores no atendimento dos clientes.....	105
<b>Tabela 30:</b> Quantidade de veículos disponíveis (em unidades). ....	106
<b>Tabela 31:</b> Capacidade dos veículos (em unidades volumétricas).....	106
<b>Tabela 32:</b> Tempo de viagem entre embarcador e clientes (em dias). ....	106

<b>Tabela 33:</b> Demanda prevista por cliente por período (Períodos 1-12). .....	107
<b>Tabela 34:</b> Demanda prevista por cliente por período (Períodos 13-24). .....	108
<b>Tabela 35:</b> Demanda prevista por cliente por período (Períodos 25-36). .....	109
<b>Tabela 36:</b> Custo por cliente por veículo (Transportador 1).....	110
<b>Tabela 37:</b> Custo por cliente por veículo (Transportador 2).....	111
<b>Tabela 38:</b> Custo por cliente por veículo (Transportador 3).....	112
<b>Tabela 39:</b> Custo por cliente por veículo (Transportador 4).....	113
<b>Tabela 40:</b> Custo por cliente por veículo (Transportador 5).....	115
<b>Tabela 41:</b> Custo por cliente por veículo (Transportador 6).....	116
<b>Tabela 42:</b> Custo por cliente por veículo (Transportador 7).....	117
<b>Tabela 43:</b> Custo por cliente por veículo (Transportador 8).....	118
<b>Tabela 44:</b> Custo por cliente por veículo (Transportador 9).....	119

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1. Contextualização .....	11
1.2. Descrição do problema .....	13
1.3. Objetivos.....	17
1.4. Organização do trabalho .....	17
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
2.1. Problema de seleção de frota .....	20
2.2. Pesquisa operacional aplicada à seleção de frota.....	24
2.2.1. Heurísticas.....	26
2.2.2. Métodos exatos.....	28
2.2.3. Simulação.....	29
2.3. Simulação-Otimização aplicada à seleção de frota.....	30
2.3.1. Otimização com iterações baseadas em simulação (OSI) .....	32
2.3.1. Simulação com iterações baseadas em otimização (SOI).....	34
2.3.2. Simulação-otimização sequencial (SSO).....	35
2.4. Horizontes Rolantes .....	36
2.5. Conclusões da revisão da literatura .....	37
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>41</b>
3.1. Caracterização da pesquisa .....	41
3.2. Procedimentos de pesquisa .....	42
3.2.1. Modelo conceitual .....	43
3.2.2. Modelos computacionais .....	48
3.2.3. Customização .....	52
3.2.4. Solução do modelo .....	56
3.2.5. Análises de desempenho .....	56
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
4.1. Cenário 1.....	59
4.2. Cenário 2.....	68
4.3. Cenário 3.....	77
4.4. Discussões.....	86
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>105</b>

## 1. INTRODUÇÃO

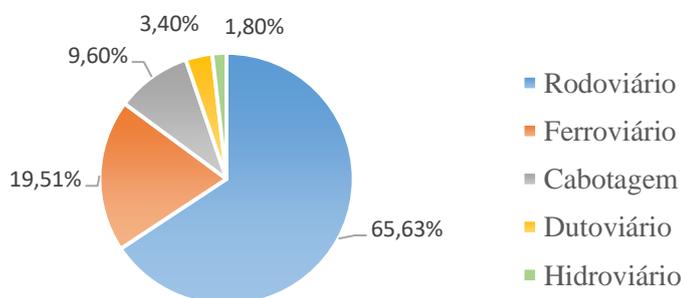
### 1.1. Contextualização

Os custos associados à produção e disponibilização de um produto são diversos e, dentre eles, incluem-se os custos logísticos onde destacam-se os relacionados à armazenagem e transporte. Como mencionado por Zeng e Rossetti (2003) e Engblom et al. (2012), os processos logísticos representam uma parcela significativa dos custos operacionais e muitas vezes determinam o sucesso ou fracasso de uma venda ou contratação de um serviço. Ademais, a confiabilidade das entregas também tem papel fundamental na colaboração entre embarcador e cliente, demandando processos eficientes que garantam o atendimento da demanda sem atrasos ou interrupções.

No Brasil, esses custos representam uma parcela significativa do PIB. De acordo com relatório fornecido pela Associação Brasileira de Operadores Logísticos (ABOL, 2015), no ano de 2013 as despesas com logística no país totalizaram R\$ 576,5 bilhões – que representaram 11,9% do PIB nacional. Da mesma forma, no ano de 2015, segundo pesquisa realizada pela Fundação Dom Cabral, as despesas com logística representaram 11,73% do PIB nacional.

No caso da estrutura logística do Brasil que, como descrito na Figura 1, tem aproximadamente 65% de sua cobertura descrita pela malha rodoviária, essas despesas são em boa parte representada por altos custos variáveis relacionados a esse tipo de modal – como combustíveis, pedágios, manutenções e seguros, que ocasionam um aumento de 30% nos custos totais de transporte (ABOL, 2015).

**Figura 1:** Configuração dos modais no Brasil.



**Fonte:** ABOL, 2015.

A necessidade de garantia de entrega do produto ao cliente e de eficiência nos processos logísticos levou à consolidação da Gestão da Cadeia de Suprimentos (GCS). Essa área tornou-

se responsável pela integração das atividades de gestão de compras, gestão de estoques, distribuição, planejamento estratégico, marketing e finanças (BALLOU, 2007). De forma não menos importante, a GCS tem como função a coordenação das atividades supracitadas entre os diversos elos da cadeia – desde o fornecedor primário até o cliente final.

Para os embarcadores, uma importante função da GCS é coordenar os estoques e a distribuição e alinhá-los à demanda, de forma a alcançar o mínimo custo das atividades logísticas. Essa coordenação torna-se possível somente com a contribuição efetiva de todas as partes envolvidas – fornecedores, transportadores e clientes (BALLOU, 2007).

Os transportadores (aqui entende-se transportador como qualquer provedor de atividades de transporte) têm, então, o papel fundamental de realizar a ligação entre os pedidos prontos no embarcador e a demanda prevista nos clientes. Essa ligação, segundo Rodrigue, Comtois e Slack (2006), pode representar cerca de 20% dos custos totais de um produto, apontando a importância de buscar a eficiência nos processos de transporte.

Para a execução desse transporte, um embarcador pode contar com 3 tipos de frota: frota própria, onde os veículos são de propriedade desse embarcador; frota terceirizada, onde transportadores são contratados para efetuar o transporte regular; e transporte eventual, comumente chamado de veículo SPOT, onde um transportador é contratado para realizar uma viagem única. A decisão acerca de qual contrato utilizar é comumente relacionada aos custos fixos e variáveis associados ao transporte. Usualmente, empresas de grande porte optam por terceirizar esse serviço – uma vez que transportadores e operadores logísticos possuem experiência e podem realizar a atividade de forma menos custosa, possibilitando o foco do embarcador nas suas atividades essenciais (HALDAR et al., 2017; AGUEZZOUL, 2014). Em 2014, segundo relatório da ABOL (2015), existiam 159 empresas que se caracterizavam como Operadores Logísticos, com faturamento anual agregado de 44,3 bilhões de reais em 2013, demonstrando uma tendência às parcerias entre embarcadores e transportadores.

Entretanto, embarcadores que possuem grandes demandas advindas de clientes em locais variados não podem ser atendidos por somente um transportador, uma vez que esses possuem diversas demandas e muitas vezes não dispõem de capacidade de transporte para o atendimento (LIN e YEH, 2010). Dessa forma, faz-se necessária a contratação de mais de um transportador, possibilitando a cobertura da demanda sem queda no nível de serviço.

Por sua vez, a contratação ou não de um transportador pode envolver diversos fatores, como a localização da frota dos mesmos, a configuração dessa frota no tocante à quantidade de veículos e suas capacidades e os custos de cada rota entre o embarcador e o cliente (MEIXELL e NORBIS, 2008). Assim, surge a primeira decisão a ser tomada pelo embarcador, que constitui também a questão de pesquisa central desse estudo: qual transportador deve realizar o transporte para qual cliente?

Ainda, conforme destacado por Koç et al. (2016), sabe-se que os transportadores muitas vezes não possuem uma frota homogênea ou numerosa o suficiente para atender todas as rotas que foram a ele alocadas. Conseqüentemente, o embarcador deve designar a mesma rota para mais de um transportador, de forma a garantir o atendimento em casos de impossibilidade de cobertura pelo transportador principal. Adicionalmente, por se tratarem de frotas com veículos que possuem diferentes capacidades, o embarcador também pode requerer um veículo específico para o atendimento de cada transporte.

Adicionalmente, os horizontes nos quais a demanda é estimada e utilizada para a composição da frota são de suma importância para as decisões. Horizontes de previsão mais longos muitas vezes reduzem a chance de um resultado pouco confiável, uma vez que buscam enxergar a informação no longo prazo. Entretanto, sabe-se que a certeza na informação é, na maioria dos casos, reduzida conforme o horizonte de planejamento se estende (KARATAS, CRAPARO e SINGHAM, 2015).

Percebe-se então o *trade-off* encontrado na escolha do horizonte de previsão, descrito pela necessidade do conhecimento da demanda em longo prazo, para composição dos contratos com transportadores, contraposta pela precisão necessária para uma boa assertividade nas decisões em demandas que surgem para atendimento em curto prazo.

Dessa forma, tornam-se claras as três principais decisões que devem ser tomadas pelo embarcador ao estipular um transporte de seus centros de distribuição para um cliente: quais transportadores atenderão cada rota, qual a parcela de atendimento de cada um dos transportadores atribuídos a cada rota e quais os veículos que serão utilizados para o atendimento dessa rota, considerando os horizontes de planejamento escolhidos.

## **1.2. Descrição do problema**

No problema estudado, um embarcador deve contratar transportadores responsáveis por rotas de transporte entre o seu ponto de distribuição e os seus clientes. Esses transportadores

são contratados para um período estratégico (longo prazo, geralmente um ano) e devem fornecer, durante esse período, uma determinada quantidade de veículos para o atendimento.

Em um horizonte tático (médio prazo, como um mês), novas rotas podem ser alocadas para os veículos contratados, desde que estejam dentro da cobertura de atendimento e da capacidade do transportador responsável. Dessa forma, transportadores que ficariam ociosos em um determinado mês podem ser designados para o atendimento de rotas sobrecarregadas nesse mesmo mês (sempre restritos à participação do transportador nas rotas).

Por fim, no horizonte operacional, o embarcador seleciona sempre o transportador disponível com o menor custo para atendimento das solicitações de transporte do curto prazo (próximo dia, por exemplo).

A parceria entre embarcador e transportador anteriormente mencionada é geralmente firmada através de contratos que, como mencionado por Hoff et al. (2010), são baseados em altos investimentos e envolvem decisões estratégicas que têm como exemplo, quais rotas serão atendidas por quais transportadores, com qual frota disponível e com quais custos.

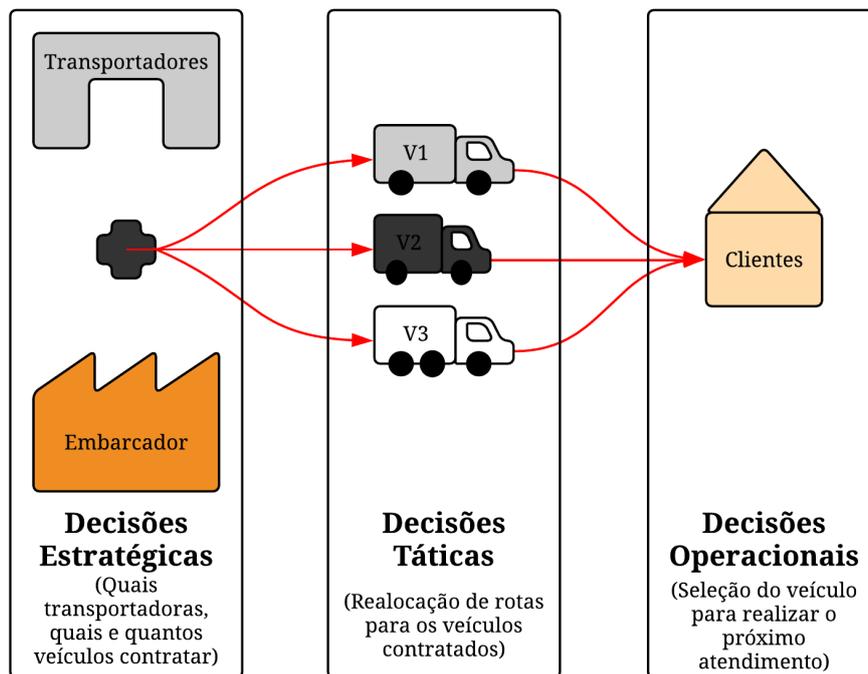
Os contratos realizados entre embarcadores e transportadores são, usualmente, de médio a longo prazo. Dessa forma, como no caso estudado por Zheng e Chen (2015), é necessário o conhecimento da demanda no período planejado, uma vez que os custos para alteração do contrato podem ser elevados. Entretanto, a previsão da demanda é dificultada por dois fatores: sua variabilidade em períodos longos e a exigência de métodos estatísticos confiáveis. Então, por se tratar de uma tarefa complexa, a previsão estimada pelos embarcadores é muitas vezes grosseira e incorre em um alto nível de incerteza nas decisões tomadas.

Por outro lado, o atendimento das solicitações de transporte dos embarcadores é realizado no curtíssimo prazo, com solicitações para a próxima hora, por exemplo. Essas solicitações urgentes, quando somadas à variabilidade natural da demanda, podem ocasionar a falta de veículos para o atendimento do transporte, tornando necessária a contratação de um veículo SPOT e gerando custos mais elevados para o embarcador (HOFF et al., 2010).

A demanda prevista, portanto, possui forte influência na escolha da frota que será composta para o atendimento das solicitações de transporte, uma vez que previsões de demanda no longo prazo possuem alta incerteza associada e tem esse fator reduzido conforme essa previsão se aproxima da realidade.

Como representado na Figura 2, nota-se que as decisões relacionadas à composição e utilização da frota iniciam-se em um nível estratégico, onde são definidos os transportadores, as rotas atendidas, a participação de cada transportador nessas rotas e a frota estimada desses transportadores; passam por um nível tático, onde as capacidades dos transportadores que atendem cada rota são revisadas e ajustadas às possíveis variações na demanda; e chegam em um nível operacional, onde decide-se quais veículos efetuarão os próximos transportes (NOURINEJAD e ROORDA, 2017; HOFF et al., 2010).

**Figura 2:** Decisões estratégicas, táticas e operacionais do problema de seleção de frota.



**Fonte:** Próprio autor.

Percebe-se então que um grande desafio enfrentado pelos embarcadores se encontra no *trade-off* entre contratar uma frota numerosa o suficiente para garantir o atendimento da demanda com um nível de serviço aceitável e contratar a frota mínima possível para que os custos de contrato sejam também minimizados (NOURINEJAD e ROORDA, 2017; REDMER et al., 2012).

Para o auxílio à tomada de decisão relacionada à configuração da frota utilizada para suprir as necessidades anteriormente mencionadas, diversas técnicas quantitativas podem ser utilizadas. Dentre elas, destaca-se a utilização da Modelagem e Simulação. Como mencionado por Morabito e Pureza (2012), essa técnica permite a melhor compreensão do sistema estudado, além de possibilitar a formulação de estratégias e fornecer o apoio necessário para a tomada de decisão.

Também chamada de Pesquisa Operacional, essa área se divide em estratégias diferentes de modelagem que possuem o mesmo objetivo: fornecer uma boa solução para um problema encontrado através de uma representação abstrata de um sistema. Duas estratégias comumente encontradas nessa divisão são os métodos de otimização, como a programação matemática, e métodos estocásticos, como a simulação de sistemas (MELARÉ et al., 2016).

Conforme mencionado por Figueira e Almada-Lobo (2014), as duas estratégias são capazes de agregar informações complexas como a variabilidade da demanda prevista. Entretanto, a acurácia dos detalhes inseridos em uma modelagem de otimização é muito inferior se comparada ao mesmo sistema modelado em simulação. Por outro lado, a garantia de melhor solução para um problema pode existir somente em modelos de otimização. Ainda, sabe-se que essas duas ferramentas podem ser utilizadas de forma pura (otimização ou simulação unicamente) ou híbrida (otimização e simulação combinadas em um mesmo método), potencializando os resultados obtidos de acordo com a complexidade do problema.

Adicionalmente, como mencionado por Koç et al. (2016), na maioria dos problemas de distribuição reais, as demandas são atendidas por uma frota heterogênea de veículos. Em outras palavras, os veículos utilizados para transportar o produto final do embarcador para os clientes possuem características diferentes, como tamanho, capacidade, velocidade e custo. Ainda, Hoff et al. (2010) afirmam que os transportadores que são contratados para realizar esse transporte possuem diferentes quantidades de cada um desses veículos – uma vez que sua frota é adquirida ao longo do tempo, conforme a demanda requisitada.

Analisando a quantidade de decisões a serem tomadas pelo embarcador ao selecionar os seus transportadores nota-se a necessidade de uma ferramenta que auxilie esse processo, mostrando uma boa (ou melhor) divisão da demanda entre os transportadores e seus veículos a serem contratados no longo prazo. Sugere-se então uma combinação das técnicas de Simulação de Sistemas (Simulação de Eventos Discretos) e Otimização de Sistemas (Programação Linear Inteira Mista), com o objetivo de propor um método alternativo ao problema de composição de frota específico tratado por esse estudo. Essa combinação é proposta através da execução sequencial dos modelos de simulação e otimização em um ambiente de horizontes rolantes, com o objetivo de agregar a precisão da programação matemática à variabilidade fornecida pelos modelos de simulação de eventos discretos, considerando nessa modelagem decisões táticas e operacionais para o fornecimento de uma solução estratégica.

### **1.3. Objetivos**

O objetivo principal desse estudo é propor uma metodologia aplicável ao problema de composição de frota heterogênea, sob a ótica do embarcador, que forneça boas soluções considerando as incertezas que compõem esse problema, através da combinação de duas ferramentas complementares da Pesquisa Operacional: Simulação e Otimização de Sistemas, tendo como principal saída a composição da frota terceirizada necessária para o atendimento da demanda no horizonte estratégico.

Como objetivos secundários, lista-se:

- Desenvolver um método que possa ser utilizado por empresas no planejamento de longo prazo de suas atividades de transporte;
- Testar o desempenho dessa ferramenta em um recorte de estudo de caso real;
- Investigar o impacto da variação da demanda no resultado final.

### **1.4. Organização do trabalho**

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura estruturada em quatro partes. A primeira parte refere-se à uma revisão da literatura de problemas de composição de frota, a fim de contextualização. A segunda parte descreve estudos de Pesquisa Operacional que abordem problemas de composição de frota utilizando ferramentas da Otimização ou Simulação. Por sua vez, a terceira parte diz respeito à estudos da Pesquisa Operacional que combinem as técnicas de Simulação e Otimização de Sistemas nos problemas relacionados à composição e seleção de frota. Por fim, a quarta e última seção do capítulo descreve a metodologia de Horizontes Rolantes, utilizada no método desenvolvido.

O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para abordar o caso estudado, através da descrição detalhada do problema, das premissas e conceitos utilizados, bem como o procedimento utilizado para a execução do método; o Capítulo 4 apresenta a aplicação da metodologia desenvolvida em um recorte de estudo de caso, proveniente de uma empresa do setor de bens de consumo; o Capítulo 5 apresenta os resultados e discussões obtidos através da aplicação no estudo de caso; o Capítulo 6 apresenta estudos computacionais e análises de sensibilidade; por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões, limitações, recomendações e expectativas futuras do trabalho.

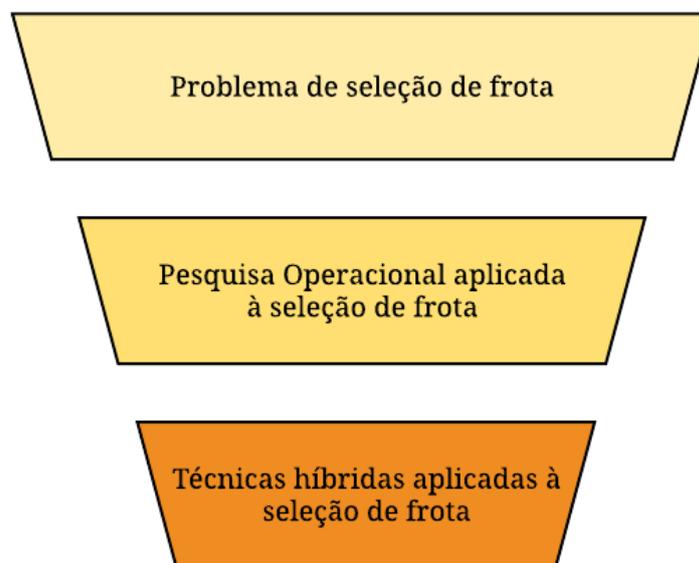


## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta inicialmente o problema de seleção de frota e os conceitos envolvidos nessa temática. Na sequência, é apresentada uma revisão sistemática da literatura envolvendo os problemas de seleção de frota solucionados por duas técnicas da Pesquisa Operacional – a Simulação e a Otimização de Sistemas, abordados tanto de forma pura (métodos de otimização ou métodos de simulação) quanto de forma híbrida (métodos compostos tanto por otimização quanto simulação). Então, é apresentado o conceito de Horizontes Rolantes utilizado para a atualização dos parâmetros dos modelos construídos baseada na abordagem sequencial de simulação-otimização. Por fim, são apresentadas conclusões dessa revisão da literatura, sintetizando as informações descritas anteriormente.

Para a melhor estruturação desse texto deve-se compreender a revisão da literatura como um afinilamento do conhecimento, que se inicia na contextualização teórica do problema de seleção de frota e as diversas variáveis envolvidas no mesmo, passa por técnicas de Pesquisa Operacional puras que abordam esse problema e tem fim nos trabalhos que aplicam técnicas de Pesquisa Operacional híbridas em problemas de seleção de frota. Esse fluxo de conhecimento pode ser observado na Figura 3.

**Figura 3:** Sequência de conhecimento para a revisão da literatura.



**Fonte:** Próprio autor.

A especialização do conhecimento destacado na Figura 3 pode ser explicada pelo avanço da Pesquisa Operacional. Segundo Figueira e Almada-Lobo (2014), as técnicas de Simulação e Otimização de Sistemas eram, tradicionalmente, consideradas duas técnicas

excludentes da Pesquisa Operacional. Entretanto, o desenvolvimento de tecnologias computacionais cada vez mais potentes possibilitou o surgimento de métodos híbridos (que combinam modelos de Simulação e Otimização) que buscam extrair os melhores resultados que cada uma das técnicas pode oferecer.

Dessa forma, a presente revisão tem como objetivo principal preparar o leitor acerca do tema de seleção de frota e descrever a evolução das abordagens da Pesquisa Operacional sobre esse problema.

## **2.1. Problema de seleção de frota**

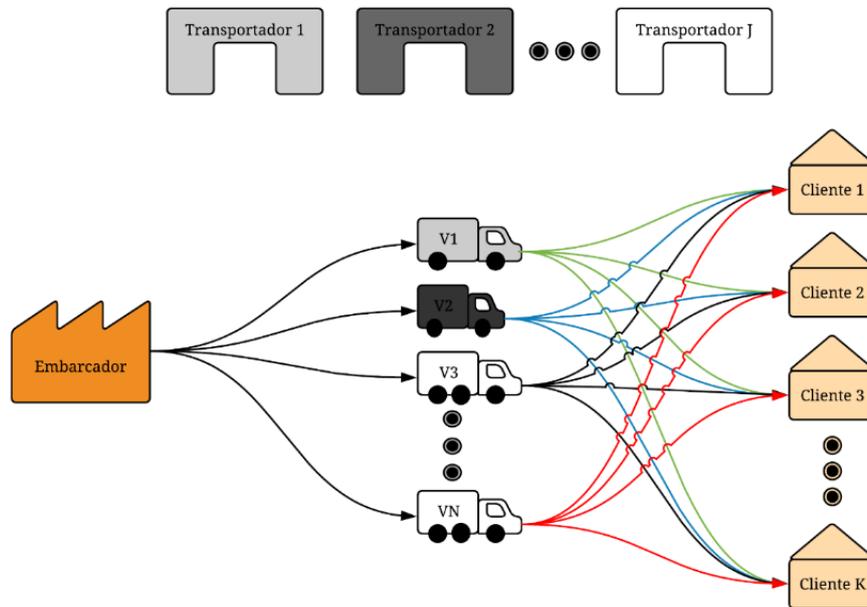
A colaboração entre os diversos elos da cadeia de suprimentos se tornou fundamental para possibilitar a sobrevivência das empresas. Nesse sentido, a Gestão da Cadeia de Suprimentos (GCS) busca gerenciar da melhor forma possível todas as atividades de fluxo de bens físicos e informações entre os agentes da cadeia (AGUEZZOUL, 2014).

Essa melhoria na gerência possibilita, para o embarcador, aumentar o seu nível de serviço e diminuir os seus custos (BALLOU, 2007). Por outro lado, o gerenciamento em outros agentes da cadeia gera decisões adicionais a serem tomadas, criando dificuldades para a empresa focal (SEURING e MÜLLER, 2008).

Dentre as decisões mais relevantes, se destaca o transporte dos produtos do embarcador para o cliente final. O transporte, segundo Rodrigue, Comtois e Slack (2006) e Hoff et al. (2010), pode representar até 20% dos custos de um produto manufaturado, tornando clara a importância de sua boa gestão para o embarcador. Ainda, segundo Engblom et al. (2012), os custos de transporte estão sempre entre os custos logísticos mais importantes destacados pela literatura – chegando a 35% dos custos logísticos totais (compostos por custos de transporte, armazenagem, gestão do estoque, administração, embalagem e custos indiretos).

A Figura 4 demonstra um problema de seleção de frota genérico. Nela, é possível observar o transporte que deve ser realizado de um embarcador único, utilizando uma frota heterogênea (diferentes tipos de veículos) pertencente a diferentes transportadores terceirizados, para diversos clientes.

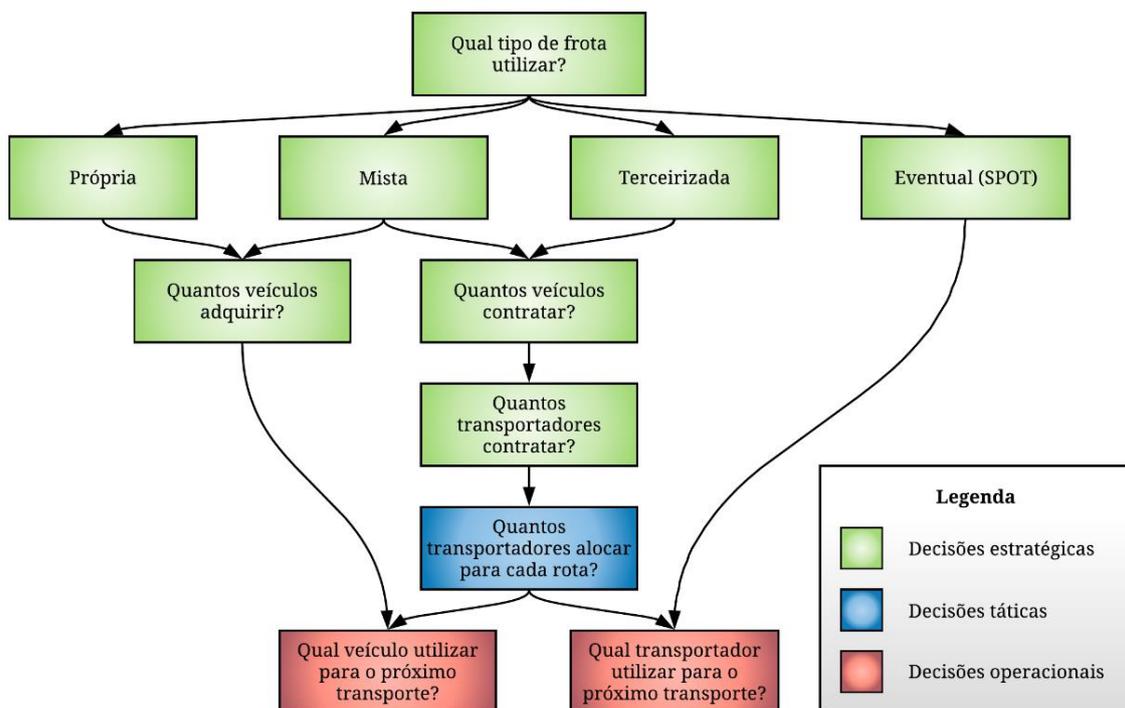
**Figura 4:** Problema de seleção de frota e seus componentes.



**Fonte:** Próprio autor.

Esse transporte, por sua vez, demanda uma série de escolhas que devem ser feitas a fim de atingir o objetivo da equipe de gestão – aumentar o nível de serviço ou diminuir os custos, por exemplo (SCHIMDT e WILHELM, 2000). A sequência lógica dessas escolhas está descrita na Figura 5, baseada em Hoff et al. (2010).

**Figura 5:** Sequência de decisões para configurar o método de transporte.



**Fonte:** Próprio autor.

Observa-se na Figura 5 que as decisões se dividem em três níveis: estratégicas, táticas e operacionais. As decisões estratégicas correspondem às decisões de longo prazo, que demandam altos investimentos e geralmente estão alinhadas com os objetivos estratégicos do embarcador. Por sua vez, a decisão marcada como tática corresponde à revisão da frota alocada inicialmente para cada rota, sujeita à variações na demanda por transporte, por exemplo. Por fim, as decisões operacionais estão relacionadas às decisões de curtíssimo prazo – qual veículo utilizar para o próximo transporte, por exemplo (HOFF et al., 2010).

A definição do horizonte de planejamento não é claramente definida na literatura (KHUNTIA et al., 2016). Uma vez que a divisão entre longo, médio e curto prazo depende fortemente do tipo de sistema abordado, a fixação conceitual de períodos de tempo que correspondam à essa divisão é inviável. Por exemplo, como destacado por Hoff et al. (2010), o médio prazo para problemas de seleção de frota de navios possui uma escala maior (anos) se comparado ao mesmo problema relacionado à frotas de caminhões (meses).

Mais do que a definição dos intervalos de tempo referentes à cada um dos níveis de decisão, é importante o conhecimento das suas características, que são evidenciadas por Hoff et al. (2010) e Schmidt e Wilhelm (2000). Para decisões de longo prazo, os tomadores de decisão devem analisar a previsão de receita e custos relacionada à aquisição e operação da frota, sem o detalhamento de rotas. Ainda, novas tecnologias a serem empregadas e a capacidade das instalações (e da frota) também devem ser estudadas. O médio prazo, por sua vez, busca revisar as decisões já tomadas durante o planejamento de longo prazo. Uma vez que o conhecimento de informações incertas (como a demanda, por exemplo) é maior, a capacidade da frota deve ser revista (vender, comprar ou contratar novos veículos), bem como sua designação para as possíveis rotas. Por fim, o curto prazo é caracterizado pelo planejamento das atividades diárias, com conhecimento praticamente total das informações de demanda, roteamento e capacidade.

Na sequência descrita na Figura 5, a primeira decisão a ser tomada corresponde ao tipo de frota utilizada pelo embarcador para a realização do transporte de seus produtos ao cliente. Tradicionalmente, essa frota pode ser: própria, onde todos os veículos utilizados são de propriedade do embarcador; terceirizada, onde todos os veículos utilizados são de propriedade de um transportador; mista, onde a frota é composta por veículos próprios e terceirizados; eventual (SPOT), onde os transportes são terceirizados e realizados um a um, sem a composição de uma frota fixa, geralmente utilizados em caso de ausência de veículos para a

sua execução (CARREIRA, LULLI e ANTUNES, 2017; SHYSHOU, GRIBKOVSKAIA e BARCELÓ, 2010).

A decisão de qual tipo de frota escolher, segundo Stojanović, Nikoličić e Miličić (2011), se assemelha com o problema *make-or-buy* (produzir ou comprar, para processos produtivos) e é geralmente guiada pela estratégia da empresa somada à diversas variáveis de mercado, como os custos e taxas de transporte e a demanda esperada (CIEŚLA, 2015; Koç et al., 2016). Ainda, para países como o Brasil, a malha tributária também possui forte influência na decisão de aquisição de frota. De acordo com Hoff et al. (2010), essa decisão envolve riscos e investimentos consideráveis, uma vez que, na maioria dos casos, a demanda por transporte estimada no longo prazo é imprecisa e os custos de aquisição (ou contratação) de uma frota são altos.

Como mencionado por Aguezzoul (2014), as empresas vêm seguindo uma tendência de terceirização de todas as atividades que não fazem parte do seu *core business*. Existem diversos benefícios proporcionados pela utilização de frotas terceirizadas, como a redução dos custos fixos e a externalização dos riscos relacionados ao transporte. Por outro lado, sabe-se que a utilização de frota própria proporciona uma maior flexibilidade operacional e um aumento no controle das operações (REDMER, 2014).

Com o tipo de frota selecionado, a próxima decisão é a sua composição. Nesse momento, torna-se necessária a utilização de ferramentas que indiquem, por exemplo, qual a configuração de frota ótima para que os custos totais sejam reduzidos. Deve-se decidir, então, quantos e quais veículos deverão ser contratados para o atendimento da demanda no nível de serviço desejado (HALVORSEN-WEARE et al., 2012).

Como mencionado por Hoff et al. (2010), as frotas são adquiridas ao longo do tempo. Dessa forma, os veículos que as compõem possuem características tecnológicas diferentes, como sua capacidade, velocidade, dimensões e custo, descrevendo o que se chama de frota heterogênea. Com a consideração desse tipo de frota, torna-se ainda mais difícil a decisão da composição, no tocante à quantidade e variedade de veículos, uma vez que a taxa custo-benefício de cada tipo de veículo deixa de ser facilmente calculada.

Vale ressaltar que o atendimento aos clientes em problemas de dimensionamento de frota com veículos heterogêneos pode ter duas abordagens, mencionadas por Li e Tao (2010) e Shyshou, Gribkovskaia e Barceló (2010). Na primeira, considera-se que todas as solicitações

de transporte devem ser atendidas independentemente dos custos atribuídos a cada uma dessas solicitações, aceitando transporte do tipo SPOT – que geralmente possui custos mais elevados. Por sua vez, a segunda abordagem desconsidera o transporte do tipo SPOT, causando um não-atendimento de solicitações (*backorder*) em caso de ausência de veículos para a sua realização.

Após a decisão de quais veículos utilizar para a execução do transporte, os transportadores terceirizados que devem dispor dessa frota devem ser selecionados, baseando-se na capacidade (quantidade e tipos de veículos) que os mesmos possuem. Em muitos casos, os transportadores com o melhor índice custo-benefício não possuem uma capacidade de transporte alta o suficiente para suprir o atendimento total das rotas às quais foram alocados (LIN e YEH, 2010). Então, o embarcador deve decidir, estrategicamente, quais serão os transportadores responsáveis para o atendimento de cada uma de suas rotas de transporte baseando-se, por exemplo, em um critério simples como o custo de transporte ou a velocidade de entrega (SOLAKIVI e OJALA, 2017).

A decisão tática ou de médio prazo (destacada na cor azul na Figura 5) a ser tomada, na sequência, corresponde à revisão dos transportadores (e da frota) selecionados para cada uma das rotas de transporte. Essa revisão é necessária uma vez que a demanda prevista no início do planejamento estratégico é muitas vezes altamente imprecisa e geralmente se ajusta conforme o horizonte planejado se aproxima, causando um desbalanceamento entre as necessidades de transporte e as capacidades disponíveis para o atendimento dos mesmos (HOFF et al., 2010).

Por fim, as decisões operacionais correspondem ao planejamento da execução do transporte até o cliente. A cada solicitação de transporte, o embarcador deve selecionar um veículo de um transportador para a sua realização, baseando-se também em algum critério selecionado pelo tomador de decisão (NOURINEJAD e ROORDA, 2017; HOFF et al., 2010).

## **2.2. Pesquisa operacional aplicada à seleção de frota**

Para levantar o estado-da-arte em pesquisas envolvendo simulação e otimização aplicadas ao problema de seleção de frota foi realizada uma revisão sistemática baseada nos cinco passos de Khan et al. (2003) na principal coleção de dados da *Web of Science* (WoS).

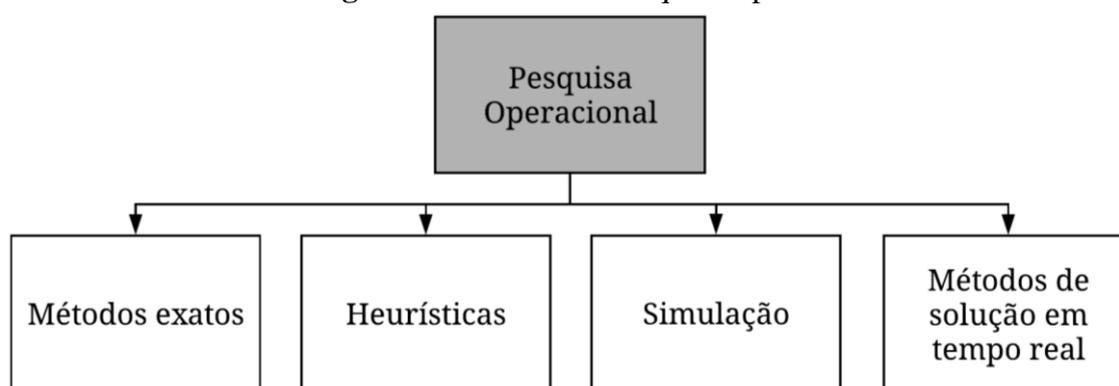
A questão a ser respondida por essa etapa da revisão é: como os pesquisadores têm aplicado técnicas da Pesquisa Operacional para a solução do problema de seleção/composição de frota?

Para a busca por textos, foram utilizadas as palavras-chave “*Optimization*”, “*Simulation*”, “*Operations Research*”, “*Operational Research*”, “*Fleet sizing*”, “*Fleet composition*” e “*Fleet selection*”, estruturadas em operadores booleanos aplicados em busca avançada na WoS. Como critérios de pesquisa, foram utilizados somente artigos publicados em inglês, sem restrição de *journal* ou área de pesquisa, entre os anos de 2012 e 2018.

Através dos critérios supracitados, foram encontrados 59 artigos. Desses trabalhos, então, foram analisados os títulos e resumos para que uma nova seleção fosse realizada. Para serem selecionados, os resumos dos artigos deveriam mencionar as ferramentas de simulação ou otimização aplicadas à problemas relacionados à seleção, composição ou dimensionamento de frota. Após essa etapa, 11 artigos foram considerados aderentes aos critérios e a sua leitura íntegra foi realizada. Por fim, realizou-se nova busca nas referências dos artigos selecionados, somando à lista novos 3 artigos – totalizando 14 trabalhos para a composição dessa seção da revisão da literatura.

Os trabalhos encontrados na literatura se dividem entre as abordagens de Otimização e Simulação. Em uma análise geral, observa-se que os trabalhos de Pesquisa Operacional aplicados à seleção de frota são majoritariamente da área de otimização. Dentre os 14 artigos selecionados, apenas 2 utilizam-se da ferramenta de simulação para a solução do problema de seleção de frota. Para a classificação dos artigos dessa seção da revisão foi utilizada a divisão de Eksioglu et al. (2009), ilustrada conforme Figura 6.

**Figura 6:** Métodos de Pesquisa Operacional.



**Fonte:** Eksioglu et al., 2009.

Dos métodos apresentados na Figura 6, o mais encontrado dentre os 12 artigos que utilizam a otimização para buscar solucionar o problema de seleção de frota é a heurística (71,4%). Os problemas de seleção de frota (principalmente quando combinados à problemas de roteamento, por exemplo) se tornam muito difíceis de serem resolvidos através de métodos

exatos, por exigir um tempo de otimização e uma capacidade de processamento computacional muito altos (MORENO, ALEM e FERREIRA, 2016; MARDANEH e LOXTON, 2016). Ainda, vale ressaltar que nenhum método de solução em tempo real foi aplicado ao problema de seleção de frota.

Por sua vez, a simulação é utilizada quando deseja-se detalhar fortemente as operações, considerando cada interdependência dos agentes (veículos, clientes, demanda, embarcadores), a dinâmica do sistema (comportamento do sistema ao longo do tempo) e a variabilidade dos parâmetros, responsável por reproduzir de maneira mais próxima à realidade, através de uma sintaxe de programação, os diferentes valores que um parâmetro modelado pode receber (como por exemplo a consideração da demanda através de uma distribuição uniforme de probabilidade do tipo Normal, com média 20 e desvio padrão 5, em substituição à uma demanda fixa de 20 unidades).

### **2.2.1. Heurísticas**

Sendo utilizados em 71,4% dos artigos, os métodos heurísticos foram os mais recorrentes em estudos de seleção de frota, uma vez que esse tipo de problema se torna extremamente complexo em instâncias reais. Ainda, os métodos utilizados são usualmente compostos por heurísticas combinadas, com o objetivo de tornar o problema mais tratável computacionalmente.

Loxton, Lin e Teo (2012) combinaram duas heurísticas para solucionar o problema de seleção de frota e obtiveram resultados superiores quanto ao esforço computacional, se comparadas a outros métodos. No caso, a variabilidade foi adicionada de forma simples, substituindo a necessidade de veículos em um período por uma distribuição uniforme de probabilidade. Essa simplificação diminuiu a qualidade dos resultados encontrados, uma vez que a distribuição teórica de probabilidade mais aderente à necessidade de veículos deve ser devidamente calculada. De forma complementar, Mardaneh, Lin e Loxton (2016) desenvolveram uma heurística em duas fases para abordar o problema de seleção de frota e roteamento de veículos conjuntamente. Em uma primeira etapa, os autores determinam o roteamento dos veículos em questão, com a consideração de variabilidade. Na segunda etapa, por sua vez, os autores também utilizaram um algoritmo similar aos autores anteriores, para determinar a composição da frota para atender as rotas fixadas na primeira fase. O método se mostrou eficiente computacionalmente, se comparado à métodos tradicionais como a

programação linear inteira-mista executada no pacote de otimização IBM ILOG CPLEX (ou somente CPLEX).

Três artigos utilizaram algoritmos evolutivos em seus métodos. Matei et al. (2015) propuseram uma abordagem determinística em um algoritmo genético com o objetivo de potencializar os resultados do algoritmo genético utilizado. Os autores testaram seu método em instâncias da literatura e obtiveram soluções boas em tempos computacionais aceitáveis. Redmer et al. (2012) propuseram duas formulações alternativas para o problema de dimensionamento de frota de veículos de transporte de combustível, considerando variabilidade nos tipos de produto a serem transportados por cada veículo. Para a solução, os autores desenvolveram 3 estratégias: a utilização de um algoritmo de busca local puro, a utilização de um algoritmo evolutivo e uma abordagem híbrida das duas estratégias – concluindo que essa abordagem híbrida é mais eficiente computacionalmente e proporciona resultados melhores. Por fim, Yaghini e Khandaghabadi (2013) construíram uma metaheurística híbrida, onde um algoritmo é responsável por selecionar a frota e outro por executar testes de atendimento da demanda pela frota selecionada. Os autores aplicaram o modelo proposto em um caso determinístico de seleção de frota ferroviária no Irã e compararam os resultados obtidos com a aplicação do pacote CPLEX. Em suma, os resultados do modelo proposto se mostraram próximos (e por vezes superiores) aos resultados apresentados pelo CPLEX, demandando em contrapartida um esforço computacional maior.

Milenković et al. (2015) também propuseram um método para o dimensionamento e alocação de frotas ferroviárias. Através de um modelo de controle preditivo baseado em horizontes rolantes com a consideração de variabilidade na demanda e nos tempos de deslocamento, os autores desenvolveram uma ferramenta que obteve uma boa performance em instâncias ilustrativas (com tempos de execução menores ou iguais a 21 segundos), apontando uma boa alternativa para a obtenção da solução desse problema.

Dois trabalhos contemplaram a utilização de métodos heurísticos baseados no objetivo de decompor um problema grande em problemas menores, de tratabilidade maior, para a solução de problemas de logística humanitária. Alem, Clark e Moreno (2016) desenvolveram um método de dois estágios baseado em problema real de logística humanitária, onde o primeiro estágio determina e fixa variáveis de decisão de fluxo (como a quantidade de veículos a ser contratado) e o segundo estágio determina a solução das demais variáveis (como a alocação dos veículos contratados a rotas e o balanço de estoque de suprimentos para o

atendimento). Considerando a variabilidade através de cenários que combinam os fornecimentos e demandas juntamente com o nível de desastre ocorrido, os autores aplicaram seu método em um caso no Rio de Janeiro e obtiveram boas soluções sob esforços computacionais plausíveis. De forma semelhante, Moreno, Alem e Ferreira (2016) consideraram a solução do problema estocástico em dois estágios através de combinações híbridas de heurísticas, com o objetivo de tornar tratáveis instâncias reais de problemas de logística emergencial. Os resultados obtidos foram considerados razoáveis computacionalmente e bons em termos absolutos, quando comparados à solução obtida pelo pacote CPLEX, chegando à uma redução do gap de otimalidade médio em 57% sob uma redução do tempo de execução médio em 13%.

Rahimi-Vahed et al. (2015) desenvolveram um algoritmo modular para três subproblemas de roteamento de veículos: multi-depósito, periódico e multi-depósito periódico. Esse algoritmo modular era incumbido de guiar a otimização pelas decisões a serem tomadas, sendo elas o padrão de visita a cada consumidor, a designação à depósitos e o problema de roteamento. Os autores compararam seus resultados em instâncias ilustrativas aos resultados fornecidos por uma modificação da Busca Tabu e obtiveram resultados computacionais superiores e soluções de qualidade igual ou superior, reduzindo o gap de otimalidade em até 25% e o tempo de execução em até 47,5%. Juan et al. (2014), por fim, utilizaram o Método de Aproximações Sucessivas para solucionar um problema genérico de roteamento e composição de veículos. Em seu algoritmo, os autores decompueram o problema de roteamento de veículos heterogêneos – HeVRP – em problemas mais simples de roteamento de veículos homogêneos, e construíram sua solução final unificando as soluções obtidas em cada um desses problemas menores. Apesar do algoritmo fornecer bons resultados – tanto em quesitos absolutos quanto em esforço computacional, principalmente quando o problema original é muito complexo – os autores não consideraram em sua abordagem a variabilidade de parâmetros como demanda ou tempos de viagem.

### **2.2.2. Métodos exatos**

Da seleção de artigos elaborada, os métodos exatos foram utilizados por 14,3% dos autores para abordar problemas de seleção de frota. Halvorsen-Weare et al. (2012) desenvolveram um método de enumeração exaustiva para o dimensionamento e roteamento da frota de navios de fornecimento de insumos para plataformas marítimas. De maneira determinística, os autores geraram, em um algoritmo precedente, todas as possíveis rotas do

navio para o horizonte planejado e encontraram a solução ótima dessas rotas com relação aos custos totais. A tratabilidade (ou capacidade de obter uma solução para o problema) do modelo no caso estudado não se tornou um problema devido ao tamanho da instância, que possuía uma pequena quantidade de veículos – possibilitando encontrar a solução ótima a um esforço computacional baixo. Por sua vez, Lei, Lin e Miao (2016) consideraram a estocasticidade do problema de dimensionamento de frota agregando variabilidade nos parâmetros de demanda. Os autores propuseram uma solução em dois estágios, onde o primeiro era representado por uma heurística responsável pela fixação dos veículos que seriam utilizados e seu roteamento e o segundo era representado por um algoritmo de otimização robusta responsável por alocar a demanda dos clientes aos veículos. Os autores realizaram testes para aprimorar a eficiência da heurística inicial e obtiveram resultados muito superiores aos encontrados pelo método sem a utilização da heurística quanto ao esforço computacional demandado, chegando à uma redução de 93% no gap de otimalidade e 47% no tempo total de execução.

### **2.2.3. Simulação**

Por fim, constata-se que 14,3% dos artigos analisados utilizaram a simulação para o estudo do problema de composição de frota. Esses trabalhos são aplicados à temática do “transporte verde”, que visa o aumento de eficiência e flexibilidade na utilização de meios de transporte. Barrios e Godier (2014) desenvolveram um modelo de Simulação Baseada em Agentes (SBA) e estudaram o problema de sistemas flexíveis de compartilhamento de automóveis urbanos, buscando maximizar a demanda atendida através do dimensionamento da frota contratada. Testando três métodos diferentes de redistribuição de veículos, os autores foram capazes de estimar a frota necessária para atender à demanda no horizonte planejado. Por sua vez, Kavakeb et al. (2015) construíram um modelo de Simulação de Eventos Discretos (SED) e analisaram a implementação de veículos autônomos inteligentes (IAV), detentores de maior flexibilidade de manobra e autonomia de uso, para transporte de contêineres em um porto. Os autores compararam a performance do novo método de transporte com os caminhões já utilizados no porto. Através da análise de cenários com variação de quantidade de veículos, foi possível estimar a frota necessária para o atendimento da demanda e os custos necessários para manutenção dessa frota.

A Tabela 1 sintetiza as informações levantadas nessa seção de revisão da literatura, apresentando para cada trabalho as informações de tipo de abordagem, método utilizado e área de aplicação. Vale ressaltar que, embora os estudos possuam diversas áreas de aplicação, essa

variável não influencia no entendimento do conceito do problema de dimensionamento de frota e seus desdobramentos. Assim, o foco do presente trabalho é analisar o problema de seleção de frota de veículos rodoviários.

**Tabela 1:** Síntese dos trabalhos de métodos puros.

Artigo	Tipo de abordagem	Método	Área de aplicação
Halvorsen-Weare et al. (2012)	Otimização	Exato (Enumeração exaustiva)	Transporte marítimo
Lei, Lin e Miao (2016)	Otimização	Exato (Otimização robusta)	Atendimentos móveis
Mardaneh, Lin e Loxton (2016)	Otimização	Heurística ( <i>Cross entropy</i> + programação dinâmica + <i>golden section search</i> )	Teórico
Loxton, Lin e Teo (2012)	Otimização	Heurística (Programação dinâmica + <i>golden section search</i> )	Teórico
Matei et al. (2015)	Otimização	Heurística (Algoritmo genético + busca local + estratégia de imigração)	Teórico
Yaghini e Khandaghabadi (2013)	Otimização	Heurística (Algoritmo genético + <i>simulated annealing</i> )	Transporte ferroviário
Redmer et al. (2012)	Otimização	Heurística (Busca local + algoritmo evolutivo)	Transporte de combustíveis
Rahimi-Vahed et al. (2015)	Otimização	Heurística ( <i>Modular heuristic algorithm</i> )	Teórico
Alem, Clark e Moreno (2016)	Otimização	Heurística ( <i>MIP-Based 2 stages</i> )	Logística humanitária
Mienkovic et al. (2015)	Otimização	Heurística ( <i>Model Predictive Control</i> )	Transporte ferroviário
Moreno, Alem e Ferreira (2016)	Otimização	Heurística ( <i>Relax-and-fix + Fix-and-optimize</i> )	Logística humanitária
Juan et al. (2014)	Otimização	Heurística ( <i>Successive approximation</i> )	Teórico
Barrios e Godier (2014)	Simulação	Simulação baseada em agentes	Transporte verde
Kavakeb et al. (2015)	Simulação	Simulação de eventos discretos	Transporte verde

Fonte: Próprio autor.

### 2.3. Simulação-Otimização aplicada à seleção de frota

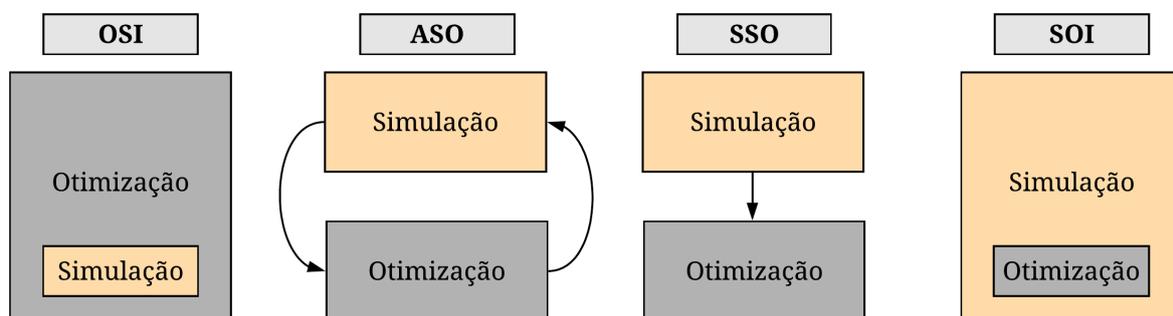
Da mesma forma que para os trabalhos de métodos puros, o estado-da-arte em pesquisas que direcionam técnicas combinadas de otimização e simulação à solução do problema de

seleção de frota foi obtido através de uma revisão sistemática da literatura. Essa revisão sistemática foi realizada na principal coleção de dados da WoS com a questão a ser respondida sendo: como os autores tem aplicado técnicas combinadas de Simulação e Otimização de Sistemas para a solução do problema de seleção/composição de frota?

Em pesquisa avançada, estruturada em operadores booleanos, foram utilizadas as palavras-chave “*Optimization*”, “*Simulation*” e “*Fleet*”. Similarmente à busca efetuada sobre os métodos puros, foram utilizados como critério de pesquisa somente artigos publicados em inglês, sem restrição de *journal* ou área de pesquisa, entre os anos de 2012 e 2018. A pesquisa resultou em uma lista de 106 artigos, dos quais foram analisados os títulos e resumos para uma nova seleção. Essa etapa, onde os artigos deveriam mencionar propostas de solução ao problema de seleção de frota através dos métodos de simulação e otimização, resultou em um total de 12 artigos que foram lidos integralmente.

Para a estruturação dessa seção da revisão, os artigos foram classificados de acordo com a taxonomia proposta por Figueira e Almada-Lobo (2014), de acordo com o propósito da simulação e a estrutura hierárquica utilizada (como os modelos de otimização e simulação interagem). O propósito da simulação pode ser dividido em 3 categorias, sendo elas: avaliação da solução (SE), onde o modelo de simulação é utilizado para avaliar a performance das soluções; aperfeiçoamento do modelo analítico (AME), onde as iterações do modelo de otimização são aprimoradas por um modelo de simulação; geração de solução (SG), onde o modelo de simulação é utilizado para calcular variáveis de um modelo de otimização. Por sua vez, a estrutura hierárquica pode ser dividida em 4 categorias, como indicado na Figura 7.

**Figura 7:** Estruturas hierárquicas para métodos SO.



**Fonte:** Figueira e Almada-Lobo, 2014.

As estruturas observadas na tabela são descritas como: otimização com iterações baseadas em simulação (OSI), onde em uma ou mais iterações de um modelo de otimização é rodado um modelo de simulação; simulação-otimização alternada (ASO), onde os modelos

rodam alternadamente em cada iteração; simulação-otimização sequencial (SSO), onde os modelos rodam sequencialmente e simulação com iterações baseadas em otimização (SOI), onde em uma ou mais iterações de um modelo de simulação é rodado um modelo de otimização. A título de organização, os artigos discutidos nessa seção serão classificados pela estrutura hierárquica utilizada nos trabalhos.

### **2.3.1. Otimização com iterações baseadas em simulação (OSI)**

Os estudos de otimização com iterações baseadas em simulação foram os encontrados com maior frequência na revisão da literatura. Dentre os 12 artigos selecionados, 7 tinham seu método baseado em um algoritmo de otimização que rodava um modelo de simulação durante as iterações. Esse método, como descrito por Figueira e Almada-Lobo (2014), é delineado pela otimização dependendo fortemente da simulação.

Com relação à área de aplicação, dois trabalhos abordam o dimensionamento e planejamento da frota de embarcações para o atendimento de plataformas de extração de petróleo *offshore*. Eskandari e Mahmoodi (2015) combinaram a simulação e a otimização com o propósito de avaliar a performance das soluções encontradas (SE), onde, a cada iteração do otimizador, o modelo de simulação foi executado e forneceu o resultado estocástico da solução incumbente (solução atual). Em seu trabalho, os autores compararam duas políticas de roteamento das embarcações para o atendimento de suprimento e retirada de materiais das plataformas marítimas, com o objetivo de minimizar os custos totais da frota (custos operacionais e custos de contratação de embarcações). Fixando 5 níveis de serviço desejados, os autores utilizaram o otimizador OptQuest®, do *software* Arena®, para construir curvas de *trade-off* entre nível de serviço e custos totais, resultando em frotas heterogêneas de veículos de contrato de longo prazo ou SPOT recomendadas para cada um dos cenários e política de roteamento escolhidos.

Halvorsen-Weare e Fagerholt (2017), da mesma forma, utilizaram um algoritmo combinado de simulação e otimização para o planejamento do atendimento de plataformas marítimas por embarcações heterogêneas, onde cada embarcação deve possuir um roteamento específico para cada dia, visitando uma ou mais plataformas por viagem. Entretanto, o propósito da simulação desse trabalho era fornecer parâmetros mais adequados para a análise das soluções, melhorando a qualidade do resultado da otimização (AME). O objetivo do algoritmo combinado proposto pelos autores era minimizar os custos totais e maximizar o nível

de serviço fornecido pelas embarcações (reduzir a quantidade de atrasos e não-entregas), comparando estratégias de otimização diferentes.

Chang, Huang e Yang (2014) estudaram o problema de dimensionamento da frota e buscaram minimizar a quantidade de pontes rolantes de uma indústria de componentes eletrônicos em Taiwan através do algoritmo proposto chamado *Simulation Sequential Metamodeling*, onde o modelo de simulação forneceu os parâmetros e as soluções das variáveis de decisão a serem otimizadas, em um processo iterativo, descrevendo um propósito de avaliação da solução (SE).

No mesmo estudo de caso do trabalho anterior, Chang, Chang e Kuo (2014) utilizaram a estrutura OSI em seu trabalho. Através do algoritmo COMPASS proposto por Hong e Nelson (2006), os autores definiram uma função multi-objetivo e utilizam a simulação para avaliar cada uma das soluções ótimas da função objetivo. Com as soluções ótimas encontradas, os autores utilizaram a metodologia *Data Envelopment Analysis*, realizando *trade-offs* entre as funções objetivo do problema original e construindo uma curva Pareto para a análise da melhor solução.

Outros três estudos utilizaram a simulação com o objetivo de avaliar a performance da solução incumbente (SE), aplicando o método em áreas diversas. Azimi (2015) desenvolveu um algoritmo com o objetivo de minimizar os custos totais relacionados à composição de uma frota homogênea de caminhões e à utilização de docas de recebimento e expedição em um porto iraniano. Em seu método, o autor compara diferentes regras de sequenciamento de entrada, saída e movimentação de contêineres e obtém resultados relacionados à custo e dimensionamento da frota necessária para o atendimento das regras de cada cenário. Chawoasakoo et al. (2017) também compararam diferentes cenários a fim de selecionar a melhor regra possível de utilização de recursos. Os autores aplicaram o método para selecionar a frota e as regras de utilização de caminhões e escavadeiras heterogêneas na indústria de mineração, com o objetivo de maximizar a produção. Por fim, Costa-Salas, Sarache e Überwimmer (2017) combinaram simulação e otimização com o objetivo de encontrar a frota ótima de dois tipos de caminhões de coleta de pneus descartados em uma cidade colombiana. Buscando maximizar o benefício econômico e minimizar os impactos ambientais negativos (maximizar a quantidade de pneus para descarte coletados), os autores criaram 18 cenários de diferentes combinações de frota possíveis para o atendimento das coletas e do transporte para os processadores dos pneus.

### 2.3.1. Simulação com iterações baseadas em otimização (SOI)

Segundo Figueira e Almada-Lobo (2014), o método oposto ao previamente descrito, SOI, corresponde à algoritmos onde a simulação depende fortemente da otimização. Nesse método, durante uma rodada de um modelo de simulação, é rodado um modelo de otimização.

Dentre os 11 artigos selecionados para a composição dessa revisão, 3 são baseados no método SOI. Ainda, os mesmos três artigos utilizam a simulação com o propósito de aperfeiçoar o modelo analítico (AME), uma vez que as decisões da otimização são tomadas em um ambiente dinâmico e estocástico.

Nourinejad e Roorda (2014) desenvolveram, internamente em um modelo de simulação, dois algoritmos de otimização (*Vehicle Relocation Optimization* e *Parking Inventory Optimization*), responsáveis por alocar carros compartilhados de maneira a minimizar o tamanho da frota, os custos de estacionamento e as movimentações de realocação. No modelo, a cada evento – descrito pela chegada de um usuário no sistema – os algoritmos de otimização são executados e determinam se aquele usuário será aceito e qual o planejamento para atendê-lo. Os autores compararam o método proposto à um modelo de *benchmark* e obtém resultados satisfatórios, uma vez que os resultados absolutos são próximos e a flexibilidade do modelo é maior. Por sua vez, Powell et al. (2014) utilizaram o método SOI para o dimensionamento e roteamento de locomotivas através do algoritmo chamado *approximate dynamic programming*. Nesse algoritmo, o problema foi decomposto em aproximações por curvas de valor que simplificam a incerteza do problema e resolvido de maneira mais simples, em um ambiente de simulação, onde as decisões de designação de locomotivas à trens em locais diversos são tomadas a cada 4 horas e seus detalhes operacionais simulados, em um horizonte de planejamento contínuo. Como destacado pelos autores, a utilização de curvas de valor simplificou a necessidade de considerar atrasos a jusante.

O último trabalho estruturado em SOI refere-se ao trabalho de Sha e Srinivasan (2016). Em seu estudo, os autores desenvolveram uma simulação baseada em agentes para o dimensionamento de frota de uma cadeia de suprimentos da indústria química. Muito utilizada por permitir que os agentes (entidades, no modelo de simulação) tomem decisões autônomas, a simulação baseada em agentes permite, no caso apresentado, a utilização de um modelo de otimização para a decisão de realocação de veículos-tanque com o objetivo de minimizar a quantidade de paradas por falta de veículos para expedição. Os autores obtiveram um aumento

de 87% para 100% no nível de serviço através da substituição da decisão pelo modelo de otimização.

### 2.3.2. Simulação-otimização sequencial (SSO)

Os dois trabalhos remanescentes dessa revisão utilizaram a estrutura hierárquica de Simulação-otimização sequencial (SSO). Zheng e Chen (2015) estudaram o problema de composição e substituição de frota de veículos-tanque na indústria química utilizando a simulação para aperfeiçoar o modelo analítico (AME), uma vez que utilizaram a simulação de Monte Carlo com quadrados mínimos para considerar a variabilidade na demanda. Nesse método, os autores simularam demandas através do método de Monte Carlo e as utilizaram como parâmetro para o modelo de otimização, que oferecia suporte à tomada de decisão sobre quantos e quais veículos substituir em cada período do horizonte planejado. D'Souza et al. (2016), por sua vez, utilizaram a simulação com o propósito de calcular variáveis de interesse (SG). Os autores desenvolveram um método onde a frota é substituída por módulos de funções que podem compor um veículo e compararam os resultados da otimização da quantidade de módulos necessários à quantidade necessária de veículos para o atendimento da demanda, em um modelo tradicional. Para cada resultado, os autores utilizaram um modelo de simulação para calcular os custos associados às soluções encontradas.

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos trabalhos que compõe essa seção da revisão da literatura, composta pelo propósito da simulação, a estrutura hierárquica e a área de aplicação dos estudos.

**Tabela 2:** Síntese dos trabalhos de métodos híbridos.

<b>Artigo</b>	<b>Propósito da simulação</b>	<b>Estrutura hierárquica</b>	<b>Área de aplicação</b>
Chang, Chang e Kuo (2014)	AME	OSI	Movimentação de materiais
Halvorsen-Weare e Fagerholt (2017)	AME	OSI	Indústria offshore
Eskandari e Mahmoodi (2015)	SE	OSI	Indústria offshore
Costa-Salas, Sarache e Überwimmer (2017)	SE	OSI	Logística reversa
Chawoasakoo et al. (2017)	SE	OSI	Mineração
Azimi (2015)	SE	OSI	Contêineres

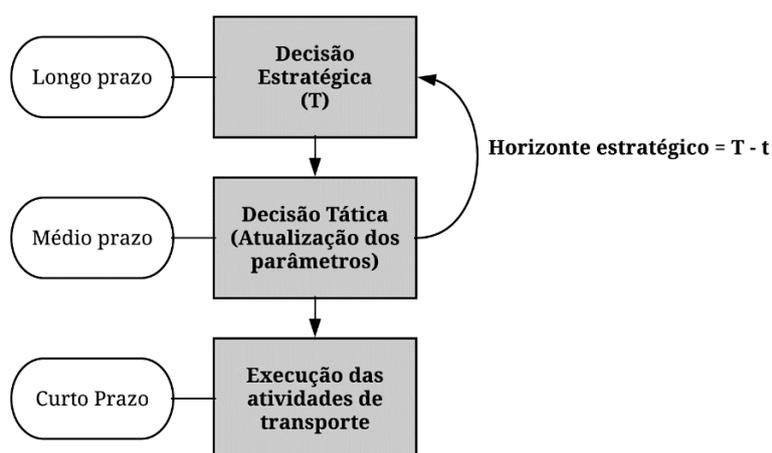
Chang, Huang e Yang (2014)	SE	OSI	Movimentação de materiais
Nourinejad e Roorda (2014)	AME	SOI	Carros compartilhados
Sha e Srinivasan (2016)	AME	SOI	Indústria química
Powell et al. (2014)	AME	SOI	Ferrovias
Zheng e Chen (2015)	AME	SSO	Indústria química
D'Souza et al. (2016)	SG	SSO	Militar

**Fonte:** Próprio autor.

## 2.4. Horizontes Rolantes

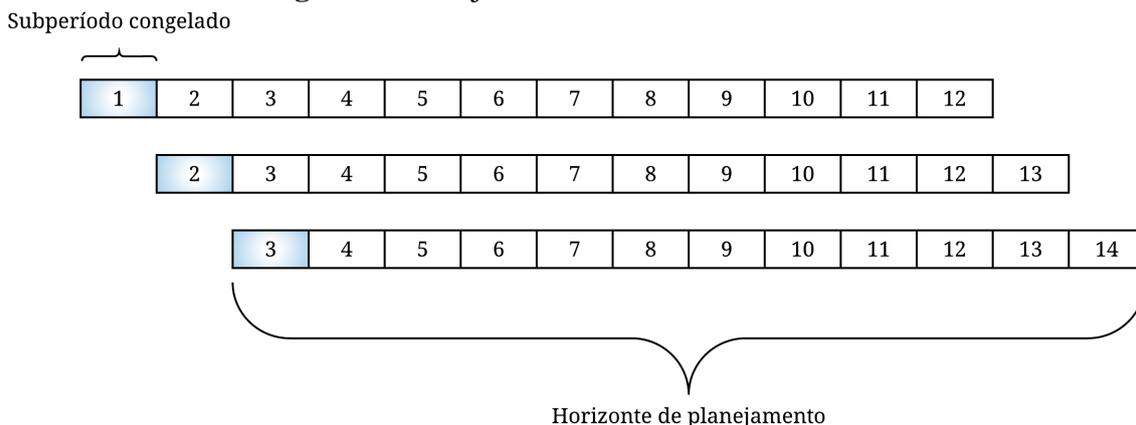
Uma possível solução para o problema da variabilidade da demanda é a técnica de horizontes rolantes. Nessa técnica, segundo Karatas, Craparo e Singham (2015), um problema é resolvido para um horizonte de planejamento longo (decisões estratégicas no caso de composição de frota) e são executados em períodos mais curtos (decisões táticas, no caso de composição de frota), “simulando” um novo conhecimento sobre a demanda e atualizando as informações do horizonte de planejamento conforme as decisões táticas são tomadas. A Figura 8 sintetiza esse processo de forma ilustrativa.

**Figura 8:** Técnica de horizontes rolantes.



**Fonte:** Baseado em Karatas, Craparo e Singham, 2015.

Stadtler e Kilger (2005) também sugerem a técnica de horizontes rolantes para abordar problemas que incorporam variabilidade, e sua descrição está ilustrada na Figura 9.

**Figura 9:** Planejamento sob horizontes rolantes.

**Fonte:** Stadtler e Kilger, 2005. p. 84.

Segundo os autores, um período (1 ano, por exemplo) pode ser dividido em 12 subperíodos de 1 mês e, no início de cada mês, o planejamento (ou decisão) é realizado para os próximos 12 meses. Entretanto, somente a decisão do primeiro período (ou período congelado) é posta em prática. Então, as informações obtidas após a aplicação da decisão no período congelado são inseridas na decisão dos próximos 12 meses.

## 2.5. Conclusões da revisão da literatura

Através da construção da revisão da literatura de problemas de seleção de frota abordados por técnicas de Pesquisa Operacional, pode-se concluir:

- Dos 14 artigos que compõem a seção da revisão referente a técnicas puras de Pesquisa Operacional, 12 utilizaram Otimização como forma de solução para o problema de seleção de frota. Esse dado aponta uma importante lacuna de pesquisa, uma vez que outras técnicas – como Simulação – podem fornecer *insights* e conclusões importantes sobre a solução do problema, além de simplificar algumas etapas dessa solução – como a consideração de parâmetros estocásticos – e possibilitar o detalhamento de operações de forma mais aderente à realidade sem aumentar drasticamente o tempo de execução do algoritmo;
- Ainda, dentre os 12 artigos que utilizaram Otimização pura para a abordagem do problema, 10 fizeram uso de heurísticas para a composição do algoritmo de solução. Adicionalmente, observa-se que 60% desses artigos utilizaram uma combinação de heurísticas para diminuir o esforço computacional e/ou aumentar o desempenho da solução, uma vez que instâncias reais de um problema de seleção de frota são de difícil solução por algoritmos clássicos;

- Em artigos que utilizaram a Otimização, a consideração de parâmetros estocásticos (em demanda ou tempos de deslocamento, por exemplo) foi um ponto fraco. Em números gerais, a variabilidade foi considerada de forma muito simplificada (30%), muito complexa (30%) ou não foi considerada (50%), apontando mais uma lacuna de pesquisa: a consideração de parâmetros estocásticos de forma eficiente e representativa;
- Os artigos de Simulação consideram a variabilidade de forma adequada. Entretanto, os cenários testados para a escolha da composição da frota são baseados na percepção dos analistas, fornecendo somente estimativas acerca da melhor solução. Ainda, um dos trabalhos é baseado na SBA – método recente e complexo que pode dificultar ainda mais a tomada de decisão;
- Dos artigos com abordagem híbrida (compostos por técnicas combinadas de Otimização e Simulação), 58% foram baseados na estrutura OSI, apontando uma tendência de simplificação na consideração de variabilidade no problema de seleção de frota. Os outros artigos estavam divididos em SOI (25%) e SSO (17%);
- Nenhum trabalho híbrido utilizou o método ASO (Simulação-otimização alternada) para a abordagem do problema;
- Os métodos desenvolvidos para a solução do problema de seleção de frota através de técnicas híbridas são em geral mais práticos e de mais simples compreensão – critérios geralmente decisivos para a utilização como ferramenta para tomadores de decisão;
- À medida que as decisões operacionais (ou de curto prazo) devem ser tomadas, o detalhamento necessário torna intratável a modelagem e solução por métodos exatos, como a otimização. Dessa forma, a utilização de simulação é relevante para a modelagem detalhada de operações e variáveis, ao passo que a utilização da otimização é importante para guiar a busca por uma solução boa o suficiente;
- Nenhum trabalho aplicou o método desenvolvido em um problema real de transporte de bens de consumo, embora alguns trabalhos híbridos tenham considerado instâncias genéricas para os experimentos.

Dessa forma, é possível perceber a necessidade de se estudar a eficiência de modelos híbridos de Pesquisa Operacional aplicados em problemas de seleção de frota. Esse estudo é feito conforme detalhado na Seção 3 desse trabalho, através da confecção de um modelo SSO (Simulação-otimização sequencial) que represente a realidade de transporte de bens de

consumo e sua performance será testada tanto em critérios de resultados absolutos quanto em eficiência computacional.



### 3. METODOLOGIA

A estrutura desta seção é delineada pela sequência na qual o estudo foi desenvolvido. Inicialmente, a pesquisa é caracterizada conforme seus objetivos e procedimentos técnicos. Em sequência, as etapas do estudo são apresentadas, descrevendo o seu escopo e as abordagens utilizadas. Posteriormente, as metodologias isoladas para modelagem em simulação e otimização de sistemas são descritas. Por fim, o método de interação entre os modelos construídos é exposto, seguido pelas demais informações inerentes ao estudo – como os parâmetros considerados e as análises efetuadas.

#### 3.1. Caracterização da pesquisa

Segundo Gil (2002), essa pesquisa pode ser classificada como explicativa quanto ao seu objetivo, uma vez que busca identificar fatores que contribuem para a ocorrência de um fenômeno, representado pela possível melhoria de resultados através de uma aplicação de um método híbrido para a solução de um problema. Ainda, com relação aos procedimentos técnicos utilizados, a pesquisa é classificada segundo Yin (2010) como um estudo de caso, pois estuda um fenômeno contemporâneo no contexto da vida real onde o investigador tem pouco controle sobre os eventos e busca responder questões do tipo “como” e “por que”.

Adicionalmente, a pesquisa é caracterizada quanto à abordagem conforme Bertrand e Fransoo (2002) como quantitativa baseada em modelos, uma vez que é “baseada na premissa de que um modelo objetivo pode ser construído para explicar o comportamento (ou parte deles) de processos operacionais da vida real”. Além disso, os autores destacam a relação causal e quantitativa entre as variáveis do sistema nesse tipo de pesquisa, onde uma alteração quantitativa mensurável em uma variável independente  $x$  do sistema ocasiona uma variação  $f(x)$  quantitativa mensurável em uma variável dependente do sistema.

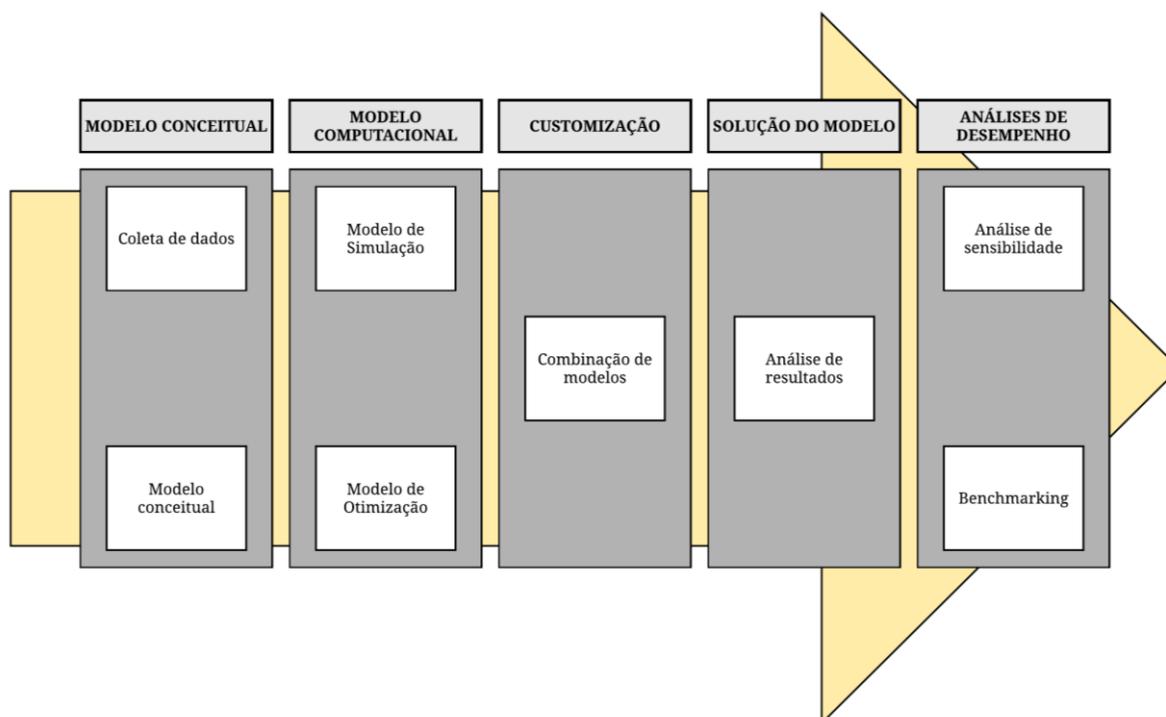
Mais especificamente, a presente pesquisa pode ser classificada quanto à sua natureza, conforme descrito por Morabito e Pureza (2010, p. 183), como empírica normativa. Esse tipo de pesquisa tem como característica o desenvolvimento de “normas, políticas, estratégias e ações que melhorem a situação corrente”, “...podendo ser baseada em modelos de otimização (ou programação) matemática”, além da utilização de dados reais coletados para a criação de instâncias. Usualmente, esse tipo de pesquisa é construído sobre pesquisas teóricas com modelos já desenvolvidos e validados para a solução (BERTRAND e FRANSOO, 2002).

Entretanto, observa-se que o estudo também pode ser classificado como axiomático normativo, pois tem como objetivo “encontrar uma solução ótima para um problema novo ou comparar o desempenho de estratégias que tratam um mesmo problema” (MORABITO e PUREZA, 2010, p.179). Em outras palavras, o estudo também tem como objetivo propor um novo método para a solução de um problema já existente (e resolvido através de outros métodos).

De fato, como mencionado ainda por Morabito e Pureza (2010), apesar de geralmente a classificação de pesquisa científica quantitativa em gestão da produção e operações se dividir entre quatro tipos puros (axiomática descritiva, axiomática normativa, empírica descritiva e empírica normativa), é possível encontrar métodos que combinem essas classificações.

### **3.2. Procedimentos de pesquisa**

A estrutura geral do estudo é descrita na Figura 10, adaptada de Bertrand e Fransoo (2002). Em seu trabalho, os autores definem as etapas de modelagem para pesquisas empíricas normativas como “conceitualização – modelagem – solução do modelo – implementação”. No presente estudo, de forma complementar, foram adicionadas as etapas de customização, referente à combinação dos modelos de simulação e otimização construídos, e de análises de desempenho, responsável pelas análises de sensibilidade e comparação com o método puro de otimização. Ainda, a etapa de implementação foi subtraída, uma vez que o objetivo da pesquisa é a proposição de um método e a comparação com métodos já existentes.

**Figura 10:** Etapas do estudo.

**Fonte:** Adaptado de Bertrand e Fransoo, 2002.

As etapas do estudo ilustradas anteriormente são detalhadas nas seções de 1.2.1. a 1.2.5.

### 3.2.1. Modelo conceitual

Na etapa de modelagem conceitual, foram realizadas as atividades de coleta de dados e construção do modelo conceitual propriamente dito. Os dados utilizados para o teste do modelo fazem parte de um recorte do problema de seleção de frota de uma distribuidora de bens de consumo com atendimento nacional e são referentes ao ano de 2014. As Tabelas de 29 a 44 (presentes no Apêndice) apresentam os dados de entrada para a participação de transportadores, quantidade e capacidade de veículos, tempos, demanda periódica e custos. Ressalta-se que a duração do período foi fixada em 10 dias devido à característica dos dados de demanda diários, que aproximadamente, a cada 10 dias, possuem variações consideráveis.

A Tabela 29 descreve a participação (ou não) dos transportadores no atendimento da demanda apresentada. Essa tabela foi traduzida em linguagem binária com o objetivo de possibilitar a leitura pelos *softwares* de otimização e simulação. Para os casos onde a participação de determinado transportador em uma rota é possível, os modelos construídos receberam o valor “1”. Caso contrário, receberam o valor “0”.

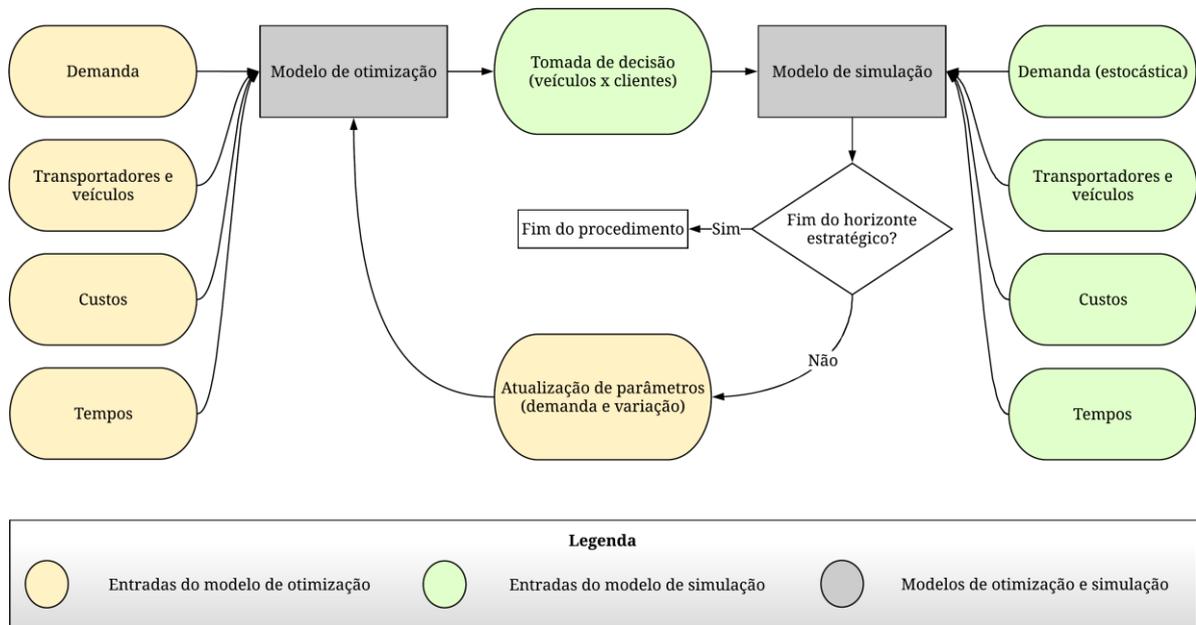
As Tabelas 30 e 31 exibem a quantidade de veículos por tipo disponibilizada por cada um dos transportadores e as capacidades desses veículos, respectivamente. Vale destacar que o primeiro parâmetro (quantidade de veículos disponíveis) pode ser utilizado de três formas: de forma fixa, onde essa quantidade máxima de veículos utilizada não pode ultrapassar os valores fornecidos pelos transportadores; de forma irrestrita, onde o próprio modelo de otimização sugere a quantidade de veículos que deve ser disponibilizada por esses transportadores; ou uma combinação dessas duas formas, onde alguns veículos são fixados e outros são considerados de forma irrestrita. No presente estudo, a limitação máxima foi considerada para todos os transportadores.

Por sua vez, a Tabela 32 contém os valores de tempo de uma viagem entre o embarcador e os clientes. As Tabelas 33-35 apresentam a demanda por período prevista para cada cliente. Essa demanda é considerada de forma diária no modelo de simulação e periódica no modelo de otimização.

Por fim, as Tabelas 36-44 apresentam os custos dos seis tipos de veículos para cada um dos nove transportadores disponíveis efetuar o transporte do embarcador até cada cliente. Esses valores são compostos por todos os custos associados à viagem, como custos de combustível, pedágio, salário do motorista, entre outros. Além disso, destaca-se que não existem custos fixos associados à quantidade de veículos contratados por período – uma vez que o transportador já inclui esses custos no frete por solicitação de transporte.

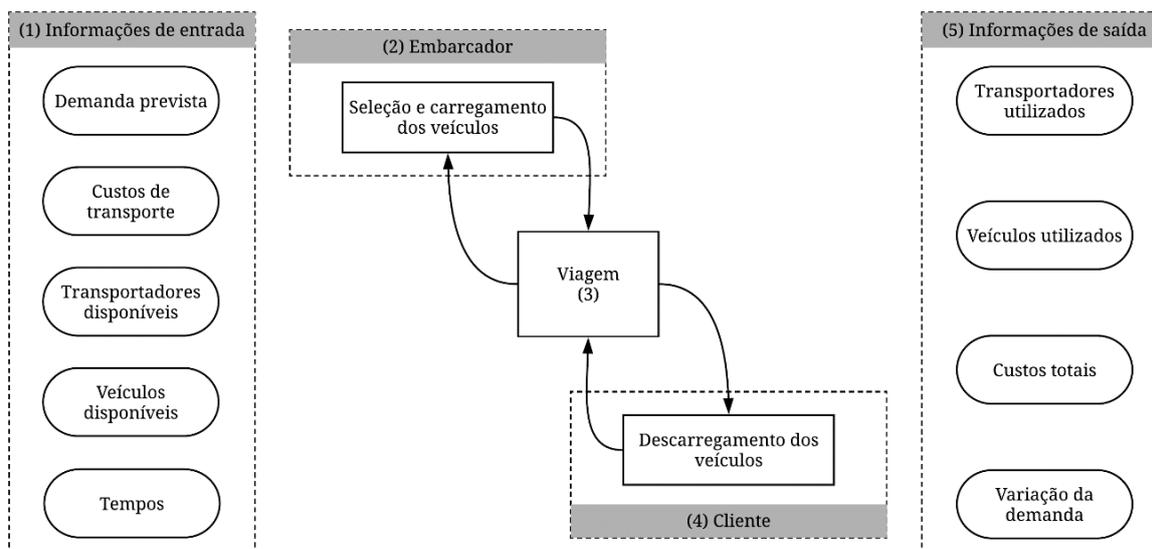
Paralelamente, realizou-se a atividade de construção do modelo conceitual que, conforme mencionado por Morabito e Pureza (2010), representa uma descrição verbal na qual uma parte das variáveis do sistema é considerada. Em outras palavras, trata-se de uma abstração do problema real em um modelo analítico ou experimental, representado de maneira simplificada ou esquematizada, servindo de apoio às próximas etapas. Os modelos conceituais do presente estudo estão ilustrados nas Figuras 11 e 12.

**Figura 11:** Modelo conceitual do estudo completo.



**Fonte:** Próprio autor.

A Figura 11 representa o modelo conceitual de toda a construção realizada para a obtenção dos resultados desejados. Nela, é possível observar as entradas determinísticas do modelo de otimização (que são parcialmente representadas pelas saídas do modelo de otimização), uma “caixa preta” representando o modelo de otimização, as entradas do modelo de simulação (que são parcialmente representadas pelas saídas do modelo de simulação) e uma “caixa preta” representando o modelo de simulação. Para os modelos de otimização e simulação, representados anteriormente pelas “caixas pretas”, foi criado um único modelo conceitual representado na Figura 12.

**Figura 12:** Modelo conceitual do sistema.

**Fonte:** Próprio autor.

Na Figura 12, observam-se as 5 principais atividades de modelagem realizadas. Primeiramente, foram adicionadas as (1) informações de entrada do modelo, compostas pela demanda prevista (com consideração estocástica no modelo de simulação), os custos de transporte (que podem ser compostos por diversos custos, como custo da viagem), transportadores e veículos disponíveis (que são restritos após a execução do modelo de otimização) e tempos (como tempos de viagem, carregamento, descarregamento, descanso e troca de motoristas). Essas informações foram então utilizadas pela segunda atividade, responsável por selecionar o veículo e efetuar o carregamento do mesmo no (2) embarcador. O veículo então passa pela terceira atividade, a (3) viagem até o cliente. Em sequência, na quarta atividade, os veículos são descarregados no (4) cliente para, por fim, retornarem ao embarcador para uma próxima viagem. A última atividade é representada pela extração das (5) informações de saída do modelo, como os custos totais, a configuração da frota utilizada (como por exemplo se foram necessários veículos SPOT no modelo de simulação) e o comportamento da demanda quando considerada a estocasticidade.

Em complementação ao modelo conceitual previamente descrito, algumas premissas foram consideradas nos modelos computacionais. As premissas listadas abaixo são divididas em premissas do modelo de simulação (S), premissas do modelo de otimização (O) e premissas de ambos os modelos (S+O).

- A demanda no modelo de simulação é considerada dia a dia, e varia estocasticamente entre -10% e + 10% da demanda prevista (S);

- A demanda no modelo de otimização é considerada de forma determinística consolidada, em 36 períodos de 10 dias (O);
- O tempo total de uma solicitação de transporte é considerado como a soma de todos os tempos – carregamento, viagem e descarregamento (S+O);
- Toda viagem parte de um mesmo ponto de origem (embarcador), vai até um ponto de destino (cliente) e retorna ao ponto de origem (S+O);
- Cada viagem corresponde à entrega de uma e somente uma carga completa de um caminhão. Viagens com duas ou mais entregas não foram consideradas (S+O);
- Os veículos são selecionados pelo custo de viagem associado à sua utilização e a sua disponibilidade conforme solicitada (S+O);
- O nível de serviço entregue deve ser sempre 100%. Caso ocorra falta de veículos para o atendimento, um veículo SPOT é contratado (S+O);
- Não são permitidos atrasos nem adiantamentos das entregas. Todas as entregas devem ser realizadas no dia estipulado (S+O);
- A participação ou não (capacidade de atendimento) dos transportadores nas rotas é definida *a priori* (S+O);
- A quantidade de veículos utilizada para cada rota é flexível e pode mudar a cada período de 10 dias (S+O);
- As docas de expedição (embarcador) e recebimento (cliente) estão sempre disponíveis para utilização pelos veículos e possuem capacidade infinita (S+O);
- Os custos de viagem dos transportadores são os mesmos para todos os períodos do horizonte de planejamento (S+O);
- O custo de contratação de veículo SPOT é 30% maior que o maior custo dentre os transportadores que atendem aquela rota (S+O);
- Os veículos SPOT possuem participação em todas as rotas possíveis (S+O);
- O transportador que representa os veículos SPOT possui quantidade infinita de veículos (S+O);
- Os veículos estão disponíveis para utilização 24 horas por dia, 7 dias por semana, 30 dias por mês, bem como as docas de expedição e de recebimento de cargas (S+O).

A interação entre os modelos de otimização e simulação é melhor detalhada na seção 3.2.3. (Customização) deste trabalho.

### 3.2.2. Modelos computacionais

A fase de modelagem computacional é representada pela construção do modelo quantitativo propriamente dito. Conforme Bertrand e Fransoo (2002), é nessa fase onde o pesquisador define as relações causais entre as variáveis do sistema. Nesse estudo, que contempla dois modelos que devem ser construídos separadamente, a modelagem computacional foi separada em dois subitens: modelo de otimização e modelo de simulação.

#### 3.2.2.1. Modelo de otimização

O modelo utilizado no presente estudo foi baseado no trabalho de Mardaneh, Lin e Loxton (2016), onde os autores propõem um modelo de otimização em duas etapas para compor uma frota de veículos heterogêneos, considerando custos fixos e variáveis de aquisição. No presente estudo, são considerados somente custos de contratação, uma vez que o embarcador em questão não possui frota própria. Adicionalmente, Mardaneh, Lin e Loxton (2016) consideram que um veículo pode realizar o atendimento de mais de um cliente por viagem, através de arcos. Em contrapartida, o modelo do presente estudo considera somente o atendimento de um cliente por viagem, sem necessidade de roteamento. O modelo matemático de programação linear inteira-mista completo utilizou a seguinte notação:

#### Índices:

$m$  = Tipo de veículos potenciais para compor a frota;

$n$  = Transportadoras potenciais para compor a frota;

$i$  = Clientes a serem atendidos;

$p$  = Períodos.

#### Conjuntos:

$M$  = Tipos de veículos disponíveis disponíveis, com  $M = \{v1, v2, v3 \dots v6\}$ ;

$N$  = Transportadoras disponíveis para compor a frota, com  $N = \{n1, n2, n3 \dots n10\}$ ;

$I$  = Clientes a serem atendidos, com  $I = \{i1, i2, i3 \dots i30\}$

$P$  = Períodos do horizonte de planejamento, com  $P = \{p1, p2, p3 \dots p36\}$ .

#### Parâmetros de entrada:

$D_i$  = Demanda do cliente  $i$  (em unidades volumétricas);

$\Delta D_i$  = Variação na demanda do cliente  $i$  nos últimos períodos (em %);

$C_{m,n,i}$  = Custo de transporte do veículo  $m$  da transportadora  $n$  para o cliente  $i$  (em u. m.<sup>1</sup>);

$Cap_m$  = Capacidade do veículo  $m$  (em unidades volumétricas);

$T_i$  = Tempo para atender o cliente  $i$  (em dias);

$P_{n,i}$  = Participação da transportadora  $n$  no atendimento do cliente  $i$  (0 ou 1);

$V_{m,n}$  = Quantidade máxima de veículos  $m$  fornecidos pela transportadora  $n$ ;

$L$  = Quantidade de dias disponíveis no período;

$B$  = Valor suficientemente grande.

### Variáveis de decisão:

$r_{m,n}$  = Quantidade de veículos  $m$  requeridos na transportadora  $n$ ;

$q_{m,n,i,p}$  = Nº de viagens da transp.  $n$  com o veículo  $m$  para atender o cliente  $i$  no período  $p$ .

### Função objetivo:

$$F(q_{m,n,i,p}, r_{m,n}) = \min \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} C_{m,n,i} \cdot q_{m,n,i,p} \quad (1)$$

### Sujeito à:

$$\sum_{i \in I} q_{m,n,i,p} * 2 * T_i - L * r_{m,n} \leq 0, \quad \forall m \in M, \forall n \in N, \forall p \in P \quad (2)$$

$$r_{m,n} \leq V_{m,n}, \quad \forall m \in M, \forall n \in N \quad (3)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{n \in N} q_{m,n,i,p} * Cap_m \geq D_{i,p} * (1 + \Delta D_{i,p}), \quad \forall i \in I, \forall p \in P \quad (4)$$

$$^1 \sum_{m \in M} q_{m,n,i,p} \leq P_{n,i} * B, \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (5)$$

$$q_{m,n,i,p}, r_{m,n} \in Z^+ \quad (6)$$

A equação (1), que representa a função objetivo do modelo, busca minimizar os custos totais de viagem (resultado da soma dos produtos do custo de cada viagem de cada transportador para cada cliente utilizando cada tipo de caminhão e a quantidade dessas viagens). A equação (2), por sua vez, descreve a restrição de capacidade de veículos, considerando a disponibilidade de 10 dias por período por veículo contratado. A restrição (3) limita a quantidade de veículos contratados à quantidade disponibilizada pelo transportador. A próxima equação, (4), garante que a demanda de todos os clientes será atendida. Nessa equação é possível observar um fator de variação ( $\Delta D_{i,p}$ ), que representa o resultado de variação (em

---

<sup>1</sup> Unidades monetárias

%, positiva ou negativa) na demanda do cliente  $i$  fornecido pelo modelo de simulação. Em seguida, a equação (5) restringe o atendimento de cada transportador à sua participação naquela rota. Por fim, a equação (6) descreve o domínio das variáveis de decisão,  $q_{m,n,i,p}$  e  $r_{m,n}$ , no conjunto dos números inteiros positivos.

Para a implementação do modelo, utilizou-se o *software* GAMS (*General Algebraic Modeling System*) com pacote de solução CPLEX, executado na versão 24.1.3 demonstrativa em um processador Intel® i5-4460 de 3.2GHz. O critério de parada do modelo de otimização foi a obtenção de um *gap* relativo de 0.002 ao melhor limitante inferior.

### 3.2.2.2. Modelo de simulação

A construção do modelo de simulação foi realizada através do *software* ProModel® 2016 (versão estudantil), onde foram criadas lógicas flexíveis que possibilitam a importação dos parâmetros de entrada e exportação dos resultados através de uma interface com uma planilha de dados.

Nesse modelo, foram criados três linhas de processos principais: (1) a seleção de veículos e o carregamento no embarcador, (2) o descarregamento no cliente e (3) um processo auxiliar, responsável por controlar todas as lógicas de importação, exportação e inicialização do modelo. A viagem, por sua vez, foi representada por um deslocamento entre o embarcador e o cliente. Ainda, adicionalmente aos processos e roteamentos do modelo, foram criadas sub-rotinas, variáveis, matrizes e atributos, com o objetivo de facilitar a programação das lógicas do modelo e possibilitar a importação dos dados de entrada, exportação dos resultados e o controle dos parâmetros do sistema simulado.

Na inicialização do modelo é realizada a importação dos dados inseridos na planilha de entrada em matrizes. Essas matrizes são utilizadas durante toda a simulação para controle das quantidades de veículos disponíveis, da demanda a ser atendida e dos tempos a serem utilizados. Em seguida, é gerada uma entidade que representa o veículo, selecionando, dentre os veículos disponíveis na matriz de importação, o de menor custo por metro cúbico de capacidade. Caso nenhum veículo esteja disponível, é gerado então um veículo SPOT. A entidade “veículo”, então, passa por um carregamento e é roteada até o cliente por um determinado tempo. Ao chegar no cliente, essa entidade é descarregada e novamente roteada para o embarcador. Esse ciclo de processos se repete até que o horizonte de 10 dias de execução do modelo seja finalizado ou a demanda seja totalmente atendida. Na finalização, a entidade

auxiliar aciona sub-rotinas que realizam a exportação dos veículos e transportadores utilizados e do comportamento da demanda no período simulado.

A seguir, é descrito o algoritmo baseado na estrutura *if-then-else* utilizado para a seleção e geração de veículos no modelo de simulação.

**Algoritmo 1:** Seleção e geração de veículos no modelo de simulação.

**While** dia  $\leq$  30 **Do:**

**While** cliente (i)  $\leq$  30 **Do:**

Início:

**While** demanda (Di,p)  $>$  0 **Do:**

Verificar se algum transportador possui veículos para atendimento;

**If** veículos\_disponíveis = 0, **then:**

Solicitar spot;

Subtrair a demanda transportada pelo veículo;

Ir para Início.

**If** veículos\_disponíveis  $>$  0, **then:**

Sortear o transportador baseado na tabela de participação;

Selecionar o veículo com menor custo/m<sup>3</sup> daquele transportador;

Subtrair a demanda transportada pelo veículo;

Subtrair a quantidade de veículos disponíveis;

Gerar uma entidade “veículo”.

**End While.**

Cliente++;

**End While.**

Espere 1 dia;

Dia++;

**End While.**

Percebe-se, através do Algoritmo 1, que a seleção dos veículos e transportadores é feita de forma diferente se comparada à seleção realizada no modelo de otimização. No modelo de

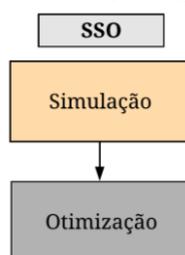
simulação, para cada dia, o algoritmo analisa por cliente (do 1 ao 30) a disponibilidade de transportadores com veículos para o atendimento. Se o Transportador 1, por exemplo, possuir participação no atendimento das solicitações de transporte do Cliente 1 e possuir veículos disponíveis, essa rota será alocada a ele. Dessa forma, o modelo de simulação não busca dimensionar a frota de forma a minimizar os custos totais, mas sim alocar de forma ágil e simples as rotas aos veículos disponíveis.

A verificação do modelo foi feita de forma minuciosa, analisando os códigos de programação em busca de erros de sintaxe ou lógica que pudessem interferir no comportamento das variáveis no resultado fornecido, bem como analisando detalhadamente a animação do modelo. Por fim, a exportação dos dados de interesse foi feita em duas tabelas separadas. A primeira tabela é responsável pela exportação dos resultados de variação de demanda. Nela, são calculadas as variações absolutas e médias por cliente automaticamente. Paralelamente, a segunda tabela de exportação é responsável pelo registro dos dados das variáveis “Quantidade total de viagens realizadas”, “Quantidade total de viagens SPOT realizadas” e “Máximo de veículos SPOT contratados simultaneamente”.

### 3.2.3. Customização

A etapa de customização do método é responsável pela interação entre os modelos de otimização e simulação previamente descritos. A sua fundamentação acontece sob a ótica da taxonomia proposta por Figueira e Almada-Lobo (2014), onde os modelos podem interagir de diversas formas. No presente estudo, a interação foi representada pela estrutura hierárquica SSO, onde modelos de simulação e otimização foram executados sequencialmente a cada período de 10 dias até que o fim do horizonte estratégico fosse alcançado. Essa estrutura é ilustrada na Figura 13.

**Figura 13:** Estrutura hierárquica para combinação SO.



**Fonte:** Figueira e Almada-Lobo, 2014.

Conforme mencionado por Banks (1998) e Freitas Filho (2008), os modelos de simulação são capazes de fornecer respostas dinâmicas e análises temporais para sistemas que ainda não existem ou que possuem experimentos impraticáveis. No caso da seleção de frota, por exemplo, os testes reais necessários para a tomada de decisão perfeita são impossíveis – uma vez que a decisão deve ser tomada para um horizonte futuro. Por outro lado, segundo Arenales et al. (2007) e Hillier e Lieberman (2006), os modelos de otimização utilizam variáveis e restrições que representam o sistema real matematicamente e propõem uma solução única e exata para uma questão de pesquisa.

Dessa forma, fica clara a possível complementação entre as técnicas – que possuem o mesmo objetivo geral, mas fornecem respostas diferentes para uma mesma questão. Ao passo que a simulação possibilita a análise dinâmica e temporal dos resultados e a modelagem de sistemas mais complexos de forma menos árdua, a otimização busca fornecer a melhor resposta para o problema modelado.

No presente caso de seleção de frota, sabe-se que a decisão da composição da frota para o longo prazo (horizonte estratégico) deve ser tomada *a priori*, no início do horizonte. Em outras palavras, essa decisão é baseada apenas em estimativas, uma vez que não se sabe ao certo como as variáveis inerentes ao sistema (demanda, por exemplo) irão se comportar, tornando insuficiente a utilização de modelos de otimização puros e determinísticos para o auxílio à tomada de decisão.

Então, no início de cada planejamento estratégico de longo prazo – quando os decisores devem selecionar os transportadores e veículos que comporão sua frota – a ferramenta deve ser executada. A combinação entre os dois modelos computacionais ocorre através de uma planilha de dados, onde os mesmos são exportados pelo *software* de simulação e transferidos para o *software* de otimização, e vice-versa.

Essa execução foi realizada conforme ilustrado na Figura 13, elaborada por Figueira e Almada-Lobo (2014). Em um primeiro momento, o modelo de otimização foi executado e forneceu a solução de composição de frota para todo o horizonte estratégico (1 ano, ou 36 períodos de 10 dias). Essa primeira execução é similar às propostas em estudos de otimização determinística de seleção de frota, onde o modelo simplesmente calcula quais veículos devem compor essa frota, sem a consideração de variabilidade, como em Halvorsen-Weare et al. (2012).

Após essa seleção de veículos e transportadores, o modelo de simulação foi executado para que a composição da frota do primeiro período, de 10 dias, fosse testada. Nesse momento, foi possível adicionar parâmetros que aproximem o modelo da realidade, como valores de demanda estocásticos. Ao final do período rodado, o modelo de simulação forneceu indicadores do comportamento do sistema com relação ao atendimento das demandas daquele período (como a necessidade de contratação de veículos SPOT para atendimento de um cliente no período), ocasionadas por variabilidades e características associadas aos parâmetros que não foram consideradas no modelo de otimização.

O indicador de variação da demanda resultante da simulação (que pode ser positivo ou negativo) foi inserido na próxima rodada do modelo de otimização. Esse indicador de variação na demanda deve ser cuidadosamente manipulado, uma vez que os períodos são considerados de forma independente (a causa da variação existente em um período pode não ser a mesma do próximo período, por exemplo). Dessa maneira, considerar que uma variação ocorrida no primeiro período ocorrerá também no segundo período possui alto risco envolvido. Então, esse indicador foi abordado através do método de médias móveis, onde são combinadas as variações dos três últimos períodos de interesse para prever a variação do próximo período, com o objetivo de considerar o histórico da demanda de forma suavizada e simplificada. Vale ressaltar, ainda, que outros métodos de previsão de demanda (ou da variação) poderiam ser utilizados nessa etapa. Entretanto, por não ser o objetivo do trabalho, um método simples foi utilizado para a consideração dessa variação. Adicionalmente, a demanda simulada no período (já considerando a variabilidade) foi coletada para a consideração nas próximas rodadas de otimização, uma vez que essa simulação representa a demanda “real” daquele período.

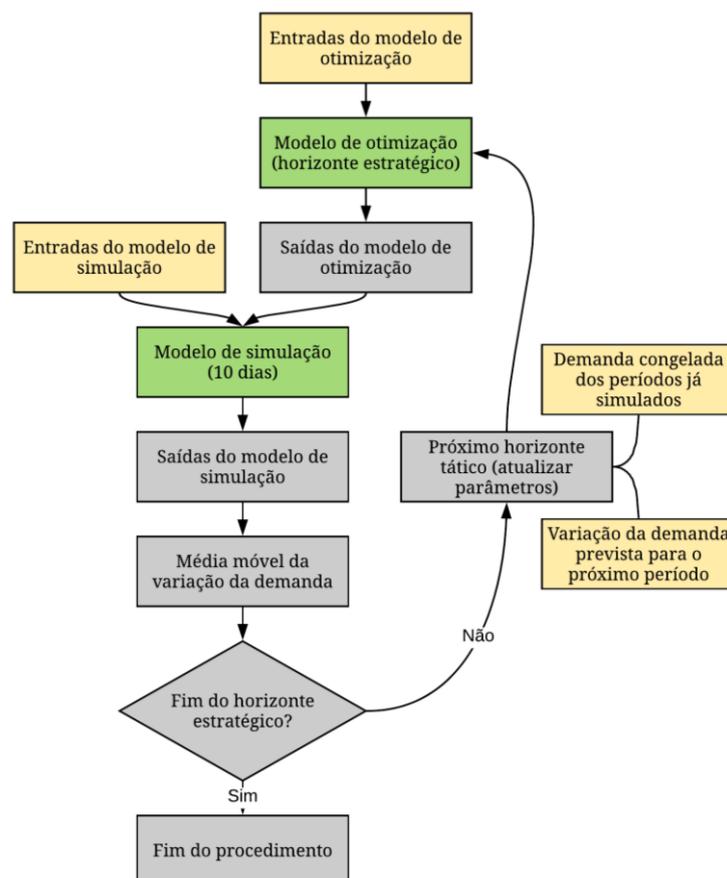
Com o indicador de variação na demanda consolidado e a demanda do período simulado congelada, as rotas foram realocadas aos veículos através de uma nova rodada de otimização. Essa nova rodada de otimização teve a duração do horizonte estratégico (36 períodos), uma vez que a realocação devia ser feita periodicamente.

A realocação periódica foi baseada na técnica de horizontes rolantes, conforme descrito em Karatas, Craparo e Singham (2015) e ilustrada na Figura 8. Segundo os autores, a incerteza associada à previsão aumenta conforme a demanda prevista se distancia. Dessa forma, torna-se necessária a utilização de uma técnica iterativa que possibilite a atualização de informações no modelo de otimização. Nessa técnica, o modelo é resolvido para um horizonte de planejamento mais longo e as decisões resultantes executadas para um horizonte mais curto.

Após a concretização desse período mais curto, o modelo é novamente resolvido para o horizonte de planejamento. Ainda, segundo os autores, a técnica de horizontes rolantes possui a grande vantagem de não depender em informações perfeitas acerca do futuro, mas possibilitar a incorporação de informações aprimoradas conforme os períodos vão sendo concretizados.

Os parâmetros de utilização dos veículos (nova configuração da frota) foram então considerados no modelo de simulação, que forneceu as informações de variação da demanda para o cálculo da média móvel dos 3 últimos períodos e a demanda simulada para a inserção no modelo de otimização. Esse procedimento foi executado até que o fim do horizonte estratégico fosse alcançado. Ressalta-se, ainda, que o método é flexível e é capaz de aceitar diversos tipos de ajustes no modelo de otimização e simulação durante a iteração dos períodos, como métodos de previsão de demanda mais eficientes. A Figura 14 ilustra a interação completa entre os modelos de simulação e otimização.

**Figura 14:** Método completo para etapa de customização.



**Fonte:** Próprio autor.

A aplicação da técnica de horizontes rolantes, então, se dá através da interação entre os modelos de otimização e simulação. Diferentemente da proposta de Karatas, Craparo e

Singham (2015), a “concretização” da informação no período de execução é, no presente estudo, realizada pela simulação. Além disso, é importante destacar que o horizonte estratégico se mantém o mesmo (36 períodos) até o fim da execução do método, de forma diferente da técnica clássica de horizontes rolantes, onde o tamanho do horizonte estratégico se mantém fixo e avança no tempo. Dessa forma, o método agrega a possibilidade de tomada de decisão sob informações imperfeitas à possibilidade de antecipação das previsões realizadas.

#### **3.2.4. Solução do modelo**

A etapa de solução do modelo é referente à análise dos resultados obtidos através da execução do método completo. Para a análise, os resultados obtidos em cada iteração do método foram processados e compilados em planilhas. Os principais indicadores coletados foram:

- Variações na demanda período a período (10 dias), por cliente;
- Tipos e quantidades de veículos de cada transportador selecionado;
- Quantidade simultânea máxima de veículos SPOT contratados em cada período;
- Quantidade de viagens SPOT realizadas em cada período;
- Quantidade de viagens realizadas por período;
- Custos totais associados às viagens.

Todos os resultados destacados são apresentados na seção 4 desse trabalho.

#### **3.2.5. Análises de desempenho**

Uma importante prática na construção de um estudo científico é a avaliação de seu desempenho sob diversas óticas. Esse desempenho pode, por exemplo, ser avaliado através da comparação com outros métodos e ferramentas ou através da variação de parâmetros-chave considerados que comprovem (ou refutem) a sua validade e representatividade.

A fase de análise de desempenho desse estudo foi dividida em duas partes. Inicialmente foram realizadas análises de sensibilidade em um parâmetro considerado sob variabilidade: demanda. Os cenários criados a partir das variações encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 3:** Cenários executados para análise de sensibilidade.

<b>Cenário</b>	<b>Descrição</b>
1	Demanda prevista estocástica com variações entre -10% e +10%
2	Demanda prevista estocástica com variações entre -30% e +30%
3	Demanda prevista estocástica com variações entre 0% e +30%

**Fonte:** Próprio autor.

Esses cenários foram construídos a partir da variação dos limites de variabilidade da demanda prevista, ao ser simulada. Com essa análise, é possível analisar qual o impacto da imprevisibilidade da demanda na contratação ou não de mais veículos eventuais, bem como a proximidade entre os resultados fornecidos pelo modelo de otimização e os resultados fornecidos pelo modelo de simulação, uma vez que o modelo de otimização toma decisões determinísticas considerando o horizonte estratégico como um todo e o modelo de simulação se utiliza de informações a curto prazo para tomar decisões estritamente operacionais. Dessa forma, deve tornar-se clara a importância da consideração de características estocásticas e dinâmicas nos problemas de composição de frota.

Por sua vez, a segunda parte representa a discussão entre os resultados obtidos pelo método combinado e os resultados fornecidos pelo modelo puro de Otimização, sem a consideração de variabilidade e horizontes rolantes. Mais uma vez, essa análise é responsável por apontar a necessidade da consideração de características complexas inerentes ao sistema na análise (como a dinâmica da utilização de veículos e a variabilidade da demanda), com o objetivo de fornecer resultados melhor fundamentados para a tomada de decisão.



## 4. RESULTADOS

### 4.1. Cenário 1

No Cenário 1 (C1), a demanda prevista é estocástica com variações entre +10% e -10%, no modelo de simulação. Para o referido cenário, foram coletadas as informações de veículos e transportadores utilizados por período, quantidade simultânea máxima de veículos SPOT contratados por período, quantidade de viagens SPOT realizada por período, variações na demanda período a período por cliente e custos. Adicionalmente, foram coletados os tempos de execução de cada um dos modelos, com o objetivo de mensurar os esforços computacionais necessários para a obtenção dos resultados mencionados. Para o modelo de otimização, cada período demandou aproximadamente 20 segundos para ser executado, totalizando 720 segundos (12 minutos) para todos os períodos. Por sua vez, cada período do modelo de simulação demandou aproximadamente 3 segundos para ser executado, totalizando 108 segundos (1.8 minutos). Dessa forma, o tempo total de execução para esse cenário foi de 13.8 minutos, demonstrando um baixo esforço computacional – uma vez que boa parte desse tempo corresponde à inicialização, à importação e à exportação de dados em ambos os modelos.

Para os veículos utilizados por período, foram criadas 36 tabelas para cada modelo e, ao final da execução da ferramenta, o valor máximo de cada combinação *veículo x transportador* foi reservado, gerando as Tabelas 4 e 5.

**Tabela 4:** Quantidade máxima de veículos utilizados por transportador (Otimização; C1).

Transportador	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Veículo 5	Veículo 6
Transportador 1	8	-	111	136	5	12
Transportador 2	2	8	74	36	-	2
Transportador 3	-	-	2	-	-	-
Transportador 4	-	-	160	109	-	43
Transportador 5	-	-	13	7	-	2
Transportador 6	-	-	13	118	3	46
Transportador 7	-	-	78	24	-	3
Transportador 8	-	-	2	3	-	2
Transportador 9	28	-	76	3	2	-

Fonte: Próprio autor.

**Tabela 5:** Quantidade máxima de veículos utilizados por transportador (Simulação; C1).

Transportador	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Veículo 5	Veículo 6
Transportador 1	7	-	111	136	5	12
Transportador 2	1	8	74	36	-	2
Transportador 3	-	-	2	-	-	-
Transportador 4	-	-	160	87	-	-
Transportador 5	-	-	13	7	-	2
Transportador 6	-	-	13	118	-	35
Transportador 7	-	-	78	22	-	3
Transportador 8	-	-	2	3	-	2
Transportador 9	2	-	76	3	-	-

**Fonte:** Próprio autor.

Se comparadas as Tabelas 4 e 5, observa-se a utilização quase completa da composição da frota sugerida pelo modelo de otimização. Com exceção dos Veículos 1 dos Transportadores 1, 2 e 9, Veículos 4 dos Transportadores 4 e 7, Veículos 5 dos Transportadores 6 e 9 e Veículos 6 dos Transportadores 4 e 6, toda a frota dimensionada pelo modelo de otimização foi acionada durante as rodadas de simulação. Esse resultado indica uma sobrecarga dos veículos para o atendimento quando consideradas as características dinâmicas e estocásticas da simulação. Essa sobrecarga dos veículos se reflete nos resultados disponíveis na Tabela 6.

**Tabela 6:** Resultados para viagens regulares e SPOT por mês (C1).

	Quantidade total de viagens	Quantidade de viagens SPOT	Máximo de SPOTs contratados simultaneamente	Porcentagem de SPOT no total
<b>Período 1</b>	960	-	-	0.0%
<b>Período 2</b>	1,460	29	19	2.0%
<b>Período 3</b>	1,613	28	23	1.7%
<b>Período 4</b>	1,333	15	15	1.1%
<b>Período 5</b>	1,572	38	27	2.4%
<b>Período 6</b>	996	8	8	0.8%
<b>Período 7</b>	1,508	30	19	2.0%
<b>Período 8</b>	1,485	22	22	1.5%
<b>Período 9</b>	1,123	13	13	1.2%
<b>Período 10</b>	1,625	41	32	2.5%
<b>Período 11</b>	1,226	5	5	0.4%
<b>Período 12</b>	1,419	18	10	1.3%

<b>Período 13</b>	1,301	19	19	1.5%
<b>Período 14</b>	1,180	17	17	1.4%
<b>Período 15</b>	1,657	41	33	2.5%
<b>Período 16</b>	1,098	3	3	0.3%
<b>Período 17</b>	1,524	28	19	1.8%
<b>Período 18</b>	1,872	66	53	3.5%
<b>Período 19</b>	1,325	19	19	1.4%
<b>Período 20</b>	1,616	43	33	2.7%
<b>Período 21</b>	1,129	-	-	0.0%
<b>Período 22</b>	1,531	29	21	1.9%
<b>Período 23</b>	1,789	47	39	2.6%
<b>Período 24</b>	1,169	13	13	1.1%
<b>Período 25</b>	1,732	47	33	2.7%
<b>Período 26</b>	1,538	23	23	1.5%
<b>Período 27</b>	1,575	33	19	2.1%
<b>Período 28</b>	1,633	33	27	2.0%
<b>Período 29</b>	1,040	-	-	0.0%
<b>Período 30</b>	1,691	50	39	3.0%
<b>Período 31</b>	2,283	128	100	5.6%
<b>Período 32</b>	1,582	17	17	1.1%
<b>Período 33</b>	1,898	59	43	3.1%
<b>Período 34</b>	1,531	16	16	1.0%
<b>Período 35</b>	1,753	62	46	3.5%
<b>Período 36</b>	2,328	143	114	6.1%

---

**Fonte:** Próprio autor.

Nessa tabela, é possível observar que a quantidade de viagens SPOT realizadas para atendimento – nos casos onde não existiam veículos disponíveis para o transporte – é expressivo, chegando a praticamente 6% das viagens realizadas. Isso acontece devido à dinamicidade e estocasticidade da simulação, além da diferença entre os algoritmos utilizados para a seleção de veículos. Ressalta-se que esse tipo de transporte, apesar da alta disponibilidade, incorre em elevados custos totais. Dessa forma, é desejável utilizá-lo somente



<b>P27</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P28</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P29</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P30</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P31</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
<b>P32</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P33</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P34</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P35</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P36</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
<b>Total</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5

Fonte: Próprio autor.

**Tabela 8:** Quantidade de veículos SPOT simultâneos por cliente (Clientes 16-30; C1).

	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30
<b>P1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P2</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	8	0
<b>P3</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	11	0	0	8	0
<b>P4</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	6	0
<b>P5</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	12	0	1	8	2
<b>P6</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	4	0
<b>P7</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10	0	0	6	0
<b>P8</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	10	0
<b>P9</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	7	0
<b>P10</b>	0	2	0	0	0	3	0	0	2	4	10	0	1	8	2
<b>P11</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	2	0
<b>P12</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	0	5	0
<b>P13</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	7	0	0	8	0
<b>P14</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5	0	0	8	0
<b>P15</b>	0	2	0	0	0	3	0	0	2	4	10	0	1	8	3
<b>P16</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0

P17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	7	0	1	6	2
P18	0	5	0	0	0	8	0	0	6	4	12	0	3	10	6
P19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	8	0	0	8	0
P20	0	2	0	0	0	3	0	0	2	4	11	0	1	8	2
P21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10	0	0	8	0
P23	0	3	0	0	0	4	0	0	2	4	12	0	1	11	2
P24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	0	0	6	0
P25	0	2	0	0	0	4	0	0	2	4	10	0	1	8	2
P26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	11	0
P27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	8	0
P28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	12	0	1	8	2
P29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P30	0	2	0	0	0	3	0	0	4	4	12	0	2	8	4
P31	5	15	6	0	3	17	0	0	10	4	12	0	4	12	10
P32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	8	0
P33	0	2	0	0	0	6	0	0	4	4	12	0	2	9	4
P34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	7	0
P35	0	4	0	0	0	6	0	0	4	4	12	0	2	10	4
P36	6	15	6	0	5	16	0	0	15	6	12	0	4	12	14
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>54</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>73</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>53</b>	<b>115</b>	<b>273</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>255</b>	<b>59</b>

**Fonte:** Próprio autor.

Por meio das Tabelas 7 e 8, é possível fornecer ao tomador de decisão informações importantes acerca dos clientes que possuem maior imprevisibilidade e requerem mais atenção durante o dimensionamento da frota. Por exemplo, é possível observar a alta demanda de veículos SPOT nos clientes 26 e 29. Aliando essa informação à tabela de participação dos clientes (Tabela 29), percebe-se que devem ser alocados mais transportadores (ou mais veículos) à essas rotas, uma vez que as mesmas são atendidas por somente um transportador cada. Adicionalmente, ao comparar a quantidade de veículos dimensionada para o atendimento com os veículos disponibilizados pelos transportadores (Tabela 30), observa-se que diversos

veículos não foram considerados nos períodos otimizados, devido ao fato da otimização não considerar fatores dinâmicos em sua construção.

Novamente, destaca-se que o algoritmo de seleção de veículos no modelo de simulação representa os passos utilizados no dia a dia do embarcador para essa seleção. Esse algoritmo seleciona os transportadores disponíveis, que possuem iguais chances de serem selecionados, aleatoriamente, diferentemente da otimização – que prevê todas as demandas e aloca uma rota para um transportador com a garantia de que aquele transporte irá compor o dimensionamento de menor custo possível.

Outro fator que colaborou com a alta quantidade de viagens do tipo SPOT foi a variação na demanda. Embora a demanda simulada tenha sido menor que a demanda prevista (de 35.036.483 para 34.932.483 unidades volumétricas), a variação na demanda causou um desbalanceamento no dimensionamento dos veículos para cada cliente, ocasionando então uma demanda ainda maior para alguns veículos dimensionados pela ferramenta de otimização. Os resultados para variação na demanda estão descritos nas Tabela 9 e 10.

**Tabela 9:** Variação na demanda por cliente por período (Clientes 1-15; C1).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
<b>P1</b>	-1.9%	0.2%	1.0%	-1.9%	-2.3%	0.3%	-1.1%	1.0%	-1.2%	1.8%	2.7%	-0.1%	0.6%	-0.2%	-1.0%
<b>P2</b>	-2.2%	0.3%	0.9%	-1.4%	-2.2%	0.6%	-1.1%	0.8%	-1.5%	1.3%	2.9%	-0.1%	0.8%	-0.2%	-0.8%
<b>P3</b>	-2.6%	0.8%	0.6%	-0.9%	-1.9%	1.3%	-1.2%	0.6%	-2.5%	0.6%	3.1%	-0.8%	0.5%	-0.2%	-0.5%
<b>P4</b>	-2.1%	0.0%	0.9%	-1.4%	-2.2%	0.9%	-1.0%	1.2%	-1.5%	1.5%	2.7%	-0.7%	0.3%	-0.6%	-0.9%
<b>P5</b>	-2.2%	0.3%	0.9%	-1.4%	-2.2%	0.6%	-1.1%	0.9%	-1.5%	1.5%	2.8%	-0.2%	0.7%	-0.3%	-0.9%
<b>P6</b>	-2.2%	0.1%	1.0%	-1.6%	-2.3%	0.0%	-1.1%	0.9%	-1.0%	2.0%	2.7%	0.4%	1.0%	-0.1%	-1.0%
<b>P7</b>	-2.3%	0.2%	1.0%	-1.4%	-2.3%	0.6%	-1.2%	1.0%	-1.4%	1.4%	2.8%	-0.1%	0.6%	-0.1%	-0.9%
<b>P8</b>	-2.3%	0.9%	0.6%	-0.8%	-1.4%	1.5%	-1.4%	0.8%	-2.3%	0.9%	3.0%	-0.4%	1.2%	-0.8%	-0.6%
<b>P9</b>	-2.0%	0.0%	1.0%	-1.8%	-2.2%	0.5%	-0.9%	0.9%	-1.0%	1.3%	2.8%	-0.2%	0.7%	-0.4%	-0.8%
<b>P10</b>	-2.3%	0.3%	0.9%	-1.4%	-2.4%	0.4%	-1.1%	0.7%	-1.4%	1.4%	2.9%	0.0%	0.7%	0.1%	-0.8%
<b>P11</b>	-2.8%	0.8%	0.8%	-1.1%	-2.2%	0.8%	-1.5%	0.5%	-2.0%	0.7%	3.3%	0.4%	0.9%	0.7%	-0.7%
<b>P12</b>	-2.5%	0.6%	0.8%	-1.2%	-2.2%	0.7%	-1.3%	0.7%	-1.7%	1.1%	3.0%	0.0%	0.8%	0.1%	-0.8%
<b>P13</b>	-2.3%	0.8%	0.6%	-0.8%	-1.4%	1.3%	-1.3%	0.8%	-2.2%	1.0%	2.9%	-0.3%	1.1%	-0.6%	-0.6%
<b>P14</b>	-2.1%	0.0%	1.0%	-1.5%	-2.3%	0.6%	-1.1%	1.2%	-1.2%	1.7%	2.7%	-0.3%	0.5%	-0.4%	-1.0%

<b>P15</b>	-2.3%	0.2%	0.9%	-1.5%	-2.3%	0.4%	-1.0%	0.8%	-1.4%	1.3%	2.9%	0.0%	0.8%	-0.1%	-0.7%
<b>P16</b>	-2.6%	0.7%	0.5%	-1.3%	-2.1%	0.7%	-1.4%	0.9%	-2.0%	1.0%	3.0%	0.8%	1.1%	1.1%	-0.6%
<b>P17</b>	-2.3%	0.4%	0.9%	-1.4%	-2.3%	0.5%	-1.1%	0.7%	-1.6%	1.4%	2.9%	-0.1%	0.8%	0.0%	-0.8%
<b>P18</b>	-2.3%	0.7%	0.7%	-1.0%	-1.8%	0.5%	-1.0%	0.3%	-2.0%	1.4%	2.9%	-0.3%	1.2%	-0.6%	-0.7%
<b>P19</b>	-2.3%	0.0%	0.9%	-2.0%	-2.4%	0.0%	-0.7%	0.8%	-1.0%	1.1%	2.9%	0.2%	0.8%	-0.2%	-0.5%
<b>P20</b>	-2.3%	0.2%	0.9%	-1.6%	-2.3%	0.4%	-1.0%	0.8%	-1.4%	1.3%	2.9%	0.0%	0.8%	-0.1%	-0.7%
<b>P21</b>	-2.6%	0.4%	0.6%	-1.5%	-2.4%	0.8%	-1.4%	1.2%	-1.6%	1.1%	3.0%	0.5%	0.7%	0.9%	-0.8%
<b>P22</b>	-2.3%	0.4%	0.9%	-1.4%	-2.2%	0.5%	-1.1%	0.8%	-1.5%	1.3%	2.9%	0.0%	0.8%	-0.1%	-0.8%
<b>P23</b>	-2.8%	0.7%	0.7%	-0.6%	-2.0%	0.9%	-1.1%	0.3%	-2.3%	0.8%	3.3%	-0.2%	1.0%	-0.2%	-0.6%
<b>P24</b>	-2.4%	0.2%	1.0%	-1.6%	-2.7%	0.1%	-1.0%	0.7%	-1.2%	1.6%	2.8%	0.1%	0.5%	0.2%	-0.9%
<b>P25</b>	-2.1%	0.3%	1.0%	-1.6%	-2.2%	0.5%	-1.1%	0.9%	-1.4%	1.6%	2.8%	-0.2%	0.7%	-0.3%	-0.9%
<b>P26</b>	-2.4%	1.1%	0.5%	-0.3%	-1.6%	1.2%	-1.7%	0.5%	-2.6%	1.5%	2.8%	-0.5%	1.0%	-0.2%	-1.0%
<b>P27</b>	-2.4%	0.6%	0.8%	-1.0%	-2.1%	0.7%	-1.1%	0.4%	-2.2%	1.6%	3.2%	-0.5%	1.0%	-0.6%	-0.9%
<b>P28</b>	-2.8%	0.6%	0.7%	-0.6%	-2.0%	0.9%	-1.1%	0.4%	-2.2%	1.0%	3.2%	-0.2%	1.0%	-0.3%	-0.6%
<b>P29</b>	-2.1%	0.3%	0.9%	-1.6%	-2.2%	0.6%	-1.1%	0.8%	-1.4%	1.3%	2.8%	-0.1%	0.7%	-0.2%	-0.8%
<b>P30</b>	-2.1%	0.3%	1.1%	-1.4%	-2.2%	0.5%	-1.0%	0.7%	-1.4%	1.5%	2.8%	-0.4%	0.6%	-0.7%	-0.9%
<b>P31</b>	-2.1%	0.2%	0.9%	-1.5%	-2.2%	0.6%	-1.0%	0.9%	-1.3%	1.3%	2.9%	-0.1%	0.8%	-0.2%	-0.8%
<b>P32</b>	-2.0%	0.1%	0.9%	-1.7%	-2.2%	-0.1%	-1.4%	1.2%	-0.4%	2.1%	2.2%	1.0%	1.0%	0.5%	-1.1%
<b>P33</b>	-2.2%	0.3%	0.9%	-1.4%	-2.2%	0.4%	-1.2%	0.9%	-1.3%	1.6%	2.7%	0.2%	0.9%	0.1%	-0.9%
<b>P34</b>	-3.0%	1.1%	0.5%	-0.4%	-2.0%	0.8%	-1.4%	0.4%	-2.7%	1.4%	2.9%	-0.1%	1.0%	0.2%	-0.8%
<b>P35</b>	-2.4%	0.3%	0.9%	-1.3%	-2.3%	0.4%	-1.0%	0.6%	-1.6%	1.6%	3.1%	-0.1%	0.9%	-0.4%	-0.9%
<b>P36</b>	-2.2%	0.3%	0.9%	-1.4%	-2.2%	0.6%	-1.1%	0.9%	-1.5%	1.5%	2.8%	-0.2%	0.7%	-0.3%	-0.8%

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 10:** Variação na demanda por cliente por período (Clientes 16-30; C1).

	<b>C16</b>	<b>C17</b>	<b>C18</b>	<b>C19</b>	<b>C20</b>	<b>C21</b>	<b>C22</b>	<b>C23</b>	<b>C24</b>	<b>C25</b>	<b>C26</b>	<b>C27</b>	<b>C28</b>	<b>C29</b>	<b>C30</b>
<b>P1</b>	-0.4%	0.1%	2.7%	-0.8%	-0.7%	0.7%	1.2%	1.7%	0.5%	-1.4%	0.4%	0.0%	-0.4%	-0.1%	-1.4%
<b>P2</b>	-0.1%	0.7%	2.6%	-0.6%	-0.1%	0.7%	1.3%	1.8%	0.2%	-1.6%	0.0%	-0.2%	-1.1%	0.3%	-0.8%
<b>P3</b>	-0.1%	1.4%	2.2%	-0.4%	-0.3%	0.2%	1.1%	1.7%	-0.1%	-1.6%	-0.8%	0.2%	-2.0%	0.5%	-0.9%
<b>P4</b>	-0.2%	1.0%	2.6%	-0.2%	-0.3%	0.7%	1.5%	2.1%	0.2%	-1.9%	1.0%	-0.8%	-0.7%	0.4%	-0.1%

<b>P5</b>	-0.1%	0.8%	2.7%	-0.5%	0.0%	0.8%	1.4%	1.9%	0.3%	-1.6%	0.4%	-0.3%	-0.9%	0.3%	-0.7%
<b>P6</b>	-0.1%	0.2%	3.0%	-0.8%	-0.1%	1.2%	1.4%	1.7%	0.4%	-1.4%	0.4%	-0.3%	-0.6%	0.3%	-1.1%
<b>P7</b>	-0.2%	0.5%	2.7%	-0.7%	0.0%	0.7%	1.4%	1.8%	0.3%	-1.4%	0.4%	-0.2%	-0.9%	0.4%	-0.9%
<b>P8</b>	-0.1%	1.5%	1.9%	0.1%	0.2%	0.4%	1.1%	1.5%	-0.5%	-1.2%	-1.1%	0.5%	-2.2%	0.6%	-1.5%
<b>P9</b>	0.0%	0.4%	2.5%	-0.6%	-0.5%	0.6%	1.5%	1.9%	0.4%	-2.0%	0.5%	-0.7%	-0.7%	0.2%	-0.4%
<b>P10</b>	-0.1%	0.5%	2.9%	-0.8%	-0.1%	0.9%	1.3%	1.8%	0.4%	-1.5%	0.2%	-0.2%	-0.9%	0.3%	-0.9%
<b>P11</b>	-0.3%	0.2%	2.7%	-1.4%	-0.1%	0.4%	1.0%	1.2%	0.1%	-0.7%	-1.7%	1.0%	-2.3%	0.4%	-2.5%
<b>P12</b>	-0.2%	0.6%	2.7%	-0.9%	-0.2%	0.6%	1.2%	1.6%	0.2%	-1.3%	-0.4%	0.3%	-1.5%	0.4%	-1.4%
<b>P13</b>	-0.1%	1.4%	2.0%	-0.1%	0.0%	0.4%	1.1%	1.6%	-0.3%	-1.3%	-0.9%	0.3%	-2.2%	0.5%	-1.4%
<b>P14</b>	-0.2%	0.6%	2.7%	-0.5%	-0.4%	0.8%	1.5%	2.0%	0.4%	-1.7%	1.0%	-0.6%	-0.4%	0.3%	-0.5%
<b>P15</b>	0.1%	0.6%	2.8%	-0.8%	0.1%	0.7%	1.3%	1.9%	0.3%	-1.5%	0.2%	-0.2%	-0.8%	0.2%	-0.7%
<b>P16</b>	0.4%	1.2%	2.9%	-0.5%	-1.5%	1.0%	1.1%	1.8%	-0.6%	-1.3%	-1.6%	1.1%	-2.8%	0.0%	-1.9%
<b>P17</b>	-0.1%	0.7%	2.8%	-0.8%	-0.2%	0.8%	1.3%	1.8%	0.2%	-1.5%	0.0%	-0.1%	-1.3%	0.4%	-0.9%
<b>P18</b>	0.1%	1.2%	2.4%	-0.4%	0.3%	0.8%	1.2%	1.9%	0.1%	-1.7%	-0.2%	-0.2%	-1.5%	0.5%	-0.6%
<b>P19</b>	0.6%	0.5%	3.1%	-1.0%	0.0%	0.5%	1.4%	2.2%	0.4%	-1.8%	0.6%	-0.5%	-0.5%	-0.4%	-0.1%
<b>P20</b>	0.1%	0.6%	2.8%	-0.8%	-0.1%	0.7%	1.3%	1.9%	0.3%	-1.6%	0.2%	-0.2%	-0.8%	0.1%	-0.7%
<b>P21</b>	0.0%	0.8%	3.1%	-0.7%	-0.9%	1.0%	1.2%	1.6%	0.1%	-1.2%	-0.8%	0.7%	-1.9%	0.1%	-1.8%
<b>P22</b>	0.0%	0.7%	2.7%	-0.7%	-0.1%	0.7%	1.3%	1.8%	0.2%	-1.5%	0.0%	-0.1%	-0.9%	0.3%	-0.9%
<b>P23</b>	0.3%	1.4%	2.6%	-0.6%	0.2%	0.9%	1.5%	1.7%	-0.1%	-1.6%	-0.6%	-0.1%	-2.4%	1.0%	-0.5%
<b>P24</b>	-0.1%	0.3%	3.1%	-1.1%	-0.7%	1.0%	1.4%	1.9%	0.6%	-1.8%	0.5%	-0.4%	-0.7%	0.2%	-0.8%
<b>P25</b>	-0.3%	0.4%	2.6%	-0.7%	0.0%	0.7%	1.3%	1.8%	0.4%	-1.3%	0.4%	-0.1%	-0.6%	0.2%	-1.1%
<b>P26</b>	-0.6%	1.4%	2.1%	-0.2%	-0.3%	1.1%	1.0%	1.4%	-0.3%	-1.2%	-1.2%	0.4%	-2.7%	1.2%	-1.9%
<b>P27</b>	-0.3%	0.8%	2.4%	-0.7%	-0.4%	1.1%	1.6%	1.5%	0.3%	-1.5%	0.1%	0.1%	-1.1%	0.9%	-1.1%
<b>P28</b>	0.2%	1.4%	2.6%	-0.7%	0.1%	0.9%	1.5%	1.7%	0.0%	-1.6%	-0.5%	-0.1%	-2.4%	0.9%	-0.6%
<b>P29</b>	-0.1%	0.6%	2.6%	-0.6%	-0.4%	0.6%	1.4%	1.8%	0.1%	-1.7%	0.1%	-0.1%	-1.0%	0.3%	-0.8%
<b>P30</b>	-0.3%	0.4%	2.5%	-0.7%	0.2%	0.6%	1.3%	1.8%	0.5%	-1.5%	0.6%	-0.4%	-0.8%	0.4%	-0.8%
<b>P31</b>	0.0%	0.6%	2.6%	-0.6%	0.1%	0.7%	1.4%	1.9%	0.3%	-1.5%	0.3%	-0.3%	-0.7%	0.3%	-0.7%
<b>P32</b>	-0.1%	0.5%	3.3%	-0.6%	0.4%	1.0%	0.8%	1.9%	0.1%	-1.3%	-0.3%	-0.2%	-1.1%	-0.1%	-1.5%
<b>P33</b>	-0.1%	0.7%	2.9%	-0.6%	0.1%	0.9%	1.2%	1.8%	0.2%	-1.4%	-0.1%	-0.1%	-1.1%	0.3%	-1.1%
<b>P34</b>	-0.3%	1.4%	2.9%	-0.8%	0.0%	1.0%	0.9%	1.4%	-0.1%	-0.9%	-1.1%	1.0%	-2.4%	0.6%	-2.0%

<b>P35</b>	-0.1%	0.5%	2.7%	-0.8%	0.0%	1.0%	1.5%	1.7%	0.4%	-1.4%	0.4%	-0.1%	-0.7%	0.5%	-0.9%
<b>P36</b>	-0.1%	0.8%	2.7%	-0.5%	0.1%	0.8%	1.4%	1.9%	0.3%	-1.5%	0.4%	-0.3%	-0.8%	0.4%	-0.7%

**Fonte:** Próprio autor.

Somando, então, os custos adicionais ocasionados pelo aumento na demanda em diversos clientes e os custos de contratação de veículos SPOT, espera-se que a diferença nos custos totais entre o modelo de otimização e a abordagem híbrida seja considerável. Esses custos estão descritos, em unidades monetárias, na Tabela 11.

**Tabela 11:** Custos totais no modelo de otimização e na combinação (em u.m.; C1).

Otimização	Combinação	Diferença
95.271.520	98.564.891	3,46%

**Fonte:** Próprio autor.

Através da Tabela 11, é possível perceber que os custos totais da combinação são 3,46% superiores aos custos da otimização. Esse número corrobora a constatação de que os resultados do modelo de otimização são otimistas se comparados ao método híbrido, por se fundamentar em simplificações e não considerar características importantes (como a dinâmica do sistema e a variabilidade da demanda) inerentes ao sistema. Além disso, é importante ressaltar a diferença nos algoritmos de seleção de veículos que, para o modelo de otimização, realiza o dimensionamento prevendo a demanda de todos os clientes em todos os períodos, ao passo que o modelo de simulação (na abordagem híbrida) seleciona o veículo baseado somente na próxima solicitação de transporte.

## 4.2. Cenário 2

O presente cenário é delineado pelas mesmas características apresentadas no cenário anterior, com exceção dos limites de variação da demanda – entre -30% e +30% da demanda prevista original. Dessa forma, torna-se possível analisar o impacto do aumento da variabilidade nos resultados obtidos.

As Tabelas 12 e 13 apresentam as combinações *veículo x transportador* para os modelos de otimização e simulação, respectivamente, obtidas no Cenário 2.

**Tabela 12:** Quantidade máxima de veículos utilizados por transportador (Otimização; C2).

Transportador	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Veículo 5	Veículo 6
---------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

<b>Transportador 1</b>	9	-	111	136	5	7
<b>Transportador 2</b>	2	11	73	42	-	2
<b>Transportador 3</b>	-	-	2	-	-	-
<b>Transportador 4</b>	-	-	160	109	-	46
<b>Transportador 5</b>	-	-	13	7	-	2
<b>Transportador 6</b>	-	-	13	118	3	48
<b>Transportador 7</b>	-	-	85	23	-	4
<b>Transportador 8</b>	-	-	2	3	-	2
<b>Transportador 9</b>	28	-	76	3	2	-

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 13:** Quantidade máxima de veículos utilizados por transportador (Simulação; C2).

<b>Transportador</b>	<b>Veículo 1</b>	<b>Veículo 2</b>	<b>Veículo 3</b>	<b>Veículo 4</b>	<b>Veículo 5</b>	<b>Veículo 6</b>
<b>Transportador 1</b>	9	-	111	136	5	7
<b>Transportador 2</b>	2	11	73	42	-	2
<b>Transportador 3</b>	-	-	2	-	-	-
<b>Transportador 4</b>	-	-	160	73	-	-
<b>Transportador 5</b>	-	-	13	7	-	2
<b>Transportador 6</b>	-	-	13	118	-	30
<b>Transportador 7</b>	-	-	75	23	-	3
<b>Transportador 8</b>	-	-	2	3	-	2
<b>Transportador 9</b>	4	-	76	3	-	-

**Fonte:** Próprio autor.

Através das Tabelas 12 e 13 é possível notar resultados semelhantes aos obtidos na execução do Cenário 1. Em sua maioria, os veículos selecionados para a composição da frota foram completamente utilizados. Da mesma forma, devido ao algoritmo de seleção utilizado no modelo de simulação, veículos que fazem parte da frota dimensionada não foram acionados – uma vez que foram substituídos por outros veículos também selecionados para o mesmo atendimento. Além disso, a variação negativa na demanda em alguns clientes também pode acarretar ociosidade em alguns veículos da frota dimensionada. Essa diferença na alocação das rotas para os veículos ocasionou, novamente, a necessidade de contratação de veículos SPOT

para o atendimento de solicitações quando não haviam veículos regulares disponíveis. A contratação de veículos e a quantidade de viagens realizadas está descrita na Tabela 14.

**Tabela 14:** Resultados para viagens regulares e SPOT por mês (C2).

	<b>Quantidade total de viagens</b>	<b>Quantidade de viagens SPOT</b>	<b>Máximo de SPOTs contratados simultaneamente</b>	<b>Porcentagem de SPOT no total</b>
<b>Período 1</b>	960	0	0	0%
<b>Período 2</b>	1463	28	17	2%
<b>Período 3</b>	1598	30	26	2%
<b>Período 4</b>	1331	15	15	1%
<b>Período 5</b>	1568	30	19	2%
<b>Período 6</b>	1004	9	9	1%
<b>Período 7</b>	1500	31	20	2%
<b>Período 8</b>	1474	23	23	2%
<b>Período 9</b>	1124	6	6	1%
<b>Período 10</b>	1622	43	32	3%
<b>Período 11</b>	1210	4	4	0%
<b>Período 12</b>	1419	16	10	1%
<b>Período 13</b>	1295	15	15	1%
<b>Período 14</b>	1171	14	14	1%
<b>Período 15</b>	1641	41	31	2%
<b>Período 16</b>	1097	0	0	0%
<b>Período 17</b>	1520	30	20	2%
<b>Período 18</b>	1859	55	41	3%
<b>Período 19</b>	1320	15	15	1%
<b>Período 20</b>	1601	38	30	2%
<b>Período 21</b>	1132	0	0	0%
<b>Período 22</b>	1520	30	22	2%
<b>Período 23</b>	1778	52	44	3%
<b>Período 24</b>	1164	17	17	1%
<b>Período 25</b>	1729	47	33	3%
<b>Período 26</b>	1533	24	24	2%

<b>Período 27</b>	1567	31	19	2%
<b>Período 28</b>	1617	29	23	2%
<b>Período 29</b>	1028	0	0	0%
<b>Período 30</b>	1671	41	29	2%
<b>Período 31</b>	2271	121	94	5%
<b>Período 32</b>	1566	27	24	2%
<b>Período 33</b>	1897	65	50	3%
<b>Período 34</b>	1524	17	17	1%
<b>Período 35</b>	1726	51	35	3%
<b>Período 36</b>	2307	132	103	6%

**Fonte:** Próprio autor.

A Tabela 14 apresenta um comportamento semelhante ao do cenário previamente avaliado. No geral, espera-se que a demanda seja próxima da prevista, uma vez que a distribuição de probabilidade que representa a demanda estocástica no modelo de simulação possui o mesmo valor modal (mais frequente) em ambos os cenários. De fato, a quantidade de viagens SPOT realizadas no Cenário 2 (1.127 viagens) foi ligeiramente inferior ao apresentado no Cenário 1 (1.183 viagens), acompanhando a diferença na quantidade de viagens realizadas – que totalizou 54.095 viagens no Cenário 1 e 53.807 viagens no Cenário 2. Essa diferença era esperada, uma vez que a demanda prevista de ambos os cenários, em média, é a mesma.

As Tabela 15 e 16 apresentam os resultados de contratação de veículos SPOT simultâneos por cliente para o Cenário 2.

**Tabela 15:** Quantidade de veículos SPOT simultâneos por cliente (Clientes 1-15; C2).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
<b>P1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P2</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	8	0	0	6	0
<b>P3</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	10	0	1	9	2
<b>P4</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	6	0
<b>P5</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10	0	0	6	0
<b>P6</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	4	0
<b>P7</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	9	0	0	8	1

<b>P8</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	11	0
<b>P9</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	4	0
<b>P10</b>	0	2	0	0	0	3	0	0	2	4	9	0	1	9	2
<b>P11</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0
<b>P12</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	5	0
<b>P13</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	0	0	7	0
<b>P14</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	0	8	0
<b>P15</b>	0	0	0	0	0	2	0	0	2	4	11	0	1	9	2
<b>P16</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P17</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	8	0
<b>P18</b>	0	2	0	0	0	4	0	0	4	4	12	0	2	11	4
<b>P19</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	6	0
<b>P20</b>	0	0	0	0	0	3	0	0	2	4	10	0	1	8	2
<b>P21</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P22</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	10	0	0	8	0
<b>P23</b>	0	3	0	0	0	4	0	0	4	4	12	0	2	11	4
<b>P24</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	8	0
<b>P25</b>	0	2	0	0	0	4	0	0	2	3	11	0	1	8	2
<b>P26</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	12	0
<b>P27</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	7	0
<b>P28</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	11	0	0	8	0
<b>P29</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P30</b>	0	2	0	0	0	3	0	0	2	3	10	0	1	7	2
<b>P31</b>	1	12	5	0	2	18	0	0	11	4	13	0	4	11	13
<b>P32</b>	0	0	0	0	0	3	0	0	2	3	6	0	1	7	2
<b>P33</b>	0	5	0	0	0	8	0	0	4	4	12	0	2	9	6
<b>P34</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	8	0
<b>P35</b>	0	2	0	0	0	3	0	0	2	4	12	0	1	10	2
<b>P36</b>	2	9	7	0	3	17	0	0	14	5	13	0	4	14	16
<b>Total</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

---

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 16:** Quantidade de veículos SPOT simultâneos por cliente (Clientes 16-30; C2).

	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30
<b>P1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P2</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	8	0	0	6	0
<b>P3</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	10	0	1	9	2
<b>P4</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	6	0
<b>P5</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10	0	0	6	0
<b>P6</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	4	0
<b>P7</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	9	0	0	8	1
<b>P8</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	11	0
<b>P9</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	4	0
<b>P10</b>	0	2	0	0	0	3	0	0	2	4	9	0	1	9	2
<b>P11</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0
<b>P12</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	5	0
<b>P13</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	0	0	7	0
<b>P14</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	0	8	0
<b>P15</b>	0	0	0	0	0	2	0	0	2	4	11	0	1	9	2
<b>P16</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P17</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	8	0
<b>P18</b>	0	2	0	0	0	4	0	0	4	4	12	0	2	11	4
<b>P19</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	6	0
<b>P20</b>	0	0	0	0	0	3	0	0	2	4	10	0	1	8	2
<b>P21</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P22</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	10	0	0	8	0
<b>P23</b>	0	3	0	0	0	4	0	0	4	4	12	0	2	11	4
<b>P24</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	8	0
<b>P25</b>	0	2	0	0	0	4	0	0	2	3	11	0	1	8	2
<b>P26</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	12	0
<b>P27</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	7	0
<b>P28</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	11	0	0	8	0

<b>P29</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P30</b>	0	2	0	0	0	3	0	0	2	3	10	0	1	7	2
<b>P31</b>	1	12	5	0	2	18	0	0	11	4	13	0	4	11	13
<b>P32</b>	0	0	0	0	0	3	0	0	2	3	6	0	1	7	2
<b>P33</b>	0	5	0	0	0	8	0	0	4	4	12	0	2	9	6
<b>P34</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	8	0
<b>P35</b>	0	2	0	0	0	3	0	0	2	4	12	0	1	10	2
<b>P36</b>	2	9	7	0	3	17	0	0	14	5	13	0	4	14	16
<b>Total</b>	3	39	12	0	5	72	0	0	51	105	263	0	22	255	60

**Fonte:** Próprio autor.

De forma semelhante ao Cenário 2, os veículos SPOT contratados para o atendimento das solicitações onde não haviam veículos regulares disponíveis foi elevada para os últimos clientes (25, 26 e 29) devido ao método de seleção de veículos na simulação, com destaque para aqueles atendidos por somente um transportador e com alta demanda. As Tabelas 17 e 18 descrevem a variação na demanda por cliente por período, para o Cenário 2.

**Tabela 17:** Variação na demanda por cliente por período (Clientes 1-15; C2).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
<b>P1</b>	-5.8%	0.7%	3.0%	-5.7%	-6.8%	1.0%	-3.4%	3.2%	-3.5%	5.3%	8.1%	-0.2%	2.0%	-0.4%	-2.9%
<b>P2</b>	-6.7%	1.0%	2.6%	-4.2%	-6.4%	1.8%	-3.3%	2.4%	-4.5%	4.0%	8.7%	-0.3%	2.5%	-0.4%	-2.3%
<b>P3</b>	-7.7%	2.6%	1.8%	-2.5%	-5.6%	4.0%	-3.7%	1.8%	-7.5%	1.7%	9.4%	-2.4%	1.5%	-0.4%	-1.5%
<b>P4</b>	-6.2%	0.2%	2.8%	-4.2%	-6.7%	2.7%	-3.0%	3.7%	-4.4%	4.5%	8.1%	-2.1%	1.1%	-1.8%	-2.6%
<b>P5</b>	-6.6%	0.8%	2.7%	-4.1%	-6.6%	1.8%	-3.2%	2.9%	-4.4%	4.6%	8.4%	-0.5%	2.2%	-0.7%	-2.5%
<b>P6</b>	-6.5%	0.4%	3.0%	-4.8%	-6.9%	0.0%	-3.3%	2.6%	-3.0%	6.1%	8.2%	1.4%	3.2%	-0.2%	-3.0%
<b>P7</b>	-6.7%	0.6%	2.9%	-4.2%	-6.9%	2.0%	-3.5%	3.1%	-4.1%	4.3%	8.6%	-0.4%	1.8%	-0.2%	-2.6%
<b>P8</b>	-7.0%	2.6%	1.7%	-2.4%	-4.1%	4.6%	-4.1%	2.5%	-6.8%	2.9%	8.9%	-1.0%	3.6%	-2.3%	-1.7%
<b>P9</b>	-5.9%	0.1%	3.0%	-5.4%	-6.6%	1.5%	-2.7%	2.9%	-3.0%	4.0%	8.6%	-0.4%	2.2%	-0.9%	-2.3%
<b>P10</b>	-7.0%	1.0%	2.8%	-4.3%	-7.2%	1.1%	-3.2%	2.2%	-4.3%	4.3%	8.7%	0.0%	2.1%	0.4%	-2.5%
<b>P11</b>	-8.3%	2.5%	2.4%	-3.1%	-6.6%	2.4%	-4.4%	1.6%	-5.9%	2.2%	10.1%	1.3%	2.7%	2.2%	-2.1%
<b>P12</b>	-7.4%	1.7%	2.5%	-3.7%	-6.5%	2.1%	-3.7%	2.1%	-5.1%	3.4%	9.1%	0.2%	2.4%	0.5%	-2.2%
<b>P13</b>	-7.0%	2.4%	1.7%	-2.4%	-4.3%	3.8%	-3.9%	2.4%	-6.7%	3.2%	8.9%	-0.8%	3.4%	-1.7%	-1.9%

<b>P14</b>	-6.3%	0.0%	3.1%	-4.6%	-7.0%	1.8%	-3.2%	3.6%	-3.6%	5.1%	8.1%	-0.9%	1.6%	-1.1%	-2.8%
<b>P15</b>	-7.0%	0.7%	2.7%	-4.6%	-6.9%	1.3%	-3.0%	2.5%	-4.1%	3.8%	8.8%	0.1%	2.4%	-0.2%	-2.1%
<b>P16</b>	-7.8%	2.2%	1.4%	-3.9%	-6.2%	2.3%	-4.3%	2.9%	-5.8%	3.1%	9.2%	2.4%	3.5%	3.6%	-1.8%
<b>P17</b>	-7.0%	1.2%	2.6%	-4.0%	-6.7%	1.6%	-3.3%	2.3%	-4.6%	4.2%	8.7%	-0.1%	2.4%	0.1%	-2.4%
<b>P18</b>	-6.9%	2.1%	2.0%	-3.1%	-5.3%	1.6%	-2.9%	1.0%	-6.0%	4.2%	8.6%	-0.9%	3.6%	-1.6%	-2.0%
<b>P19</b>	-7.0%	0.0%	2.8%	-5.9%	-7.3%	-0.1%	-2.0%	2.5%	-3.1%	3.4%	8.9%	0.8%	2.6%	-0.4%	-1.4%
<b>P20</b>	-7.0%	0.8%	2.7%	-4.6%	-6.9%	1.3%	-3.0%	2.6%	-4.1%	3.8%	8.8%	0.1%	2.4%	-0.2%	-2.1%
<b>P21</b>	-7.8%	1.3%	1.7%	-4.4%	-7.0%	2.3%	-4.2%	3.7%	-4.8%	3.4%	9.0%	1.7%	2.3%	2.9%	-2.3%
<b>P22</b>	-7.0%	1.1%	2.6%	-4.2%	-6.6%	1.6%	-3.2%	2.4%	-4.5%	3.9%	8.8%	0.0%	2.4%	-0.2%	-2.2%
<b>P23</b>	-8.3%	2.0%	2.1%	-1.9%	-6.1%	2.9%	-3.2%	1.0%	-6.7%	2.6%	9.8%	-0.5%	3.1%	-0.7%	-1.6%
<b>P24</b>	-7.0%	0.5%	3.1%	-4.8%	-8.0%	0.3%	-3.0%	2.1%	-3.6%	4.7%	8.6%	0.3%	1.7%	1.0%	-2.7%
<b>P25</b>	-6.3%	1.0%	2.9%	-4.7%	-6.6%	1.5%	-3.3%	2.6%	-4.1%	4.7%	8.4%	-0.5%	2.2%	-0.7%	-2.6%
<b>P26</b>	-7.2%	3.3%	1.6%	-0.9%	-4.7%	3.7%	-5.0%	1.4%	-7.9%	4.6%	8.5%	-1.5%	3.1%	-0.5%	-2.9%
<b>P27</b>	-7.3%	1.9%	2.5%	-2.9%	-6.2%	2.3%	-3.4%	1.3%	-6.5%	4.8%	9.6%	-1.3%	3.0%	-1.6%	-2.6%
<b>P28</b>	-8.4%	1.9%	2.0%	-1.8%	-6.1%	2.6%	-3.2%	1.1%	-6.7%	2.9%	9.6%	-0.5%	3.0%	-0.6%	-1.8%
<b>P29</b>	-6.3%	1.0%	2.8%	-4.7%	-6.5%	1.9%	-3.3%	2.4%	-4.0%	4.0%	8.7%	-0.3%	2.4%	-0.3%	-2.3%
<b>P30</b>	-6.3%	0.9%	3.2%	-4.2%	-6.5%	1.6%	-3.1%	2.2%	-4.2%	4.7%	8.4%	-1.3%	2.0%	-1.9%	-2.6%
<b>P31</b>	-6.4%	0.7%	2.8%	-4.6%	-6.5%	1.7%	-3.1%	2.6%	-4.0%	4.0%	8.7%	-0.3%	2.4%	-0.5%	-2.3%
<b>P32</b>	-5.9%	0.3%	2.7%	-5.1%	-6.4%	-0.3%	-4.1%	3.8%	-1.2%	6.3%	6.5%	3.1%	3.0%	1.6%	-3.2%
<b>P33</b>	-6.7%	1.0%	2.6%	-4.2%	-6.4%	1.2%	-3.6%	2.8%	-3.7%	4.8%	8.1%	0.8%	2.8%	0.3%	-2.6%
<b>P34</b>	-8.9%	3.4%	1.6%	-1.1%	-5.9%	2.6%	-4.3%	1.3%	-8.0%	4.1%	8.9%	0.0%	2.9%	0.6%	-2.3%
<b>P35</b>	-7.0%	1.1%	2.8%	-4.0%	-6.8%	1.3%	-3.0%	1.9%	-4.9%	4.9%	9.2%	-0.2%	2.9%	-1.0%	-2.5%
<b>P36</b>	-6.6%	0.8%	2.7%	-4.1%	-6.6%	1.8%	-3.2%	2.9%	-4.4%	4.6%	8.4%	-0.5%	2.2%	-0.7%	-2.5%

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 18:** Variação na demanda por cliente por período (Clientes 16-30; C2).

	<b>C16</b>	<b>C17</b>	<b>C18</b>	<b>C19</b>	<b>C20</b>	<b>C21</b>	<b>C22</b>	<b>C23</b>	<b>C24</b>	<b>C25</b>	<b>C26</b>	<b>C27</b>	<b>C28</b>	<b>C29</b>	<b>C30</b>
<b>P1</b>	-1.0%	0.5%	8.3%	-2.0%	-0.4%	2.2%	3.7%	5.4%	1.7%	-3.6%	1.7%	0.1%	-0.3%	-0.2%	-3.9%
<b>P2</b>	0.0%	2.2%	8.0%	-1.7%	0.5%	2.2%	4.0%	5.5%	0.8%	-4.3%	0.3%	-0.5%	-2.6%	1.1%	-2.3%

<b>P3</b>	-0.2%	4.4%	6.7%	-1.1%	0.0%	0.6%	3.3%	5.3%	-0.3%	-4.4%	-2.2%	0.7%	-5.5%	1.6%	-2.7%
<b>P4</b>	-0.4%	3.1%	7.8%	-0.5%	-0.1%	2.1%	4.5%	6.4%	0.9%	-5.2%	3.4%	-2.4%	-1.4%	1.3%	-0.1%
<b>P5</b>	-0.2%	2.4%	8.2%	-1.5%	0.5%	2.5%	4.2%	5.7%	1.0%	-4.3%	1.3%	-0.9%	-2.2%	1.2%	-1.9%
<b>P6</b>	-0.1%	0.9%	9.2%	-2.4%	0.9%	3.7%	4.2%	5.4%	1.3%	-3.8%	1.5%	-0.6%	-1.0%	1.0%	-3.1%
<b>P7</b>	-0.5%	1.7%	8.3%	-2.0%	0.5%	2.3%	4.2%	5.4%	1.2%	-3.9%	1.3%	-0.4%	-2.0%	1.2%	-2.7%
<b>P8</b>	0.0%	4.5%	6.0%	0.3%	1.5%	1.2%	3.5%	4.6%	-1.5%	-3.2%	-3.0%	1.6%	-6.0%	1.9%	-4.2%
<b>P9</b>	0.3%	1.4%	7.6%	-1.5%	0.0%	1.8%	4.5%	6.0%	1.4%	-5.4%	1.7%	-2.0%	-1.1%	0.7%	-1.0%
<b>P10</b>	-0.2%	1.8%	8.8%	-2.5%	0.4%	2.7%	4.0%	5.6%	1.4%	-4.3%	0.9%	-0.4%	-2.1%	1.0%	-2.4%
<b>P11</b>	-0.8%	0.9%	8.1%	-4.0%	0.8%	1.2%	3.1%	3.7%	0.5%	-1.8%	-4.8%	3.0%	-5.9%	1.3%	-7.3%
<b>P12</b>	-0.4%	1.9%	8.1%	-2.5%	0.6%	2.0%	3.7%	4.8%	0.7%	-3.5%	-1.1%	1.1%	-3.7%	1.3%	-4.2%
<b>P13</b>	-0.1%	4.2%	6.1%	-0.2%	1.0%	1.2%	3.5%	4.8%	-0.5%	-3.6%	-2.4%	1.1%	-5.5%	1.6%	-3.9%
<b>P14</b>	-0.5%	1.9%	8.4%	-1.4%	0.2%	2.7%	4.5%	6.0%	1.3%	-4.7%	3.2%	-1.8%	-0.4%	1.1%	-1.4%
<b>P15</b>	0.3%	1.9%	8.6%	-2.3%	0.7%	2.1%	4.1%	5.8%	1.1%	-4.2%	0.8%	-0.4%	-2.0%	0.6%	-2.1%
<b>P16</b>	1.3%	3.8%	9.0%	-1.3%	-2.8%	3.2%	3.4%	5.4%	-1.5%	-3.3%	-4.7%	3.4%	-7.2%	0.3%	-5.4%
<b>P17</b>	-0.2%	2.1%	8.4%	-2.1%	0.3%	2.5%	3.9%	5.4%	0.8%	-4.1%	0.2%	-0.2%	-2.9%	1.2%	-2.7%
<b>P18</b>	0.4%	3.8%	7.4%	-1.2%	1.4%	2.4%	3.5%	5.7%	0.3%	-4.8%	-0.5%	-0.6%	-3.9%	1.6%	-1.7%
<b>P19</b>	1.8%	1.6%	9.3%	-2.7%	1.0%	1.7%	4.2%	6.7%	1.3%	-5.0%	2.1%	-1.4%	-0.7%	-0.9%	-0.1%
<b>P20</b>	0.4%	1.9%	8.6%	-2.3%	0.7%	2.1%	4.1%	5.7%	1.1%	-4.2%	0.7%	-0.4%	-1.7%	0.5%	-2.1%
<b>P21</b>	0.3%	2.4%	9.4%	-2.1%	-1.2%	3.0%	3.7%	5.1%	0.3%	-3.0%	-2.2%	2.3%	-4.4%	0.6%	-5.3%
<b>P22</b>	0.1%	2.2%	8.3%	-1.9%	0.7%	2.3%	4.0%	5.5%	0.9%	-4.2%	0.2%	-0.2%	-2.2%	0.9%	-2.5%
<b>P23</b>	0.9%	4.4%	7.8%	-1.8%	1.3%	2.7%	4.5%	5.1%	-0.2%	-4.7%	-1.6%	-0.2%	-6.7%	3.1%	-1.5%
<b>P24</b>	-0.2%	1.1%	9.4%	-3.2%	-0.5%	3.2%	4.2%	5.8%	2.1%	-4.7%	1.6%	-0.9%	-1.1%	0.9%	-2.0%
<b>P25</b>	-0.7%	1.3%	8.0%	-2.0%	0.8%	2.2%	3.8%	5.4%	1.3%	-3.8%	1.2%	-0.2%	-1.1%	0.6%	-3.1%
<b>P26</b>	-1.7%	4.4%	6.5%	-0.3%	-0.2%	3.3%	3.1%	4.2%	-0.6%	-3.3%	-3.5%	1.3%	-7.2%	3.8%	-5.6%
<b>P27</b>	-0.7%	2.4%	7.3%	-1.9%	-0.3%	3.3%	4.8%	4.7%	1.1%	-3.9%	0.5%	0.4%	-2.6%	2.8%	-3.0%
<b>P28</b>	0.7%	4.3%	7.8%	-1.9%	1.0%	2.7%	4.5%	5.2%	0.2%	-4.5%	-1.4%	-0.1%	-6.2%	2.7%	-1.7%
<b>P29</b>	-0.1%	1.9%	7.8%	-1.8%	0.3%	2.0%	4.2%	5.4%	0.7%	-4.4%	0.4%	0.0%	-1.7%	1.2%	-2.3%
<b>P30</b>	-0.9%	1.4%	7.7%	-2.1%	1.3%	1.9%	4.1%	5.4%	1.6%	-4.1%	2.0%	-1.1%	-1.5%	1.4%	-2.2%
<b>P31</b>	0.1%	1.9%	7.9%	-1.6%	0.6%	2.1%	4.2%	5.7%	1.1%	-4.4%	0.9%	-1.0%	-1.8%	1.0%	-1.9%
<b>P32</b>	-0.1%	1.6%	10.0%	-1.6%	2.0%	3.1%	2.4%	5.7%	0.3%	-3.5%	-0.6%	-0.6%	-2.7%	-0.1%	-4.2%

<b>P33</b>	-0.1%	2.1%	8.7%	-1.8%	1.0%	2.7%	3.5%	5.5%	0.7%	-3.8%	-0.1%	-0.2%	-2.7%	0.9%	-3.3%
<b>P34</b>	-0.9%	4.3%	8.9%	-2.3%	0.8%	3.2%	2.8%	4.3%	-0.2%	-2.4%	-3.1%	3.1%	-6.6%	2.0%	-5.8%
<b>P35</b>	-0.1%	1.6%	8.2%	-2.3%	0.5%	3.1%	4.7%	5.2%	1.4%	-4.0%	1.3%	-0.2%	-1.6%	1.6%	-2.5%
<b>P36</b>	-0.2%	2.4%	8.2%	-1.4%	0.7%	2.6%	4.2%	5.8%	1.0%	-4.4%	1.3%	-0.9%	-2.0%	1.2%	-2.0%

**Fonte:** Próprio autor.

A variação da demanda por período por cliente no Cenário 2 apresentou amplitudes maiores se comparadas ao cenário anterior – resultado esperado, dado que a variação passou de 10% para 30% em torno da média da demanda prevista. Entretanto, o comportamento da demanda simulada em relação à demanda prevista continuou semelhante – diminuindo de 35.036.486 para 34.741.462 unidades volumétricas. Essa similaridade no comportamento gerou, então, resultados de custos totais em unidades monetárias análogos aos do Cenário 1, que são apresentados na Tabela 19.

**Tabela 19:** Custos totais no modelo de otimização e na combinação (em u.m.; C2).

Otimização	Combinação	Diferença
95.155.875	98.333.283	3,34%

**Fonte:** Próprio autor.

Os custos totais resultantes do método híbrido, no Cenário 2, foram 3,34% maiores que os custos totais do modelo de otimização, mais uma vez reforçando o otimismo dos resultados do modelo de otimização em comparação aos resultados fornecidos pelo modelo de simulação na abordagem híbrida.

#### 4.3. Cenário 3

O terceiro e último cenário buscou analisar o impacto de um possível aumento estocástico da demanda de até 30% em cada período, uniformemente. Assim como no Cenário 2, os demais parâmetros do modelo se mantiveram os mesmos.

Nesse cenário, é possível observar um aumento da quantidade de veículos dimensionados para o atendimento. Se comparado com os Cenários 1, onde foram dimensionados 1.131 veículos e Cenário 2, onde foram dimensionados 1.147 veículos, a quantidade dimensionada no Cenário 3 foi expressivo – 1.267 veículos. Esse aumento era esperado, uma vez que a demanda simulada poderia ser até 30% maior que a demanda prevista.

As Tabelas 20 e 21 apresentam a quantidade de veículos utilizados por transportador nos modelos de otimização e simulação, no Cenário 3.

**Tabela 20:** Quantidade máxima de veículos utilizados por transportador (Otimização; C3).

Transportador	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Veículo 5	Veículo 6
Transportador 1	11	-	111	136	6	34
Transportador 2	2	9	91	48	-	3
Transportador 3	-	-	2	-	-	-
Transportador 4	-	-	160	109	-	54
Transportador 5	-	-	18	7	-	3
Transportador 6	-	-	13	118	3	78
Transportador 7	-	-	86	26	-	6
Transportador 8	-	-	2	3	-	2
Transportador 9	35	-	86	3	2	-

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 21:** Quantidade máxima de veículos utilizados por transportador (Simulação; C3).

Transportador	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Veículo 5	Veículo 6
Transportador 1	8	-	111	136	6	34
Transportador 2	2	9	91	48	-	3
Transportador 3	-	-	2	-	-	-
Transportador 4	-	-	160	109	-	4
Transportador 5	-	-	18	7	-	3
Transportador 6	-	-	13	118	-	39
Transportador 7	-	-	86	25	-	6
Transportador 8	-	-	2	3	-	2
Transportador 9	4	-	86	3	-	-

**Fonte:** Próprio autor.

O comportamento da diferença entre o dimensionamento dos dois modelos se manteve o mesmo dos cenários passados, devido às mesmas causas – a diferença nos algoritmos de seleção e a variação na demanda, que poderia deslocar veículos destinados ao atendimento de um cliente para o atendimento de outro. Esses fatores, combinados, geraram a necessidade de

contratação de veículos SPOT, uma vez que em determinados momentos da simulação alguns clientes não puderam ser atendidos sob o contrato de veículos regulares. A Tabela 22 descreve os resultados para viagens regulares e SPOT no Cenário 3.

**Tabela 22:** Resultados para viagens regulares e SPOT por mês (C3).

	Quantidade total de viagens	Quantidade de viagens SPOT	Máximo de SPOTs contratados simultaneamente	Porcentagem de SPOT no total
<b>Período 1</b>	1082	5	5	0%
<b>Período 2</b>	1656	43	29	3%
<b>Período 3</b>	1821	58	50	3%
<b>Período 4</b>	1509	30	20	2%
<b>Período 5</b>	1788	59	44	3%
<b>Período 6</b>	1132	10	10	1%
<b>Período 7</b>	1701	47	32	3%
<b>Período 8</b>	1673	40	36	2%
<b>Período 9</b>	1262	10	10	1%
<b>Período 10</b>	1844	62	47	3%
<b>Período 11</b>	1371	17	12	1%
<b>Período 12</b>	1606	32	18	2%
<b>Período 13</b>	1472	20	20	1%
<b>Período 14</b>	1320	28	22	2%
<b>Período 15</b>	1856	65	49	4%
<b>Período 16</b>	1242	6	6	0%
<b>Período 17</b>	1725	48	36	3%
<b>Período 18</b>	2104	90	76	4%
<b>Período 19</b>	1500	18	18	1%
<b>Período 20</b>	1813	62	47	3%
<b>Período 21</b>	1288	9	5	1%
<b>Período 22</b>	1729	52	36	3%
<b>Período 23</b>	2014	87	73	4%
<b>Período 24</b>	1316	15	15	1%
<b>Período 25</b>	1967	72	56	4%



<b>P8</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P9</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P10</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P11</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P12</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P13</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P14</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P15</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P16</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P17</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P18</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
<b>P19</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P20</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P21</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P22</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P23</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P24</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P25</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P26</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P27</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P28</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P29</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P30</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P31</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P32</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P33</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>P34</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P35</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P36</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>Total</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4

---

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 24:** Quantidade de veículos SPOT simultâneos por cliente (Clientes 16-30; C3).

	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30
<b>P1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	2	0
<b>P2</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	12	0	1	8	2
<b>P3</b>	0	6	0	0	0	7	0	0	4	4	12	0	2	12	4
<b>P4</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	10	0	0	8	0
<b>P5</b>	0	4	0	0	0	6	0	0	4	4	12	0	2	8	4
<b>P6</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	0	4	0
<b>P7</b>	0	2	0	0	0	3	0	0	2	4	11	0	1	9	2
<b>P8</b>	0	3	0	0	0	3	0	0	2	4	10	0	1	12	2
<b>P9</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	5	0
<b>P10</b>	0	4	0	0	0	8	0	0	4	4	12	0	2	9	4
<b>P11</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	0	6	0
<b>P12</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	7	0	0	8	0
<b>P13</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	8	0
<b>P14</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	11	0	0	8	0
<b>P15</b>	0	4	0	0	0	7	0	0	4	4	12	0	2	11	5
<b>P16</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	3	0
<b>P17</b>	0	2	0	0	0	3	0	0	3	4	10	0	2	8	4
<b>P18</b>	3	9	3	0	1	12	0	0	8	4	12	0	4	11	8
<b>P19</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	9	0
<b>P20</b>	0	4	0	0	0	6	0	0	4	4	12	0	3	8	6
<b>P21</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	2	0
<b>P22</b>	0	2	0	0	0	4	0	0	4	4	10	0	2	8	4
<b>P23</b>	1	9	6	0	2	11	0	0	7	4	12	0	3	12	6
<b>P24</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	6	0
<b>P25</b>	0	6	1	0	1	8	0	0	5	4	12	0	3	10	6
<b>P26</b>	0	0	0	0	0	4	0	0	2	4	9	0	1	12	2
<b>P27</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	10	0	1	11	2
<b>P28</b>	0	3	0	0	0	4	0	0	4	4	12	0	2	10	4

<b>P29</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0
<b>P30</b>	0	8	0	0	1	12	0	0	6	4	12	0	3	10	8
<b>P31</b>	5	18	9	0	3	21	0	0	14	6	17	0	4	14	15
<b>P32</b>	0	3	0	0	0	4	0	0	2	3	6	0	1	9	2
<b>P33</b>	3	9	3	0	2	13	0	0	6	4	10	0	3	10	6
<b>P34</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	9	0
<b>P35</b>	0	5	0	0	1	8	0	0	5	3	10	0	2	11	5
<b>P36</b>	3	11	9	0	3	16	0	0	15	8	17	0	4	14	15
<b>Total</b>	15	112	31	0	14	160	0	0	109	124	324	0	49	307	116

**Fonte:** Próprio autor.

Através das Tabelas 23 e 24 é possível perceber a semelhança no comportamento da contratação de veículos SPOT. Os últimos clientes demandaram mais viagens esporádicas, com destaque para os que eram atendidos por menos transportadores ou possuíam maior demanda (como os clientes 17, 21, 24, 25, 26, 29 e 30). Entretanto, como a demanda “real” simulada foi expressivamente superior à demanda prevista, o total absoluto de veículos SPOT contratados foi 44,75% maior – passando de 943 no Cenário 1 para 1365 no Cenário 3. Por fim, as Tabelas 25 e 26 apresentam os resultados de variação da demanda por período por cliente, para o Cenário 3.

**Tabela 25:** Variação na demanda por cliente por período (Clientes 1-15; C3).

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>C7</b>	<b>C8</b>	<b>C9</b>	<b>C10</b>	<b>C11</b>	<b>C12</b>	<b>C13</b>	<b>C14</b>	<b>C15</b>
<b>P1</b>	10.8%	15.6%	17.5%	11.2%	10.7%	16.2%	12.1%	17.5%	13.2%	18.0%	20.8%	14.5%	16.7%	14.6%	12.5%
<b>P2</b>	10.1%	15.8%	17.2%	12.1%	10.9%	16.8%	12.3%	17.0%	12.5%	17.2%	21.2%	14.4%	17.0%	14.6%	13.0%
<b>P3</b>	9.3%	17.0%	16.5%	13.0%	11.5%	18.5%	11.9%	16.9%	10.3%	15.5%	21.4%	13.2%	16.5%	14.5%	13.7%
<b>P4</b>	10.4%	15.1%	17.4%	12.1%	10.9%	17.5%	12.5%	17.9%	12.4%	17.5%	20.9%	13.1%	16.1%	13.6%	12.8%
<b>P5</b>	10.1%	15.6%	17.3%	12.2%	10.8%	16.8%	12.3%	17.3%	12.5%	17.6%	21.0%	14.2%	16.8%	14.3%	12.8%
<b>P6</b>	10.3%	15.3%	17.5%	11.9%	10.5%	15.5%	12.2%	17.0%	13.5%	18.6%	20.9%	15.5%	17.4%	14.8%	12.4%
<b>P7</b>	10.0%	15.5%	17.5%	12.0%	10.6%	17.0%	12.1%	17.5%	12.7%	17.4%	21.1%	14.4%	16.5%	14.8%	12.8%
<b>P8</b>	9.9%	17.0%	16.5%	13.2%	12.4%	18.9%	11.6%	17.5%	10.9%	16.3%	21.0%	14.1%	17.8%	13.2%	13.6%
<b>P9</b>	10.7%	15.1%	17.5%	11.3%	10.9%	16.6%	12.7%	17.2%	13.4%	17.3%	21.3%	14.3%	16.9%	14.3%	13.0%
<b>P10</b>	9.9%	15.8%	17.3%	12.1%	10.4%	16.3%	12.3%	16.8%	12.6%	17.4%	21.2%	14.6%	16.8%	15.1%	12.9%

<b>P11</b>	8.8%	16.9%	16.9%	12.7%	10.6%	17.3%	11.2%	16.6%	11.7%	16.1%	21.7%	15.8%	17.2%	16.5%	13.2%
<b>P12</b>	9.6%	16.3%	17.1%	12.4%	10.8%	17.1%	11.9%	16.9%	12.1%	16.8%	21.3%	14.8%	17.0%	15.3%	13.1%
<b>P13</b>	9.9%	16.9%	16.5%	13.2%	12.2%	18.3%	11.8%	17.4%	11.0%	16.5%	21.0%	14.2%	17.7%	13.6%	13.4%
<b>P14</b>	10.4%	15.0%	17.6%	11.9%	10.6%	16.8%	12.3%	17.8%	13.0%	17.9%	20.9%	13.9%	16.3%	14.1%	12.6%
<b>P15</b>	9.9%	15.6%	17.3%	11.8%	10.7%	16.5%	12.5%	17.0%	12.7%	17.1%	21.3%	14.7%	16.9%	14.8%	13.2%
<b>P16</b>	9.4%	16.8%	16.1%	12.1%	10.9%	17.2%	11.4%	17.3%	11.7%	16.7%	20.9%	16.7%	17.7%	17.6%	13.4%
<b>P17</b>	9.9%	15.9%	17.2%	12.2%	10.7%	16.6%	12.2%	16.9%	12.4%	17.3%	21.2%	14.5%	17.0%	14.9%	12.9%
<b>P18</b>	10.0%	16.6%	16.8%	13.0%	11.6%	16.7%	12.5%	16.1%	11.3%	17.1%	21.1%	13.9%	17.9%	13.6%	13.3%
<b>P19</b>	9.9%	15.0%	17.4%	11.0%	10.5%	15.5%	13.4%	16.8%	13.4%	16.8%	21.6%	15.1%	17.2%	14.6%	13.7%
<b>P20</b>	9.9%	15.6%	17.3%	11.8%	10.7%	16.5%	12.5%	17.1%	12.7%	17.1%	21.3%	14.7%	17.0%	14.8%	13.2%
<b>P21</b>	9.3%	16.1%	16.3%	11.7%	10.3%	17.3%	11.5%	17.9%	12.5%	17.0%	21.0%	16.1%	16.8%	17.1%	13.0%
<b>P22</b>	9.9%	15.8%	17.2%	12.1%	10.8%	16.7%	12.3%	17.0%	12.4%	17.1%	21.2%	14.6%	17.0%	14.7%	13.1%
<b>P23</b>	8.9%	16.5%	16.8%	13.6%	11.1%	17.6%	12.3%	16.1%	10.9%	16.2%	21.8%	14.2%	17.5%	14.4%	13.6%
<b>P24</b>	9.9%	15.4%	17.6%	11.7%	9.9%	15.7%	12.5%	16.6%	13.1%	17.7%	21.2%	14.7%	16.5%	15.6%	12.7%
<b>P25</b>	10.4%	15.8%	17.4%	11.8%	10.8%	16.6%	12.2%	17.2%	12.7%	17.6%	21.0%	14.3%	16.8%	14.3%	12.8%
<b>P26</b>	9.8%	17.6%	16.4%	14.3%	11.9%	18.2%	10.8%	16.7%	10.2%	17.5%	20.6%	13.7%	17.4%	14.4%	12.6%
<b>P27</b>	9.7%	16.5%	17.1%	13.1%	11.0%	17.1%	12.1%	16.3%	11.0%	17.7%	21.7%	13.7%	17.4%	13.7%	12.8%
<b>P28</b>	8.9%	16.4%	16.8%	13.7%	11.1%	17.4%	12.3%	16.2%	10.9%	16.4%	21.7%	14.2%	17.5%	14.4%	13.5%
<b>P29</b>	10.4%	15.7%	17.4%	11.7%	10.9%	16.9%	12.2%	17.0%	12.7%	17.2%	21.2%	14.4%	17.0%	14.6%	13.0%
<b>P30</b>	10.3%	15.6%	17.7%	12.2%	10.9%	16.7%	12.4%	16.9%	12.6%	17.5%	21.2%	13.6%	16.7%	13.5%	12.8%
<b>P31</b>	10.3%	15.5%	17.3%	11.8%	10.9%	16.7%	12.4%	17.1%	12.8%	17.2%	21.2%	14.4%	17.0%	14.5%	13.0%
<b>P32</b>	10.7%	15.2%	17.2%	11.6%	10.8%	15.3%	11.6%	17.8%	14.9%	18.7%	19.6%	16.8%	17.2%	16.1%	12.2%
<b>P33</b>	10.1%	15.8%	17.2%	12.1%	10.9%	16.4%	12.0%	17.2%	13.0%	17.7%	20.7%	15.1%	17.1%	15.1%	12.8%
<b>P34</b>	8.4%	17.7%	16.3%	14.3%	10.9%	17.4%	11.4%	16.6%	10.1%	17.0%	20.9%	14.7%	17.3%	15.2%	13.1%
<b>P35</b>	9.9%	15.8%	17.4%	12.3%	10.7%	16.4%	12.4%	16.7%	12.2%	17.8%	21.5%	14.4%	17.3%	14.2%	12.8%
<b>P36</b>	10.1%	15.6%	17.3%	12.2%	10.8%	16.8%	12.3%	17.3%	12.5%	17.6%	21.0%	14.2%	16.8%	14.3%	12.8%

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 26:** Variação na demanda por cliente por período (Clientes 16-30; C3).

	<b>C16</b>	<b>C17</b>	<b>C18</b>	<b>C19</b>	<b>C20</b>	<b>C21</b>	<b>C22</b>	<b>C23</b>	<b>C24</b>	<b>C25</b>	<b>C26</b>	<b>C27</b>	<b>C28</b>	<b>C29</b>	<b>C30</b>
<b>P1</b>	13.9%	15.6%	20.9%	13.5%	14.5%	16.1%	18.0%	19.5%	16.4%	12.4%	16.4%	15.1%	14.6%	15.1%	12.0%

<b>P2</b>	14.6%	16.8%	20.6%	13.7%	15.2%	16.0%	18.3%	19.6%	15.6%	11.9%	15.5%	14.6%	13.0%	16.0%	13.3%
<b>P3</b>	14.3%	18.3%	19.8%	14.3%	15.0%	14.9%	17.8%	19.5%	14.8%	12.0%	13.8%	15.5%	11.0%	16.4%	13.1%
<b>P4</b>	14.2%	17.4%	20.5%	14.6%	14.7%	16.1%	18.7%	20.4%	15.7%	11.3%	17.6%	13.3%	13.8%	16.1%	15.0%
<b>P5</b>	14.4%	17.0%	20.8%	13.9%	15.2%	16.2%	18.4%	19.8%	15.7%	11.9%	16.1%	14.3%	13.3%	16.1%	13.5%
<b>P6</b>	14.5%	15.9%	21.5%	13.2%	15.5%	16.9%	18.4%	19.5%	16.0%	12.2%	16.2%	14.5%	14.1%	15.8%	12.7%
<b>P7</b>	14.2%	16.5%	20.9%	13.5%	15.2%	16.0%	18.4%	19.6%	15.9%	12.2%	16.1%	14.7%	13.4%	16.0%	13.0%
<b>P8</b>	14.5%	18.4%	19.2%	15.3%	16.1%	15.4%	17.8%	18.9%	13.7%	12.8%	13.2%	16.3%	10.8%	16.6%	11.9%
<b>P9</b>	14.7%	16.3%	20.4%	13.8%	14.9%	15.8%	18.7%	20.0%	16.1%	11.0%	16.5%	13.5%	14.2%	15.6%	14.3%
<b>P10</b>	14.5%	16.5%	21.2%	13.2%	15.0%	16.3%	18.2%	19.7%	16.1%	12.0%	15.8%	14.6%	13.2%	15.9%	13.2%
<b>P11</b>	14.0%	15.9%	20.8%	12.2%	15.6%	15.1%	17.4%	18.1%	15.4%	13.9%	11.9%	17.1%	10.7%	16.1%	9.6%
<b>P12</b>	14.2%	16.6%	20.8%	13.2%	15.4%	15.8%	18.0%	19.1%	15.6%	12.5%	14.5%	15.8%	12.3%	16.1%	11.9%
<b>P13</b>	14.5%	18.2%	19.3%	14.9%	15.7%	15.4%	17.8%	19.1%	14.5%	12.5%	13.6%	15.9%	11.1%	16.4%	12.1%
<b>P14</b>	14.2%	16.6%	20.9%	14.0%	14.9%	16.3%	18.7%	20.1%	16.0%	11.6%	17.4%	13.7%	14.5%	16.0%	13.9%
<b>P15</b>	14.8%	16.7%	21.0%	13.4%	15.5%	15.8%	18.3%	19.8%	15.8%	11.9%	15.8%	14.6%	13.4%	15.6%	13.5%
<b>P16</b>	15.6%	18.1%	21.5%	14.0%	13.4%	16.5%	17.7%	19.6%	13.7%	12.6%	12.1%	17.2%	9.8%	15.3%	10.9%
<b>P17</b>	14.5%	16.8%	20.9%	13.5%	15.1%	16.1%	18.2%	19.6%	15.6%	12.0%	15.4%	14.8%	12.9%	16.0%	13.0%
<b>P18</b>	14.8%	17.8%	20.1%	14.2%	15.8%	16.1%	17.9%	19.7%	15.2%	11.5%	14.9%	14.5%	12.0%	16.4%	13.8%
<b>P19</b>	15.8%	16.5%	21.6%	13.0%	15.7%	15.6%	18.4%	20.5%	16.0%	11.3%	16.8%	13.8%	14.4%	14.5%	15.0%
<b>P20</b>	14.8%	16.7%	21.1%	13.4%	15.4%	15.9%	18.3%	19.8%	15.8%	12.0%	15.8%	14.6%	13.6%	15.6%	13.4%
<b>P21</b>	14.9%	17.1%	21.9%	13.5%	14.3%	16.4%	17.9%	19.3%	15.2%	12.8%	13.7%	16.5%	11.8%	15.5%	10.9%
<b>P22</b>	14.7%	16.8%	20.9%	13.6%	15.3%	16.0%	18.2%	19.6%	15.7%	12.0%	15.4%	14.8%	13.2%	15.8%	13.1%
<b>P23</b>	15.2%	18.4%	20.4%	13.6%	15.9%	16.2%	18.6%	19.3%	14.7%	11.7%	14.1%	14.8%	10.2%	17.4%	14.0%
<b>P24</b>	14.4%	16.1%	21.6%	12.7%	14.6%	16.5%	18.3%	19.8%	16.7%	11.5%	16.4%	14.2%	14.0%	15.7%	13.5%
<b>P25</b>	14.0%	16.1%	20.7%	13.6%	15.4%	16.0%	18.1%	19.5%	16.0%	12.3%	16.1%	14.8%	13.9%	15.7%	12.6%
<b>P26</b>	13.3%	18.2%	19.6%	14.8%	14.9%	16.7%	17.5%	18.6%	14.5%	12.8%	12.8%	16.0%	9.7%	18.0%	10.8%
<b>P27</b>	14.0%	16.8%	20.1%	13.6%	14.6%	16.8%	18.8%	19.0%	15.8%	12.3%	15.5%	15.2%	13.0%	17.3%	12.8%
<b>P28</b>	15.1%	18.3%	20.3%	13.6%	15.6%	16.2%	18.6%	19.4%	15.1%	11.8%	14.3%	14.8%	10.5%	17.2%	13.8%
<b>P29</b>	14.5%	16.7%	20.5%	13.7%	14.9%	15.9%	18.4%	19.6%	15.5%	11.9%	15.6%	15.0%	13.7%	16.0%	13.3%
<b>P30</b>	13.8%	16.2%	20.4%	13.5%	15.7%	15.8%	18.3%	19.5%	16.3%	12.1%	16.6%	14.2%	13.7%	16.2%	13.3%
<b>P31</b>	14.6%	16.6%	20.6%	13.8%	15.3%	15.9%	18.4%	19.8%	15.8%	11.8%	15.9%	14.3%	13.5%	15.9%	13.6%

<b>P32</b>	14.6%	16.5%	22.1%	13.9%	16.4%	16.4%	16.9%	19.8%	15.2%	12.4%	14.9%	14.6%	13.1%	14.9%	11.8%
<b>P33</b>	14.5%	16.8%	21.2%	13.7%	15.6%	16.2%	17.9%	19.6%	15.5%	12.2%	15.2%	14.9%	12.9%	15.8%	12.5%
<b>P34</b>	14.0%	18.2%	21.2%	13.5%	15.7%	16.5%	17.2%	18.7%	14.8%	13.4%	13.0%	17.2%	10.2%	16.7%	10.6%
<b>P35</b>	14.5%	16.4%	20.7%	13.3%	15.2%	16.6%	18.8%	19.4%	16.1%	12.2%	16.1%	14.8%	13.6%	16.4%	13.1%
<b>P36</b>	14.4%	17.0%	20.8%	13.9%	15.3%	16.2%	18.4%	19.8%	15.7%	11.9%	16.1%	14.3%	13.4%	16.1%	13.5%

**Fonte:** Próprio autor.

A variação da demanda, no Cenário 3, foi responsável pela diferença na quantidade de veículos SPOT necessários para a manutenção do nível de serviço em 100%. Chegando à 22%, essa variação ocasionou aumentos na demanda que não estavam previstos originalmente, e só puderam ser incorporados após cada rodada do método, para o próximo período. O somatório de causas de imprevisibilidade nesse cenário gerou um aumento nos custos de ambos os modelos – otimização e na combinação. Esses custos estão descritos, em unidades monetárias, na Tabela 27.

**Tabela 27:** Custos totais no modelo de otimização e na combinação (em u.m.; C3).

Otimização	Combinação	Diferença
109.843.071	112.643.446	2,55%

**Fonte:** Próprio autor.

Apesar da diferença relativa ter se reduzido devido ao aumento do custo da otimização – de aproximadamente 3,46% no Cenário 1 para 2,55% no Cenário 3 – corrobora-se novamente a necessidade de consideração de características dinâmicas e estocásticas em um problema de seleção de frota. Na seção a seguir, é apresentada a discussão dos resultados anteriormente apresentados.

#### 4.4. Discussões

Os cenários construídos para a análise de sensibilidade foram suficientes para analisar a importância da combinação das técnicas de Simulação e Otimização no método apresentado. Para os Cenários 1 e 2, foi aplicado um fator de variabilidade na demanda comumente utilizado para a consideração estocástica – a variação entre dois limitantes igualmente distantes da moda – que não altera significativamente a média da amostra, mas considera que o valor pode se alterar ao acaso.

Nesses cenários, percebe-se que a variação da demanda por período flutuou entre -3% e 3.3% para o Cenário 1 e -8,9% e 10,1% para o Cenário 2. Essas variações, embora sejam consideráveis, não foram suficientes para perturbar consideravelmente a demanda total, que passou de 35.036.483 unidades volumétricas para 34.932.483 e 34.741.462 unidades nos Cenários 1 e 2, representando uma variação relativa de apenas -0,3% e -0,84%, respectivamente.

Entretanto, a variação na demanda resultou em um desbalanceamento no dimensionamento da frota entre os clientes atendidos. Mesmo com uma frota aparentemente superdimensionada pelo modelo de otimização, foram contratados veículos SPOT em todos os cenários, demonstrando que a solução proposta pelo modelo de otimização é incompleta. Esse desbalanceamento ocorre quando veículos inicialmente dimensionados para o atendimento de uma rota específica são utilizados para o atendimento de outra rota, tanto em momentos nos quais a demanda da primeira rota foi menor do que o esperado quanto em momentos onde a demanda da segunda rota foi maior do que o esperado, gerando uma reação em cadeia que altera toda a estrutura do dimensionamento. Na segunda política de atendimento do trabalho de Eskandari e Mahmoodi (2015) são executados algoritmos similares aos desse trabalho. Para o roteamento de embarcações, cada plataforma solicita um atendimento que deve ser realizado pelo menor veículo possível e, preferencialmente, de contrato regular. Caso essa embarcação de contrato regular não esteja disponível, uma embarcação SPOT é contratada. Semelhantemente ao resultado apresentado no presente estudo, a quantidade de veículos regulares contratados no trabalho de Eskandari e Mahmoodi (2015) é inferior ao máximo disponibilizado e, durante a simulação, veículos SPOT são contratados, devido a dinamicidade e estocasticidade do problema estudado. Apesar da quantidade de veículos ser menor se comparada ao presente estudo, os autores chegaram à um custo de contratação de transportes eventuais de até 30,6% dos custos totais de contratação, o que corrobora o aumento dos custos quando considerada a flexibilização da frota regular contratada.

Dessa forma, mesmo com veículos aparentemente excedentes no modelo de simulação (111 veículos no Cenário 1 e 140 veículos no Cenário 2), foram necessárias as contratações de veículos SPOT em ambos os cenários. Para o Cenário 1, a soma dos veículos contratados simultaneamente em todos os períodos foi 939, com valor máximo de 114 no 36º período. Por sua vez, para o Cenário 2, a soma dos veículos contratados simultaneamente em todos os períodos foi 881, com valor máximo de 103 também no 36º período – uma vez que esse período possui a maior demanda prevista de todo horizonte estratégico. Apesar do resultado contra

intuitivo (o cenário com maior amplitude de variação solicitar menos veículos esporádicos), deve-se ressaltar que a variação na demanda nesses cenários poderia ser tanto positiva quanto negativa, conferindo então a diferença à aleatoriedade do modelo de simulação. Essa informação, quando fornecida *à priori* ao tomador de decisão, possibilita a programação com antecedência para o atendimento de picos, diminuindo os custos de contratação de veículos regulares e até mesmo a negociação de fretes para o contrato de veículos SPOT.

Ainda com relação aos veículos esporádicos contratados, outro resultado importante a ser discutido é a quantidade de veículos contratados por cliente, em cada período. Esse número é um importante indicador para o tomador de decisão, pois aponta quais clientes possuem a frota mais sensível a variações. Nos casos dos Cenários 1 e 2, os clientes 26 e 29 apresentaram a maior quantidade de veículos SPOT simultâneos contratados em todos os períodos, totalizando 273 e 255 veículos para o Cenário 1 e 263 e 255 veículos para o Cenário 2. Ao analisar as características desses mesmos clientes, é possível perceber que os mesmos são atendidos somente por um transportador cada e possuem demandas consideráveis, fornecendo ainda mais informações *à priori* ao tomador de decisão, e possibilitando a programação de situações atípicas com antecedência.

Esse resultado era então esperado, pois somado à exclusividade de transportador e altas demandas, os modelos de otimização e simulação possuíam lógicas diferentes para a seleção do veículo, representando respectivamente o processo de dimensionamento e a operacionalização da decisão. Ao passo que o modelo de otimização buscava minimizar o custo total considerando todos os atendimentos do horizonte estratégico, o modelo de simulação alocava sequencialmente (do cliente 1 ao cliente 30) rotas a veículos disponíveis, selecionando um transportador aleatoriamente e elegendo o seu veículo mais barato disponível para o atendimento. Esse resultado não é apresentado nos trabalhos de Costa-Salas, Sarache e Überwimmer (2017) e Azimi (2015), por exemplo, uma vez que os mesmos utilizam os resultados do modelo de simulação como entrada para a otimização, excluindo a possibilidade do teste “real” da frota otimizada e, assim, eliminando a necessidade de veículos SPOT, uma vez que a otimização já possui a informação simulada.

Os modelos de otimização e a abordagem híbrida de simulação-otimização apresentaram uma diferença nos custos de 3,46% e 3,34% para os Cenários 1 e 2, respectivamente. Esse custo, embora relativo, representa a diferença da solução proposta pelo

modelo de otimização e da necessidade do sistema quando consideradas as características mais próximas da realidade.

Por sua vez, o Cenário 3 é caracterizado por uma variação excepcional na demanda – com limites entre a demanda prevista e +30%. Essa situação busca representar horizontes estratégicos onde a demanda é muito superior à prevista, como em anos com estratégia de marketing para aumento de demanda. Nesse cenário, a variação da demanda flutuou entre +8,4% e +22,1% e, diferentemente dos cenários anteriores, gerou uma perturbação expressiva na demanda total absoluta, que passou de 35.036.483 unidades volumétricas para 40.107.259 – representando um aumento relativo de 14,5%.

Mesmo com o aumento da demanda, a diferença entre os dimensionamentos do modelo de otimização e da abordagem híbrida ainda foi positiva, com o valor de 129 veículos excedentes na combinação, mostrando um desbalanceamento do dimensionamento similar aos dos cenários previamente apresentados. Esse desbalanceamento, no caso do Cenário 3, foi potencializado ainda mais pela flutuação expressiva da demanda, requisitando a contratação de 1.343 veículos SPOT em todos os períodos, com valor máximo de 125 no 31<sup>a</sup> período – valor 52,44% maior que a quantidade de veículos esporádicos contratados no Cenário 2.

Para a quantidade de veículos esporádicos contratados simultaneamente por cliente em cada período, o comportamento foi semelhante aos demais cenários. Os últimos clientes apresentaram maior quantidade de solicitações simultâneas de veículos SPOT, uma vez que o algoritmo utilizado pelo embarcador (e replicado no simulador) selecionou veículos somente sob a ótica operacional. Adicionalmente, a consideração de que esses clientes possuíssem maior demanda e menor quantidade de transportadores para o atendimento também é válida para esse cenário. No Cenário 3, os valores chegaram a 324 veículos para o Cliente 26 e 307 veículos para o Cliente 29.

Então, no Cenário 3, a agregação das diferenças entre o modelo de otimização e a abordagem híbrida gerou uma diferença de 2.800.375 unidades monetárias no custo entre os modelos, representando 2,55% de variação. Como já discutido anteriormente, embora o custo relativo seja menor se comparado aos outros cenários, a diferença absoluta entre os custos dos modelos de otimização e a combinação simulação-otimização são maiores – indicando que uma variação maior na demanda ocasiona uma perturbação ainda maior nas diferenças entre os modelos.

É importante observar que os custos do modelo de otimização nos 3 cenários apresentados são os custos após a rodada de todos os períodos no horizonte rolante. Em outras palavras, esses são os custos totais já considerando as demandas simuladas e as variações da demanda dos períodos passados. Para comparar o resultado do método puro, sem a consideração de horizontes rolantes e simulação, deve-se considerar o custo total de 95.341.886 unidades monetárias, bem como a frota dimensionada na primeira rodada do otimizador, disponível na Tabela 28.

**Tabela 28:** Dimensionamento da frota do otimizador multiperíodo.

Transportador	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Veículo 5	Veículo 6
Transportador 1	4	0	111	136	2	7
Transportador 2	0	6	71	35	0	1
Transportador 3	0	0	2	0	0	0
Transportador 4	0	0	160	109	0	38
Transportador 5	0	0	11	6	0	1
Transportador 6	0	0	13	118	2	46
Transportador 7	0	0	73	19	0	3
Transportador 8	0	0	2	3	0	2
Transportador 9	27	0	76	3	2	0

**Fonte:** Próprio autor.

Através da Tabela 28, é possível perceber que a frota dimensionada sem a consideração de variabilidade e sem a complementação da simulação totaliza 1.089 veículos, valor abaixo do dimensionado pelo próprio modelo de otimização com a consideração de horizontes rolantes. Esse indicador mostra como a primeira execução do modelo de otimização – sem o conhecimento do impacto que as características simuladas ocasionam na frota – representa a tomada de decisão que seria realizada caso um método determinístico de otimização fosse utilizado puramente.

Em outras palavras, mesmo considerando características estocásticas em um modelo de otimização (o período 36 rodado considera as demandas simuladas), o dimensionamento é otimista, uma vez que o método de seleção na vida real é diferente do método de seleção da otimização. De maneira semelhante, Nourinejad e Roorda (2014) desenvolvem um modelo combinado onde a simulação é utilizada para aproximar o sistema otimizado do sistema real,

com demandas desconhecidas até que sejam solicitadas, em sistemas de compartilhamento de veículos, e o compara com um modelo de otimização pura. Essa estrutura se assemelha ao problema aqui tratado, uma vez que a simulação enxerga somente uma solicitação de transporte por vez. Como resultado da comparação entre o modelo “otimista” e o modelo “realista”, os autores apontam o aumento no tempo de realocação de veículos para atendimento da demanda em até 7,5%, indicando que o modelo com a consideração da simulação aprimora o conhecimento do tomador de decisão.

Dessa forma, a contribuição da combinação das duas técnicas para a solução do problema de seleção de frota mostra-se positiva. Mais importante do que analisar os valores absolutos dos resultados, como a diferença nos custos e a quantidade de veículos contratados, é analisar sob a ótica do tomador de decisão. Nessa circunstância, esse agente obtém conhecimentos mais assertivos com relação aos parâmetros considerados, diminuindo a imprevisibilidade das situações reais antes mesmo que aconteçam.

O dimensionamento da frota é um importante resultado fornecido pelo método proposto, onde a quantidade de caminhões é o valor máximo para cada um dos períodos rodados. Entretanto, no caso estudado, a resposta fornecida para o tomador de decisão é uma combinação de todos os indicadores coletados, e não somente a composição da frota. Deve-se indicar, por exemplo, a probabilidade de falta de veículos regulares para o atendimento, a variação possível da demanda e a utilização real dos veículos dimensionados, sabendo que nesse caso é inviável a utilização da frota da maneira como foi dimensionada pelo otimizador. Dessa maneira, o embarcador é capaz de realocar ou redimensionar a frota com o objetivo de diminuir os custos reais de transporte, executando uma decisão estratégica através de considerações também táticas e operacionais na modelagem.

Em comparação ao estudo de Zheng e Chen (2015), essa decisão baseada em um conjunto de indicadores é corroborada. Embora considerem em seu estudo uma frota própria de embarcações, os autores desenvolvem diferentes cenários e a informação utilizada pelo tomador de decisão é composta pela combinação dos resultados desses diferentes cenários, que possuem incerteza no tocante a políticas de subsídio e variações na demanda e nos preços de combustível.

Vale ressaltar que o objetivo do método híbrido é fornecer um dimensionamento único para o embarcador, a fim de firmar contratos com transportadores no início de cada horizonte estratégico. Dessa forma, o método não incorpora situações que ocorram após a contratação,

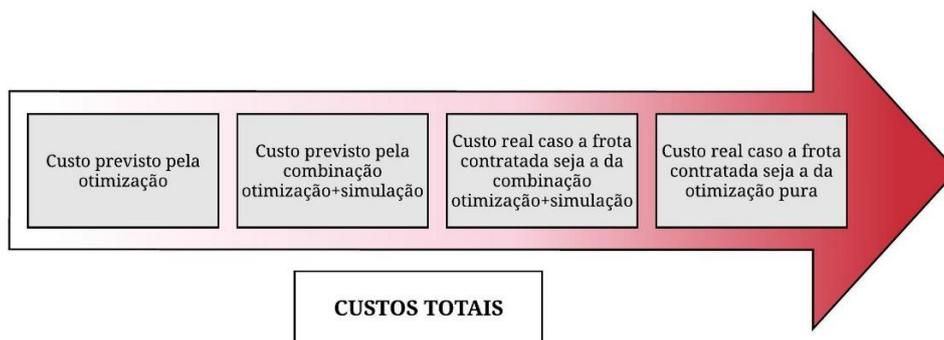
mesmo buscando prevê-las da melhor forma possível. Essas situações previstas, entretanto, podem ser aprimoradas – por exemplo, o algoritmo de seleção de veículos utilizado pelo embarcador no horizonte operacional (e no modelo de simulação, na abordagem híbrida) pode ser melhorado com o objetivo de diminuir os custos totais do dimensionamento. Da mesma forma, Powell et al. (2014) utilizam a combinação da simulação e otimização para dimensionar locomotivas baseando-se em características operacionais no curto e médio prazo, que dificilmente seriam incorporadas sem a utilização de um modelo de simulação, fornecendo ao tomador de decisão *insights* sobre o comportamento do seu sistema em diversos cenários de interesse.

Após a análise dos resultados, então, o tomador de decisão pode executar a ferramenta uma segunda vez, aumentando por exemplo a quantidade de veículos disponíveis nos transportadores que atendem os clientes onde foram utilizados mais veículos SPOT.

Esse aumento na quantidade de veículos através do método combinado ocasionaria um aumento nos custos totais previstos para a implementação da decisão, se comparados com os custos previstos através da otimização. Entretanto, a configuração da frota que ocasiona esse custo mais elevado é mais assertiva e possui uma maior probabilidade de garantir o atendimento das rotas sem a necessidade de contratação de transportes eventuais diminuindo, então, os custos totais reais após a implementação da solução. Halvonsen-Weare e Fagerholt (2017) também utilizam a combinação de otimização e simulação para tornar a solução mais aderente ao caso real e, da mesma forma, concluem que os custos totais de implementação são menores mesmo que aparentemente aumentem a previsão de custos com a frota.

A Figura 15 ilustra as expectativas de custos totais previstos pelas técnicas e os custos concretizados das soluções, partindo de custos menores à esquerda para custos maiores, à direita (sentido da seta).

**Figura 15:** Consolidação dos custos totais conforme a solução analisada.



**Fonte:** Próprio autor.

Dessa forma, infere-se a viabilidade da solução proposta pelo método híbrido que, embora mais cara em um primeiro momento de análise, proporciona os melhores resultados após a implementação da solução.

Ainda, destaca-se a possibilidade de generalização do método descrito. Por se tratarem de técnicas que são amplamente utilizadas como apoio à tomada de decisão em diversos problemas, conclui-se que a combinação da simulação e da otimização também pode ser aplicada para a solução desses mesmos problemas. Entretanto, a estrutura utilizada nesse trabalho, de Simulação-Otimização Sequencial com Horizontes Rolantes, possui particularidades que fornecem benefícios à um conjunto de problemas específico.

Primeiramente, a estrutura do método proposto é aplicável em situações onde a tomada de decisão deve ser feita em um horizonte de planejamento maior, mas detalhes de níveis de planejamento menores também devem ser considerados, como realizado com a operacionalização na simulação da frota dimensionada pelo otimizador. Adicionalmente, esses sistemas devem apresentar tomadas de decisão sob incerteza, uma vez que o método apresenta a inserção de fatores (como a previsão da variabilidade da demanda) que influenciam a decisão dos próximos períodos. Por fim, esses problemas devem apresentar a necessidade de atualização de parâmetros a cada período, como no caso da demanda congelada a cada período simulado.

Esse conjunto de características descritas demanda uma solução que forneça ao tomador de decisão um conhecimento que o auxilie no planejamento das suas atividades. A consideração de horizontes rolantes permite a atualização de informações concretizadas e o refinamento do resultado final, ao passo que a simulação permite a consideração de elementos como a variabilidade e a operacionalização dos recursos dimensionados sem a necessidade de

uma modelagem complexa, além do fornecimento do direcionamento à uma boa solução fornecida pela otimização.

## 5. CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou uma combinação da simulação e otimização de sistemas para a abordagem de um problema de seleção de frota heterogênea para uma indústria de bens de consumo. Separadamente, sabe-se que essas ferramentas são amplamente utilizadas para o auxílio na tomada de decisão. Entretanto, por se tratarem de ferramentas com interesses muitas vezes distintos, acabam sendo aplicadas de maneira excludente na solução de problemas, quando a sua aplicação conjunta poderia ser complementar e fornecer uma solução superior ao tomador de decisão. Para o problema de seleção de frota, onde o embarcador deve decidir entre contratar uma frota numerosa o suficiente para garantir o atendimento e contratar uma frota mínima possível para minimizar os custos de contratação, a aplicação conjunta das ferramentas é capaz de auxiliar o tomador de decisão.

Nesse caso, desenvolvendo uma abordagem sequencial de simulação-otimização com a consideração de horizontes rolantes, tornou-se possível para o embarcador tomar decisões com uma racionalidade maior, uma vez que o mesmo pode incorporar características (como a incerteza e a dinamicidade) do seu sistema de forma mais simples em um método de otimização, levando em conta informações de períodos já executados. Através dos resultados obtidos com a execução do procedimento, o embarcador é capaz de analisar a frota dimensionada sob outros indicadores, como a necessidade de contratação de veículos SPOT e o desbalanceamento dos veículos regulares contratados. Adicionalmente, o objetivo desse método é fornecer o dimensionamento ao embarcador de forma singular, a fim de contratar uma frota mais assertiva para os seus atendimentos. Em outras palavras, o tomador de decisão utilizará informações tático-operacionais para tomar uma decisão estratégica, no início do horizonte estratégico, quando deve contratar os transportadores selecionados.

Dessa forma, o objetivo do estudo, que era fornecer ao o tomador de decisão boas soluções que incorporassem incertezas e características complexas em sua composição, foi atingido. Através de três cenários de interesse, o impacto dessa consideração de complexidade foi avaliado, apontando que a frota dimensionada para esses cenários caso essas características complexas não tivessem sido incorporadas seria subdimensionada, ocasionando custos não previstos após a implementação da solução.

Adicionalmente, os objetivos secundários também foram atingidos. Um método utilizável por empresas no planejamento de longo prazo das atividades foi desenvolvido, descrevendo as etapas da implementação desse método, bem como possíveis análises a serem

realizadas para apoiar a contratação de fornecedores de transporte. Esse método foi então testado em um recorte de estudo de caso real, e apontou as principais diferenças entre a consideração da otimização de forma pura e da combinação das técnicas. Além da variabilidade, o caso real apresenta uma operacionalização do dimensionamento que é dificilmente considerada na otimização e impacta fortemente o resultado final, no tocante à utilização de veículos e custos totais. Por fim, os cenários executados possibilitaram a investigação do impacto da variação da demanda no resultado final. Percebeu-se que a variação da demanda, somada à fatores como a dinamicidade da operação e a restrição de rotas e transportadores, tem forte impacto na capacidade da frota dimensionada, principalmente em situações onde a demanda possui alta imprevisibilidade.

Então, observa-se que as contribuições desse estudo aconteceram tanto no âmbito acadêmico quanto no prático, ambos incorporando decisões recorrentes nos níveis estratégicos, táticos e operacionais. Para as contribuições acadêmicas, aponta-se a solução do problema de dimensionamento de frota através de uma abordagem antes não apresentada, que fornece *insights* mais completos e resultados mais aderentes ao problema real. Por sua vez, para a prática, foi possível fornecer um método ao tomador de decisão que possibilite a flexibilização da tomada de decisão, prevendo situações atípicas (falta de veículos para o atendimento, por exemplo) e considerando fatores inerentes do seu sistema (demanda com altas variações, por exemplo), proporcionando uma maior segurança e um melhor uso de seus ativos.

Entretanto, reconhece-se que o estudo possui limitações. O caso utilizado para o teste do método proposto é somente um recorte de um problema real de seleção de frota de uma indústria de bens de consumo. Sabe-se, na literatura, que problemas de seleção de frota que possuem muitas características complexas são de difícil solução por métodos exatos e, no método proposto, o modelo de otimização é baseado em um método exato. Então, a consideração do problema completo de seleção de frota dessa indústria de bens e consumo seria de difícil solução, reduzindo o benefício da utilização do método. Adicionalmente, a construção de modelos de otimização e simulação requerem o conhecimento técnico dos usuários – e encontrar um usuário que possua esse conhecimento tanto para a modelagem em otimização quanto para a modelagem em simulação não é tarefa fácil. Dessa forma, torna-se necessária a composição de uma equipe de trabalho para a aplicação do método, gerando custos adicionais para o embarcador.

Como lições aprendidas, destaca-se a necessidade da análise dos dados criteriosamente, *a priori*. A modelagem em Pesquisa Operacional depende fortemente dos dados de entrada utilizados. Em outras palavras, conhecer e analisar os dados de entrada no início da modelagem pode poupar esforços desnecessários e retrabalhos durante a análise de resultados. Adicionalmente, reconhecer o escopo do projeto e as necessidades do tomador de decisão também são fundamentais. Desenvolver um método extremamente complexo com a consideração de inúmeras variáveis é possível, mas nem sempre está dentro do escopo do trabalho ou das expectativas do usuário final. Então, fornecer informações limpas e objetivas geralmente enriquecem mais a solução se comparadas à resultados complexos e poluídos por informações desnecessárias.

Como recomendações de trabalhos e expectativas futuras, aponta-se a aplicação do método em uma extensão maior de problemas, criando assim uma ferramenta utilizável em diversos casos. Como o método busca simplificar a otimização e considerar a complexidade no modelo de simulação, torna-se menos árduo a adaptação de considerações e parâmetros de outros tipos de problemas, baseando-se sempre na premissa de conhecimento técnico do analista. Além disso, deseja-se testar para esse mesmo caso, ou outro caso do problema de seleção de frota com características similares, outros parâmetros que sejam incorporados pela técnica de horizontes rolantes, ou até mesmo a melhoria dos parâmetros já utilizados, como por exemplo a média móvel da variação da demanda. Por incorporar no modelo de otimização parâmetros complexos, essa técnica abre uma gama de possibilidades de estudo de análise de sensibilidade e desempenho.

Ainda, destaca-se a utilização de métodos de otimização ou simulação em tempo real que, combinados, podem trazer benefícios ainda maiores ao tomador de decisão, uma vez que os períodos de revisão da frota tenderiam ao mínimo valor possível: uma solicitação de transporte.

Por fim, um outro tipo de problema que apresenta as mesmas características é o problema de sequenciamento da produção. De forma similar ao problema de dimensionamento de frota, o sequenciamento da produção deve alocar solicitações de tarefas à recursos disponíveis de forma otimizada, além de necessitar de uma atualização da utilização desses recursos a cada novo período. Entretanto, a simples otimização de todo o planejamento da produção é otimista e incompleta, demandando também um método que agregue a

complexidade da operacionalização desse planejamento. Nesse caso, o método proposto traria benefícios similares aos apresentados no presente estudo.

## REFERÊNCIAS

- AGUEZZOUL, A. Third-party logistics selection problem: A literature review on criteria and methods. **Omega (United Kingdom)**, v. 49, p. 69–78, 2014.
- ALEM, D.; CLARK, A.; MORENO, A. Stochastic network models for logistics planning in disaster relief. **European Journal of Operational Research**, v. 255, n. 1, p. 187–206, 2016.
- Arenales, M. et al. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- Associação Brasileira de Operadores Logísticos (ABOL). **Operadores Logísticos (OLs): panorama setorial, marco regulatório e aspectos técnicos-operacionais**. 2015.
- AZIMI, P. On-line cross docking: A general new concept at a container port. **Scientia Iranica**, v. 22, n. 6, p. 2585–2594, 2015.
- BALLOU, R. H. The evolution and future of logistics and supply chain management. **European Business Review**, v. 19, n. 4, p. 332–348, 2007.
- BANKS, J. **Handbook of Simulation**. 1ª ed. Atlanta: John Wiley & Sons, 1998.
- BARRIOS, J.; GODIER, J. Fleet Sizing for Flexible Carsharing Systems. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2416, p. 1–9, 2014.
- CARREIRA, J. S.; LULLI, G.; ANTUNES, A. P. The airline long-haul fleet planning problem: The case of TAP service to/from Brazil. **European Journal of Operational Research**, v. 263, n. 2, p. 639–651, 2017.
- CHANG, K. H.; CHANG, A. L.; KUO, C. Y. A simulation-based framework for multi-objective vehicle fleet sizing of automated material handling systems: an empirical study. **Journal of Simulation**, v. 8, n. 4, p. 271–280, 2014.
- CHANG, K. H.; HUANG, Y. H.; YANG, S. P. Vehicle fleet sizing for automated material handling systems to minimize cost subject to time constraints. **IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)**, v. 46, n. 3, p. 301–312, 2014.
- CHAOWASAKOO, P. et al. Improving fleet management in mines: The benefit of heterogeneous match factor. **European Journal of Operational Research**, v. 261, n. 3, p. 1052–1065, 2017.

CIEŚLA, M. Outsourcing strategy selection for transportation services based on the Make or Buy decision. **Transport Problems**, v. 10, n. 2, p. 91–98, 2015.

COSTA-SALAS, Y.; SARACHE, W.; ÜBERWIMMER, M. Fleet size optimization in the discarded tire collection process. **Research in Transportation Business and Management**, v. 24, n. August, p. 81–89, 2017.

D'SOUZA, K. et al. An integrated design approach for evaluating the effectiveness and cost of a fleet. **The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology**, v. 13, n. 4, p. 381–397, 2016.

EKSIOGLU, B.; VURAL, A. V.; REISMAN, A. The vehicle routing problem: A taxonomic review. **Computers and Industrial Engineering**, v. 57, n. 4, p. 1472–1483, 2009.

ENGBLOM, J. et al. Multiple-method analysis of logistics costs. **International Journal of Production Economics**, v. 137, n. 1, p. 29–35, 2012.

ESKANDARI, H.; MAHMOODI, E. A simulation-based multi-objective optimization study of the fleet sizing problem in the offshore industry. **Maritime Economics & Logistics**, p. 1–22, 2015.

FIGUEIRA, G.; ALMADA-LOBO, B. Simulation Modelling Practice and Theory Hybrid simulation – optimization methods: A taxonomy and discussion. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 46, p. 118–134, 2014.

Freitas Filho, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**: com aplicações em Arena. 2ª ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

FUNDAÇÃO DOM CABRAL. **Pesquisa Custos Logísticos no Brasil**. 2015.

Gil, A. (2002). **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas.

HALDAR, A. et al. 3PL evaluation and selection using integrated analytical modeling. **Journal of Modelling in Management**, v. 12, n. 2, p. JM2-04-2015-0016, 2017.

HALVORSEN-WEARE, E. E. et al. Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply vessels. **European Journal of Operational Research**, v. 223, n. 2, p. 508–517, 2012.

HALVORSEN-WEARE, E. E.; FAGERHOLT, K. Optimization in offshore supply vessel planning. **Optimization and Engineering**, v. 18, n. 1, p. 317–341, 2017.

HILLIER, F. LIEBERMAN, G. **Introduction to operations research**. Tradução. Boston: McGraw-Hill, 2006.

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

HONG, L. J.; NELSON, B. L. Discrete Optimization via Simulation Using COMPASS. **Operations Research**, v. 54, n. 1, p. 115–129, 2006.

JUAN, A. A. et al. A successive approximations method for the heterogeneous vehicle routing problem: analysing different fleet configurations. **European Journal of Industrial Engineering**, v. 8, n. 6, p. 762, 2014.

KARATAS, M.; CRAPARO, E. M.; SINGHAM, D. I. Selection of a planning horizon for a hybrid microgrid using simulated wind forecasts. **Proceedings - Winter Simulation Conference**. 2015.

KAVAKEB, S. et al. Green vehicle technology to enhance the performance of a European port: A simulation model with a cost-benefit approach. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 60, p. 169–188, 2015.

KHAN, K. S. et al. Five steps to conducting a systematic review. **Journal of the Royal Society of Medicine**, v. 96, n. 3, p. 118–121, 2003.

KHUNTIA, S. R. et al. Time-horizons in the planning and operation of transmission networks: an overview. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 10, n. 4, p. 841–848, 2016.

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

LEI, C.; LIN, W. H.; MIAO, L. A two-stage robust optimization approach for the mobile facility fleet sizing and routing problem under uncertainty. **Computers and Operations Research**, v. 67, p. 75–89, 2016.

LI, Z.; TAO, F. On determining optimal fleet size and vehicle transfer policy for a car rental company. **Computers and Operations Research**, v. 37, n. 2, p. 341–350, 2010.

LIN, Y. K.; YEH, C. T. Optimal carrier selection based on network reliability criterion for stochastic logistics networks. **International Journal of Production Economics**, v. 128, n. 2, p. 510–517, 2010.

LOXTON, R.; LIN, Q.; TEO, K. L. A stochastic fleet composition problem. **Computers and Operations Research**, v. 39, n. 12, p. 3177–3184, 2012.

MARDANEH, E.; LIN, Q.; LOXTON, R. A heuristic algorithm for optimal fleet composition with vehicle routing considerations. **Optimization Methods and Software**, v. 31, n. 2, p. 272–289, 2016.

MATEI, O. et al. An improved immigration memetic algorithm for solving the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. **Neurocomputing**, v. 150, n. Part A, p. 58–66, 2015.

MEIXELL, M. J.; NORBIS, M. A review of the transportation mode choice and carrier selection literature. **The International Journal of Logistics Management**, v. 19, n. 2, p. 183–211, 2008.

MELARÉ, A. V. S. et al. Technologies and decision support systems to aid solid-waste management: a systematic review. **Waste Management**, v. 59, p. 567–584, 2016.

MILENKOVIĆ, M. S. et al. A stochastic model predictive control to heterogeneous rail freight car fleet sizing problem. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 82, p. 162–198, 2015.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e Simulação. In: MIGUEL, P. A. C. (Org.) **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010, p. 165-194.

MORENO, A.; ALEM, D.; FERREIRA, D. Heuristic approaches for the multiperiod location-transportation problem with reuse of vehicles in emergency logistics. **Computers and Operations Research**, v. 69, p. 79–96, 2016.

NOURINEJAD, M.; ROORDA, M. J. A continuous approximation model for the fleet composition problem on the rectangular grid. **OR Spectrum**, v. 39, n. 2, p. 373–401, 2017.

NOURINEJAD, M.; ROORDA, M. J. A dynamic carsharing decision support system. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 66, p. 36–50, 2014.

POWELL, W. B. et al. Locomotive planning at norfolk southern: An optimizing simulator using approximate dynamic programming. **Interfaces**, v. 44, n. 6, p. 567–578, 2014.

RAHIMI-VAHED, A. et al. Fleet-sizing for multi-depot and periodic vehicle routing problems using a modular heuristic algorithm. **Computers and Operations Research**, v. 53, p. 9–23, 2015.

REDMER, A. et al. Heuristic Approach to Fleet Composition Problem. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 54, p. 414–427, 2012.

REDMER, A. Strategic vehicle fleet management - The make or buy problem. **LogForum**. v. 10, n. 2, p. 205–212, 2014.

RODRIGUE, J. P.; COMTOIS, C.; SLACK, B. The geography of transport systems. **The Geography of Transport Systems**, v. 18, n. 2, p. 1–440, 2016.

SCHMIDT, G.; WILHELM, W. E. Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: A review and discussion of modelling issues. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 7, p. 1501–1523, 2000.

SEURING, S.; MÜLLER, M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 15, p. 1699–1710, 2008.

SHA, M.; SRINIVASAN, R. Fleet sizing in chemical supply chains using agent-based simulation. **Computers and Chemical Engineering**, v. 84, p. 180–198, 2016.

SHYSHOU, A.; GRIBKOVSKAIA, I.; BARCELÓ, J. A simulation study of the fleet sizing problem arising in offshore anchor handling operations. **European Journal of Operational Research**, v. 203, n. 1, p. 230–240, 2010.

SOLAKIVI, T.; OJALA, L. Determinants of carrier selection: Updating the survey methodology into the 21st century. **Transportation Research Procedia**, v. 25, p. 511–530, 2017.

STADTLER, H.; KILGER, C. **Supply chain management and advanced planning**. Berlin: Springer, 2005, p. 83-84.

STOJANOVIĆ, D.; NIKOLIČIĆ, S.; MILIČIĆ, M. Transport fleet sizing by using make and buy decision-making. **Economic Annals**, v. 56, n. 190, p. 77–102, 2011.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.

YAGHINI, M.; KHANDAGHABADI, Z. A hybrid metaheuristic algorithm for dynamic rail car fleet sizing problem. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 6, p. 4127–4138, 2013.

Yin, R. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 4<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

ZENG, A. Z.; ROSSETTI, C. Developing a framework for evaluating the logistics costs in global sourcing processes. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 33, n. 9, p. 785–803, 2003.

ZHENG, S.; CHEN, S. Fleet replacement decisions under demand and fuel price uncertainties. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2015.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Parâmetros de entrada dos modelos computacionais

**Tabela 29:** Participação dos transportadores no atendimento dos clientes.

Cliente	Transp. 1	Transp. 2	Transp. 3	Transp. 4	Transp. 5	Transp. 6	Transp. 7	Transp. 8	Transp. 9
Cliente 1	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
Cliente 2	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Cliente 3	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
Cliente 4	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Cliente 5	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Cliente 6	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
Cliente 7	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
Cliente 8	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
Cliente 9	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
Cliente 10	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
Cliente 11	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
Cliente 12	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
Cliente 13	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
Cliente 14	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim	Não	Sim
Cliente 15	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
Cliente 16	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
Cliente 17	Sim	Não							
Cliente 18	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não
Cliente 19	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Cliente 20	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
Cliente 21	Sim	Sim	Não						
Cliente 22	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
Cliente 23	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
Cliente 24	Sim	Não							
Cliente 25	Não	Sim	Não						
Cliente 26	Não	Sim	Não						

<b>Cliente 27</b>	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
<b>Cliente 28</b>	Sim	Não							
<b>Cliente 29</b>	Não	Sim	Não						
<b>Cliente 30</b>	Sim	Não							

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 30:** Quantidade de veículos disponíveis (em unidades).

Transportador	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Veículo 5	Veículo 6
<b>Transportador 1</b>	120	-	111	136	305	136
<b>Transportador 2</b>	7	12	115	133	-	670
<b>Transportador 3</b>	-	-	84	11	-	9
<b>Transportador 4</b>	-	-	160	109	-	55
<b>Transportador 5</b>	-	-	43	45	-	74
<b>Transportador 6</b>	-	-	13	118	75	93
<b>Transportador 7</b>	-	-	86	95	-	12
<b>Transportador 8</b>	-	-	2	3	-	2
<b>Transportador 9</b>	43	-	98	3	129	-

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 31:** Capacidade dos veículos (em unidades volumétricas).

Veículo	Capacidade
<b>Veículo 1</b>	804
<b>Veículo 2</b>	512
<b>Veículo 3</b>	702
<b>Veículo 4</b>	740
<b>Veículo 5</b>	798
<b>Veículo 6</b>	888

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 32:** Tempo de viagem entre embarcador e clientes (em dias).

Cliente	Tempo	Cliente	Tempo	Cliente	Tempo
<b>Cliente 1</b>	1	<b>Cliente 11</b>	3	<b>Cliente 21</b>	2

<b>Cliente 2</b>	2	<b>Cliente 12</b>	4	<b>Cliente 22</b>	7
<b>Cliente 3</b>	1	<b>Cliente 13</b>	1	<b>Cliente 23</b>	3
<b>Cliente 4</b>	2	<b>Cliente 14</b>	2	<b>Cliente 24</b>	7
<b>Cliente 5</b>	2	<b>Cliente 15</b>	2	<b>Cliente 25</b>	2
<b>Cliente 6</b>	1	<b>Cliente 16</b>	5	<b>Cliente 26</b>	3
<b>Cliente 7</b>	1	<b>Cliente 17</b>	6	<b>Cliente 27</b>	5
<b>Cliente 8</b>	1	<b>Cliente 18</b>	2	<b>Cliente 28</b>	2
<b>Cliente 9</b>	5	<b>Cliente 19</b>	2	<b>Cliente 29</b>	2
<b>Cliente 10</b>	7	<b>Cliente 20</b>	5	<b>Cliente 30</b>	6

Fonte: Próprio autor.

**Tabela 33:** Demanda prevista por cliente por período (Períodos 1-12).

	<b>Período 1</b>	<b>Período 2</b>	<b>Período 3</b>	<b>Período 4</b>	<b>Período 5</b>	<b>Período 6</b>	<b>Período 7</b>	<b>Período 8</b>	<b>Período 9</b>	<b>Período 10</b>	<b>Período 11</b>	<b>Período 12</b>
<b>Cliente 1</b>	79,180	128,300	142,552	110,058	132,546	74,451	118,904	120,072	94,800	144,954	101,896	117,964
<b>Cliente 2</b>	51,840	84,174	94,928	79,633	95,605	56,245	89,584	87,732	62,076	95,120	70,371	85,368
<b>Cliente 3</b>	69,264	112,556	125,060	96,093	115,662	63,658	101,474	103,092	83,070	127,136	89,065	102,994
<b>Cliente 4</b>	48,146	78,274	86,924	66,447	79,833	45,228	72,148	72,828	57,666	88,318	61,909	71,016
<b>Cliente 5</b>	48,852	79,244	88,419	69,784	84,072	48,822	77,949	77,564	58,316	89,420	63,660	74,746
<b>Cliente 6</b>	22,932	37,064	42,502	38,809	46,719	28,705	45,744	43,608	27,276	41,796	32,658	41,533
<b>Cliente 7</b>	33,372	54,300	60,096	45,971	55,431	38,874	62,075	59,936	39,914	61,038	42,604	49,247
<b>Cliente 8</b>	27,084	44,126	49,763	42,505	51,192	30,286	48,338	47,172	32,400	49,696	37,029	45,421
<b>Cliente 9</b>	22,290	36,414	40,461	31,324	37,680	22,028	35,116	34,984	26,626	41,014	28,700	33,528
<b>Cliente 10</b>	23,646	38,226	43,927	40,494	48,787	29,870	47,659	45,422	28,118	43,218	33,952	43,410
<b>Cliente 11</b>	12,630	20,664	22,834	17,683	21,347	14,509	23,160	22,414	15,028	23,194	16,134	18,820
<b>Cliente 12</b>	11,916	19,694	21,739	16,552	19,922	13,021	20,928	20,412	14,190	22,092	15,192	17,590
<b>Cliente 13</b>	10,430	17,040	18,850	14,089	16,877	10,588	17,007	16,778	12,500	19,044	13,116	14,932
<b>Cliente 14</b>	6,344	10,494	11,724	10,073	12,084	7,512	11,982	11,594	7,514	11,656	8,643	10,654
<b>Cliente 15</b>	12,180	19,694	22,516	20,700	24,946	15,351	24,714	23,456	14,318	22,092	17,265	21,999
<b>Cliente 16</b>	7,386	11,982	13,508	10,851	13,182	8,258	13,183	12,762	8,676	13,408	9,715	11,464
<b>Cliente 17</b>	7,708	12,312	13,963	11,079	13,278	7,938	12,862	12,696	9,006	13,866	9,943	11,755
<b>Cliente 18</b>	7,708	12,312	14,155	11,950	14,479	7,938	12,862	12,696	9,006	13,866	10,430	12,764

<b>Cliente 19</b>	7,386	11,982	13,508	10,851	12,958	8,258	12,991	12,762	8,676	13,408	9,715	11,432
<b>Cliente 20</b>	1,164	2,132	2,328	1,909	2,395	1,581	2,556	2,200	1,228	2,200	1,387	1,876
<b>Cliente 21</b>	11,530	18,852	20,730	16,002	19,272	11,110	17,785	17,748	13,668	20,994	14,542	17,132
<b>Cliente 22</b>	14,838	24,294	27,052	20,572	24,715	13,866	22,254	22,420	17,752	27,280	19,080	21,868
<b>Cliente 23</b>	8,872	14,252	16,454	14,996	18,078	11,110	18,010	17,170	10,558	16,066	12,376	16,033
<b>Cliente 24</b>	5,244	8,682	9,745	7,610	9,263	6,667	10,624	10,042	6,346	9,588	6,867	8,028
<b>Cliente 25</b>	2,650	4,600	4,983	3,786	4,566	3,172	5,147	4,856	3,104	5,050	3,366	3,948
<b>Cliente 26</b>	5,178	8,352	9,425	7,386	9,039	5,601	9,262	8,872	6,154	9,264	6,538	7,900
<b>Cliente 27</b>	7,452	12,312	14,119	13,087	15,676	9,519	15,451	14,706	8,874	13,734	10,851	13,833
<b>Cliente 28</b>	1,484	2,458	2,879	2,229	2,715	1,680	2,911	2,716	1,552	2,652	1,813	2,200
<b>Cliente 29</b>	7,058	11,464	12,858	10,073	12,084	8,258	13,183	12,634	8,356	12,892	9,129	10,654
<b>Cliente 30</b>	5,572	9,200	10,299	8,292	9,913	6,248	9,942	9,588	6,474	10,234	7,348	8,774

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 34:** Demanda prevista por cliente por período (Períodos 13-24).

	<b>Período 13</b>	<b>Período 14</b>	<b>Período 15</b>	<b>Período 16</b>	<b>Período 17</b>	<b>Período 18</b>	<b>Período 19</b>	<b>Período 20</b>	<b>Período 21</b>	<b>Período 22</b>	<b>Período 23</b>	<b>Período 24</b>
<b>Cliente 1</b>	105,488	89,709	132,025	89,744	135,300	169,349	109,572	136,075	88,511	121,820	146,382	99,594
<b>Cliente 2</b>	76,846	67,616	99,300	61,620	88,706	111,617	79,376	98,330	65,735	91,530	108,728	65,184
<b>Cliente 3</b>	91,626	76,366	112,745	77,882	118,842	148,521	95,478	118,745	76,269	103,675	125,516	87,282
<b>Cliente 4</b>	63,630	54,396	80,190	54,432	82,356	103,223	66,187	81,965	53,616	73,705	88,902	60,588
<b>Cliente 5</b>	67,320	58,735	86,500	56,368	83,326	104,482	69,202	86,180	57,343	79,700	95,348	61,228
<b>Cliente 6</b>	37,842	34,538	50,700	28,572	38,874	49,145	38,357	47,785	33,107	46,655	54,787	28,702
<b>Cliente 7</b>	46,524	46,716	68,850	40,688	56,952	71,176	45,552	56,695	43,021	63,500	74,711	41,860
<b>Cliente 8</b>	41,146	36,252	53,780	32,654	46,200	58,251	42,085	52,485	35,114	49,240	58,572	33,888
<b>Cliente 9</b>	30,196	26,400	38,875	25,396	38,032	47,850	30,841	38,555	25,462	35,635	42,765	27,732
<b>Cliente 10</b>	39,460	35,698	52,970	29,612	40,104	50,964	40,237	50,055	34,244	48,600	57,181	29,480
<b>Cliente 11</b>	17,754	17,301	25,755	15,160	21,574	26,824	17,167	21,540	15,935	23,320	27,794	15,612
<b>Cliente 12</b>	16,262	15,514	23,160	13,800	20,278	25,591	16,097	20,245	14,514	21,220	25,172	14,836
<b>Cliente 13</b>	13,542	12,600	18,790	11,788	17,818	22,090	13,764	17,005	11,758	17,005	20,537	12,828
<b>Cliente 14</b>	9,718	8,907	13,280	7,708	10,688	13,601	9,811	11,980	8,390	11,985	14,448	7,642
<b>Cliente 15</b>	20,146	18,397	27,375	15,292	20,278	25,883	20,314	25,265	17,394	24,940	29,481	15,028

<b>Cliente 16</b>	10,752	9,813	14,415	8,680	12,308	15,579	10,622	13,280	9,259	13,280	15,547	9,064
<b>Cliente 17</b>	10,620	9,490	14,090	8,870	12,628	16,098	10,786	13,440	9,002	12,790	15,324	9,394
<b>Cliente 18</b>	11,400	9,490	14,090	8,870	12,628	16,163	11,596	14,575	9,262	12,790	15,324	9,394
<b>Cliente 19</b>	10,560	9,781	14,255	8,680	12,308	15,579	10,622	13,120	9,195	12,955	15,482	9,064
<b>Cliente 20</b>	1,744	1,681	2,585	1,094	1,748	2,489	1,386	1,940	1,325	2,100	2,622	1,032
<b>Cliente 21</b>	15,224	13,342	19,595	12,758	19,500	24,231	15,649	19,600	12,696	17,980	21,475	14,058
<b>Cliente 22</b>	19,438	16,619	24,620	16,452	25,266	31,686	20,182	25,105	16,194	22,515	27,241	18,526
<b>Cliente 23</b>	14,444	13,375	19,925	11,016	14,898	18,823	14,546	18,300	12,436	18,140	21,508	10,884
<b>Cliente 24</b>	7,706	7,802	11,660	6,280	9,000	11,172	7,186	9,065	7,125	10,530	12,536	6,544
<b>Cliente 25</b>	3,622	3,690	5,670	2,848	4,470	5,702	3,302	4,370	3,007	4,855	5,954	3,168
<b>Cliente 26</b>	7,126	6,799	10,040	5,892	8,488	10,852	6,898	8,905	6,053	9,230	10,785	6,284
<b>Cliente 27</b>	12,502	11,501	17,170	9,328	12,628	16,004	12,666	15,710	10,692	15,550	18,266	9,196
<b>Cliente 28</b>	1,942	1,906	3,075	1,488	2,068	3,041	1,843	2,425	1,487	2,585	3,201	1,486
<b>Cliente 29</b>	9,978	9,813	14,415	8,424	11,856	15,160	9,811	11,980	8,935	13,280	15,483	8,744
<b>Cliente 30</b>	7,968	7,257	10,850	6,350	9,260	11,790	7,968	10,040	6,801	9,715	11,592	6,736

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 35:** Demanda prevista por cliente por período (Períodos 25-36).

	<b>Período 25</b>	<b>Período 26</b>	<b>Período 27</b>	<b>Período 28</b>	<b>Período 29</b>	<b>Período 30</b>	<b>Período 31</b>	<b>Período 32</b>	<b>Período 33</b>	<b>Período 34</b>	<b>Período 35</b>	<b>Período 36</b>
<b>Cliente 1</b>	156,554	134,945	133,028	137,697	83,132	150,202	213,640	134,260	164,554	125,646	141,067	194,400
<b>Cliente 2</b>	102,704	90,880	96,290	99,727	57,282	98,490	140,354	95,575	118,870	92,400	106,429	146,477
<b>Cliente 3</b>	137,372	118,095	116,149	119,911	72,248	131,800	187,722	117,315	143,560	108,924	120,457	166,079
<b>Cliente 4</b>	95,382	81,970	80,024	82,970	50,410	91,492	130,502	81,159	99,074	75,942	85,467	118,060
<b>Cliente 5</b>	96,416	83,750	84,139	87,505	52,416	92,726	131,994	84,528	104,386	80,736	92,564	127,525
<b>Cliente 6</b>	45,032	41,145	46,784	48,792	26,630	43,410	61,688	45,684	57,927	46,006	54,103	74,713
<b>Cliente 7</b>	65,898	56,535	55,399	58,772	37,712	63,502	90,260	55,915	68,811	57,664	73,381	101,599
<b>Cliente 8</b>	53,654	47,625	51,288	53,298	30,066	51,640	73,282	50,637	63,435	49,570	57,277	79,183
<b>Cliente 9</b>	44,188	37,905	37,643	39,234	23,584	42,440	60,520	37,970	46,620	36,220	41,502	57,282
<b>Cliente 10</b>	46,586	42,765	48,920	50,993	27,408	44,644	63,692	47,656	60,486	47,944	56,371	77,982
<b>Cliente 11</b>	24,878	21,380	21,057	22,416	13,932	24,036	34,080	21,248	26,336	21,834	27,243	37,904
<b>Cliente 12</b>	23,776	20,080	19,694	20,701	12,824	22,808	32,592	20,021	24,654	19,954	24,651	34,305

<b>Ciente 13</b>	20,346	17,495	16,681	17,456	10,944	19,762	28,120	17,102	20,828	16,716	19,922	27,760
<b>Ciente 14</b>	12,434	11,010	11,792	12,404	6,992	12,116	17,298	11,919	14,901	11,728	14,121	19,503
<b>Ciente 15</b>	23,776	21,700	24,752	25,914	14,122	22,938	32,592	24,392	30,742	24,488	28,993	40,398
<b>Ciente 16</b>	14,382	12,630	12,890	13,765	8,032	13,800	19,954	12,988	16,194	13,086	15,583	21,446
<b>Ciente 17</b>	14,770	12,955	13,182	13,731	8,290	14,380	20,668	13,184	16,425	12,696	15,125	20,796
<b>Ciente 18</b>	14,770	13,280	14,125	14,739	8,290	14,380	20,668	14,153	17,814	13,344	15,125	20,796
<b>Ciente 19</b>	14,382	12,630	12,890	13,310	8,032	13,800	19,954	12,988	15,999	12,826	15,388	21,251
<b>Ciente 20</b>	2,262	1,775	1,910	2,169	1,162	2,394	3,492	2,134	2,850	2,268	2,880	3,919
<b>Ciente 21</b>	22,478	19,110	19,077	19,793	11,856	21,896	31,100	19,274	23,716	18,204	20,929	28,865
<b>Ciente 22</b>	29,282	25,265	24,620	25,366	15,226	28,182	40,562	25,171	30,614	23,388	26,206	36,156
<b>Ciente 23</b>	17,168	15,545	17,879	18,562	10,104	16,716	23,648	17,492	22,256	17,556	21,124	29,515
<b>Ciente 24</b>	10,238	8,910	8,812	9,459	5,830	9,976	14,314	9,069	11,144	9,584	12,373	17,197
<b>Ciente 25</b>	5,374	4,530	4,238	4,532	2,782	5,178	7,452	4,500	5,700	4,536	5,862	8,389
<b>Ciente 26</b>	9,844	8,580	8,647	9,034	5,442	9,714	13,994	8,743	11,016	8,682	10,690	14,802
<b>Ciente 27</b>	14,704	13,440	15,483	16,031	8,420	14,250	20,278	15,351	19,307	15,156	18,139	25,266
<b>Ciente 28</b>	2,718	2,265	2,391	2,457	1,360	2,718	4,014	2,589	3,298	2,524	3,270	4,790
<b>Ciente 29</b>	13,606	11,820	11,792	12,534	7,840	13,344	18,984	12,114	14,901	12,310	15,583	21,446
<b>Ciente 30</b>	10,816	9,555	9,845	10,169	6,088	10,494	15,288	9,946	12,147	9,780	11,660	16,003

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 36:** Custo por cliente por veículo (Transportador 1).

	<b>Veículo 1</b>	<b>Veículo 2</b>	<b>Veículo 3</b>	<b>Veículo 4</b>	<b>Veículo 5</b>	<b>Veículo 6</b>
<b>Ciente 1</b>	1,066	746	853	906	1,066	1,125
<b>Ciente 2</b>	2,388	1,671	1,910	2,029	2,388	2,519
<b>Ciente 3</b>	1,165	815	932	990	1,165	1,229
<b>Ciente 4</b>	2,652	1,856	2,121	2,254	2,652	2,797
<b>Ciente 5</b>	2,652	1,856	2,121	2,254	2,652	2,797
<b>Ciente 6</b>	1,067	747	854	907	1,067	1,126
<b>Ciente 7</b>	1,067	747	854	907	1,067	1,126
<b>Ciente 8</b>	1,014	709	811	861	1,014	1,069
<b>Ciente 9</b>	5,327	3,728	4,261	4,528	5,327	5,620

<b>Cliente 10</b>	6,973	4,881	5,579	5,927	6,973	7,357
<b>Cliente 11</b>	2,853	1,997	2,282	2,425	2,853	3,010
<b>Cliente 12</b>	2,853	1,997	2,282	2,425	2,853	3,010
<b>Cliente 13</b>	1,165	815	932	990	1,165	1,229
<b>Cliente 14</b>	2,388	1,671	1,910	2,029	2,388	2,519
<b>Cliente 15</b>	1,621	1,134	1,296	1,378	1,621	1,710
<b>Cliente 16</b>	5,353	3,747	4,282	4,550	5,353	5,647
<b>Cliente 17</b>	6,587	4,611	5,269	5,599	6,587	6,949
<b>Cliente 18</b>	2,637	1,846	2,110	2,242	2,637	2,782
<b>Cliente 19</b>	2,388	1,671	1,910	2,029	2,388	2,519
<b>Cliente 20</b>	5,353	3,747	4,282	4,550	5,353	5,647
<b>Cliente 21</b>	1,163	814	931	989	1,163	1,227
<b>Cliente 22</b>	6,587	4,611	5,269	5,599	6,587	6,949
<b>Cliente 23</b>	2,891	2,023	2,312	2,457	2,891	3,050
<b>Cliente 24</b>	6,973	4,881	5,579	5,927	6,973	7,357
<b>Cliente 25</b>	2,137	1,496	1,709	1,816	2,137	2,254
<b>Cliente 26</b>	3,308	2,315	2,646	2,812	3,308	3,490
<b>Cliente 27</b>	5,327	3,728	4,261	4,528	5,327	5,620
<b>Cliente 28</b>	2,262	1,583	1,810	1,923	2,262	2,387
<b>Cliente 29</b>	1,163	814	931	989	1,163	1,227
<b>Cliente 30</b>	7,485	5,240	5,988	6,362	7,485	7,897

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 37:** Custo por cliente por veículo (Transportador 2).

	<b>Veículo 1</b>	<b>Veículo 2</b>	<b>Veículo 3</b>	<b>Veículo 4</b>	<b>Veículo 5</b>	<b>Veículo 6</b>
<b>Cliente 1</b>	1,064	638	851	905	1,064	1,123
<b>Cliente 2</b>	2,451	1,470	1,961	2,083	2,451	2,586
<b>Cliente 3</b>	1,187	712	949	1,008	1,187	1,252
<b>Cliente 4</b>	2,579	1,547	2,063	2,192	2,579	2,721
<b>Cliente 5</b>	2,591	1,555	2,073	2,202	2,591	2,734
<b>Cliente 6</b>	1,011	606	809	859	1,011	1,066

<b>Cliente 7</b>	1,011	606	809	859	1,011	1,066
<b>Cliente 8</b>	1,137	682	910	967	1,137	1,200
<b>Cliente 9</b>	8,627	5,176	6,901	7,333	8,627	9,101
<b>Cliente 10</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 11</b>	3,651	2,191	2,921	3,103	3,651	3,852
<b>Cliente 12</b>	3,651	2,191	2,921	3,103	3,651	3,852
<b>Cliente 13</b>	1,183	709	946	1,005	1,183	1,248
<b>Cliente 14</b>	2,451	1,470	1,961	2,083	2,451	2,586
<b>Cliente 15</b>	2,522	1,513	2,017	2,143	2,522	2,661
<b>Cliente 16</b>	8,216	4,929	6,573	6,983	8,216	8,668
<b>Cliente 17</b>	10,160	6,096	8,128	8,636	10,160	10,719
<b>Cliente 18</b>	3,187	1,912	2,549	2,709	3,187	3,362
<b>Cliente 19</b>	2,451	1,470	1,961	2,083	2,451	2,586
<b>Cliente 20</b>	8,216	4,929	6,573	6,983	8,216	8,668
<b>Cliente 21</b>	1,228	737	982	1,044	1,228	1,296
<b>Cliente 22</b>	10,668	6,401	8,534	9,068	10,668	11,255
<b>Cliente 23</b>	3,982	2,389	3,186	3,385	3,982	4,201
<b>Cliente 24</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 25</b>	2,244	1,346	1,795	1,907	2,244	2,367
<b>Cliente 26</b>	3,705	2,223	2,964	3,149	3,705	3,909
<b>Cliente 27</b>	8,627	5,176	6,901	7,333	8,627	9,101
<b>Cliente 28</b>	2,412	1,447	1,929	2,050	2,412	2,545
<b>Cliente 29</b>	1,170	702	936	994	1,170	1,234
<b>Cliente 30</b>	-	-	-	-	-	-

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 38:** Custo por cliente por veículo (Transportador 3).

	<b>Veículo 1</b>	<b>Veículo 2</b>	<b>Veículo 3</b>	<b>Veículo 4</b>	<b>Veículo 5</b>	<b>Veículo 6</b>
<b>Cliente 1</b>	867	520	694	737	867	915
<b>Cliente 2</b>	2,666	1,600	2,133	2,266	2,666	2,813
<b>Cliente 3</b>	1,011	606	809	859	1,011	1,066

<b>Cliente 4</b>	2,666	1,600	2,133	2,266	2,666	2,813
<b>Cliente 5</b>	2,733	1,640	2,186	2,323	2,733	2,883
<b>Cliente 6</b>	867	520	694	737	867	915
<b>Cliente 7</b>	866	519	693	736	866	914
<b>Cliente 8</b>	1,187	712	949	1,009	1,187	1,252
<b>Cliente 9</b>	5,471	3,283	4,377	4,650	5,471	5,772
<b>Cliente 10</b>	7,237	4,342	5,790	6,152	7,237	7,636
<b>Cliente 11</b>	3,047	1,828	2,438	2,590	3,047	3,215
<b>Cliente 12</b>	3,047	1,828	2,438	2,590	3,047	3,215
<b>Cliente 13</b>	945	567	756	803	945	997
<b>Cliente 14</b>	2,493	1,496	1,995	2,119	2,493	2,630
<b>Cliente 15</b>	2,089	1,253	1,671	1,775	2,089	2,204
<b>Cliente 16</b>	5,472	3,283	4,377	4,651	5,472	5,772
<b>Cliente 17</b>	6,592	3,955	5,273	5,603	6,592	6,954
<b>Cliente 18</b>	2,973	1,783	2,378	2,527	2,973	3,136
<b>Cliente 19</b>	2,666	1,600	2,133	2,266	2,666	2,813
<b>Cliente 20</b>	5,472	3,283	4,377	4,651	5,472	5,772
<b>Cliente 21</b>	1,401	840	1,121	1,191	1,401	1,478
<b>Cliente 22</b>	7,133	4,280	5,706	6,063	7,133	7,525
<b>Cliente 23</b>	3,124	1,874	2,499	2,655	3,124	3,296
<b>Cliente 24</b>	7,237	4,342	5,790	6,152	7,237	7,636
<b>Cliente 25</b>	1,667	1,000	1,334	1,417	1,667	1,759
<b>Cliente 26</b>	3,965	2,379	3,172	3,370	3,965	4,183
<b>Cliente 27</b>	5,471	3,283	4,377	4,650	5,471	5,772
<b>Cliente 28</b>	2,426	1,455	1,940	2,062	2,426	2,559
<b>Cliente 29</b>	1,401	840	1,121	1,191	1,401	1,478
<b>Cliente 30</b>	7,998	4,799	6,398	6,798	7,998	8,438

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 39:** Custo por cliente por veículo (Transportador 4).

<b>Veículo 1</b>	<b>Veículo 2</b>	<b>Veículo 3</b>	<b>Veículo 4</b>	<b>Veículo 5</b>	<b>Veículo 6</b>
------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

<b>Cliente 1</b>	1,186	712	949	1,008	1,186	1,251
<b>Cliente 2</b>	1,966	1,180	1,573	1,671	1,966	2,074
<b>Cliente 3</b>	1,186	712	949	1,008	1,186	1,251
<b>Cliente 4</b>	2,600	1,560	2,080	2,210	2,600	2,743
<b>Cliente 5</b>	2,600	1,560	2,080	2,210	2,600	2,743
<b>Cliente 6</b>	866	520	693	736	866	914
<b>Cliente 7</b>	966	580	773	821	966	1,019
<b>Cliente 8</b>	795	477	636	676	795	839
<b>Cliente 9</b>	5,044	3,026	4,035	4,287	5,044	5,321
<b>Cliente 10</b>	6,866	4,120	5,493	5,836	6,866	7,244
<b>Cliente 11</b>	3,038	1,822	2,430	2,582	3,038	3,205
<b>Cliente 12</b>	2,787	1,672	2,229	2,369	2,787	2,940
<b>Cliente 13</b>	1,200	720	960	1,020	1,200	1,266
<b>Cliente 14</b>	1,966	1,180	1,573	1,671	1,966	2,074
<b>Cliente 15</b>	1,733	1,040	1,386	1,473	1,733	1,828
<b>Cliente 16</b>	4,700	2,820	3,760	3,995	4,700	4,958
<b>Cliente 17</b>	6,433	4,889	6,111	5,468	6,433	6,787
<b>Cliente 18</b>	2,733	1,640	2,186	2,323	2,733	2,883
<b>Cliente 19</b>	1,966	1,180	1,573	1,671	1,966	2,074
<b>Cliente 20</b>	4,700	2,820	3,760	3,995	4,700	4,958
<b>Cliente 21</b>	1,300	780	1,040	1,105	1,300	1,371
<b>Cliente 22</b>	6,660	3,996	5,328	5,661	6,660	7,027
<b>Cliente 23</b>	2,548	1,528	2,038	2,165	2,548	2,688
<b>Cliente 24</b>	6,866	4,120	5,493	5,836	6,866	7,244
<b>Cliente 25</b>	2,137	1,282	1,709	1,816	2,137	2,254
<b>Cliente 26</b>	2,866	1,720	2,293	2,436	2,866	3,024
<b>Cliente 27</b>	5,200	3,120	4,160	4,420	5,200	5,486
<b>Cliente 28</b>	1,564	938	1,251	1,329	1,564	1,650
<b>Cliente 29</b>	1,209	725	967	1,027	1,209	1,275
<b>Cliente 30</b>	7,520	4,512	6,016	6,392	7,520	7,933

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 40:** Custo por cliente por veículo (Transportador 5).

	<b>Veículo 1</b>	<b>Veículo 2</b>	<b>Veículo 3</b>	<b>Veículo 4</b>	<b>Veículo 5</b>	<b>Veículo 6</b>
<b>Cliente 1</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 2</b>	2,600	1,560	2,080	2,210	2,600	2,743
<b>Cliente 3</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 4</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 5</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 6</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 7</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 8</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 9</b>	5,507	3,304	4,406	4,681	5,507	5,810
<b>Cliente 10</b>	7,857	4,714	6,285	6,678	7,857	8,289
<b>Cliente 11</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 12</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 13</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 14</b>	2,633	1,580	2,106	2,238	2,633	2,778
<b>Cliente 15</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 16</b>	5,543	3,325	4,434	4,711	5,543	5,848
<b>Cliente 17</b>	7,476	4,486	5,981	6,355	7,476	7,888
<b>Cliente 18</b>	2,590	1,554	2,072	2,202	2,590	2,733
<b>Cliente 19</b>	2,600	1,560	2,080	2,210	2,600	2,743
<b>Cliente 20</b>	5,543	3,325	4,434	4,711	5,543	5,848
<b>Cliente 21</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 22</b>	7,398	4,438	5,918	6,288	7,398	7,805
<b>Cliente 23</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 24</b>	7,857	4,714	6,285	6,678	7,857	8,289
<b>Cliente 25</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 26</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 27</b>	5,507	3,304	4,406	4,681	5,507	5,810
<b>Cliente 28</b>	2,018	1,211	1,615	1,716	2,018	2,130

<b>Cliente 29</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 30</b>	8,642	5,185	6,913	7,345	8,642	9,117

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 41:** Custo por cliente por veículo (Transportador 6).

	<b>Veículo 1</b>	<b>Veículo 2</b>	<b>Veículo 3</b>	<b>Veículo 4</b>	<b>Veículo 5</b>	<b>Veículo 6</b>
<b>Cliente 1</b>	969	581	775	756	969	1,022
<b>Cliente 2</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 3</b>	1,114	668	891	869	1,114	1,175
<b>Cliente 4</b>	3,549	2,129	2,839	2,768	3,549	3,744
<b>Cliente 5</b>	3,549	2,129	2,839	2,768	3,549	3,744
<b>Cliente 6</b>	649	389	519	551	649	684
<b>Cliente 7</b>	647	388	518	550	647	683
<b>Cliente 8</b>	913	548	730	776	913	963
<b>Cliente 9</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 10</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 11</b>	2,850	1,710	2,280	2,422	2,850	3,007
<b>Cliente 12</b>	2,850	1,710	2,280	2,422	2,850	3,007
<b>Cliente 13</b>	940	564	752	733	940	992
<b>Cliente 14</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 15</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 16</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 17</b>	647	388	518	550	647	683
<b>Cliente 18</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 19</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 20</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 21</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 22</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 23</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 24</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 25</b>	-	-	-	-	-	-

<b>Cliente 26</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 27</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 28</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 29</b>	1,468	881	1,174	1,248	1,468	1,549
<b>Cliente 30</b>	-	-	-	-	-	-

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 42:** Custo por cliente por veículo (Transportador 7).

	<b>Veículo 1</b>	<b>Veículo 2</b>	<b>Veículo 3</b>	<b>Veículo 4</b>	<b>Veículo 5</b>	<b>Veículo 6</b>
<b>Cliente 1</b>	1,451	870	1,161	1,233	1,451	1,531
<b>Cliente 2</b>	2,304	1,382	1,843	1,958	2,304	2,431
<b>Cliente 3</b>	1,759	1,055	1,407	1,495	1,759	1,855
<b>Cliente 4</b>	3,254	1,952	2,603	2,766	3,254	3,433
<b>Cliente 5</b>	3,254	1,952	2,603	2,766	3,254	3,433
<b>Cliente 6</b>	1,201	720	960	1,020	1,201	1,267
<b>Cliente 7</b>	1,201	720	960	1,020	1,201	1,267
<b>Cliente 8</b>	1,261	756	1,008	1,071	1,261	1,330
<b>Cliente 9</b>	6,157	3,694	4,925	5,233	6,157	6,495
<b>Cliente 10</b>	7,155	4,293	5,724	6,082	7,155	7,549
<b>Cliente 11</b>	3,641	2,184	2,913	3,095	3,641	3,841
<b>Cliente 12</b>	4,011	2,406	3,209	3,409	4,011	4,232
<b>Cliente 13</b>	1,671	1,002	1,336	1,420	1,671	1,763
<b>Cliente 14</b>	2,304	1,382	1,843	1,958	2,304	2,431
<b>Cliente 15</b>	2,110	1,266	1,688	1,793	2,110	2,226
<b>Cliente 16</b>	5,187	3,112	4,150	4,409	5,187	5,473
<b>Cliente 17</b>	6,786	4,071	5,429	5,768	6,786	7,159
<b>Cliente 18</b>	3,254	1,952	2,603	2,766	3,254	3,433
<b>Cliente 19</b>	2,304	1,382	1,843	1,958	2,304	2,431
<b>Cliente 20</b>	5,187	3,112	4,150	4,409	5,187	5,473
<b>Cliente 21</b>	1,797	1,078	1,437	1,527	1,797	1,896

<b>Cliente 22</b>	7,652	4,591	6,121	6,504	7,652	8,073
<b>Cliente 23</b>	3,403	2,042	2,722	2,892	3,403	3,590
<b>Cliente 24</b>	7,480	4,488	5,984	6,358	7,480	7,892
<b>Cliente 25</b>	2,137	1,282	1,709	1,816	2,137	2,254
<b>Cliente 26</b>	3,683	2,210	2,946	3,130	3,683	3,886
<b>Cliente 27</b>	6,157	3,694	4,925	5,233	6,157	6,495
<b>Cliente 28</b>	2,878	2,187	2,734	2,446	2,878	3,036
<b>Cliente 29</b>	1,797	1,078	1,437	1,527	1,797	1,896
<b>Cliente 30</b>	8,166	4,899	6,533	6,941	8,166	8,615

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 43:** Custo por cliente por veículo (Transportador 8).

	<b>Veículo 1</b>	<b>Veículo 2</b>	<b>Veículo 3</b>	<b>Veículo 4</b>	<b>Veículo 5</b>	<b>Veículo 6</b>
<b>Cliente 1</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 2</b>	1,666	1,000	1,333	1,416	1,666	1,758
<b>Cliente 3</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 4</b>	1,756	1,053	1,405	1,493	1,756	1,853
<b>Cliente 5</b>	1,756	1,053	1,405	1,493	1,756	1,853
<b>Cliente 6</b>	676	405	541	575	676	713
<b>Cliente 7</b>	690	414	552	586	690	727
<b>Cliente 8</b>	843	506	674	716	843	889
<b>Cliente 9</b>	4,526	2,716	3,621	3,847	4,526	4,775
<b>Cliente 10</b>	6,206	3,723	4,965	5,275	6,206	6,547
<b>Cliente 11</b>	2,996	1,798	2,397	2,547	2,996	3,161
<b>Cliente 12</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 13</b>	726	436	581	617	726	766
<b>Cliente 14</b>	1,666	1,000	1,333	1,416	1,666	1,758
<b>Cliente 15</b>	1,387	832	1,109	1,179	1,387	1,463
<b>Cliente 16</b>	2,153	1,292	1,722	1,830	2,153	2,271
<b>Cliente 17</b>	690	414	552	586	690	727
<b>Cliente 18</b>	2,066	1,240	1,653	1,756	2,066	2,180

<b>Cliente 19</b>	2,348	1,409	1,879	1,996	2,348	2,477
<b>Cliente 20</b>	4,434	2,660	3,547	3,769	4,434	4,678
<b>Cliente 21</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 22</b>	6,163	3,698	4,930	5,238	6,163	6,502
<b>Cliente 23</b>	2,913	1,748	2,330	2,476	2,913	3,073
<b>Cliente 24</b>	6,206	3,723	4,965	5,275	6,206	6,547
<b>Cliente 25</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 26</b>	2,066	1,240	1,653	1,756	2,066	2,180
<b>Cliente 27</b>	4,526	2,716	3,621	3,847	4,526	4,775
<b>Cliente 28</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 29</b>	1,540	924	1,232	1,309	1,540	1,624
<b>Cliente 30</b>	6,915	4,149	5,532	5,877	6,915	7,295

**Fonte:** Próprio autor.

**Tabela 44:** Custo por cliente por veículo (Transportador 9).

	<b>Veículo 1</b>	<b>Veículo 2</b>	<b>Veículo 3</b>	<b>Veículo 4</b>	<b>Veículo 5</b>	<b>Veículo 6</b>
<b>Cliente 1</b>	1,565	939	1,252	1,330	1,565	1,651
<b>Cliente 2</b>	2,314	1,388	1,851	1,967	2,314	2,441
<b>Cliente 3</b>	1,698	1,019	1,358	1,443	1,698	1,792
<b>Cliente 4</b>	2,314	1,388	1,851	1,967	2,314	2,441
<b>Cliente 5</b>	2,314	1,388	1,851	1,967	2,314	2,441
<b>Cliente 6</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 7</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 8</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 9</b>	6,481	3,888	5,185	5,509	6,481	6,837
<b>Cliente 10</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 11</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 12</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 13</b>	1,698	1,019	1,358	1,443	1,698	1,792
<b>Cliente 14</b>	2,314	1,388	1,851	1,967	2,314	2,441
<b>Cliente 15</b>	-	-	-	-	-	-

<b>Cliente 16</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 17</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 18</b>	3,703	2,222	2,962	3,147	3,703	3,907
<b>Cliente 19</b>	2,314	1,388	1,851	1,967	2,314	2,441
<b>Cliente 20</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 21</b>	1,900	1,140	1,520	1,615	1,900	2,004
<b>Cliente 22</b>	9,258	5,555	7,406	7,869	9,258	9,767
<b>Cliente 23</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 24</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 25</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 26</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 27</b>	6,481	3,888	5,185	5,509	6,481	6,837
<b>Cliente 28</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 29</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cliente 30</b>	-	-	-	-	-	-

---

**Fonte:** Próprio autor.