

RODRIGO REDENSCHI

Resolução de um problema de seleção de fornecedores em uma empresa brasileira do setor de transportes

São Paulo

2017

RODRIGO REDENSCHI

**RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE SELEÇÃO DE FORNECEDORES EM UMA
EMPRESA BRASILEIRA DO SETOR DE TRANSPORTES**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Diploma de
Engenheiro de Produção.

São Paulo

2017

RODRIGO REDENSCHI

**RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE SELEÇÃO DE FORNECEDORES EM UMA
EMPRESA BRASILEIRA DO SETOR DE TRANSPORTES**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Diploma de
Engenheiro de Produção.

Orientadora:
Prof^a Dr^a Débora Pretti Ronconi

São Paulo

2017

Catalogação-na-publicação

Redenschi, Rodrigo

Resolução de um problema de seleção de fornecedores em uma empresa brasileira do setor de transportes / R. Redenschi -- São Paulo, 2017.

115 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Pesquisa Operacional 2.Programação Linear Inteira Mista 3.Seleção de Fornecedores 4.Logística I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

À minha família e a todos aqueles que contribuíram para esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ilda e Ricardo e à minha irmã Vivian, que sempre me apoiaram e que me proporcionaram as melhores condições para que eu chegassem onde estou. Sem eles, nada disso seria possível.

Aos meus avós, tios e primos, que me ensinaram, pelo exemplo, o valor da educação e a importância da família. À Paty, por me tornar uma pessoa melhor a cada dia e por todo o carinho.

À professora Doutora Débora Pretti Ronconi, pela paciência e pelos valiosos conselhos e ensinamentos durante todo o processo de orientação deste trabalho.

A todos os professores que tive em minha vida, aos do Colégio Liessin, aos do Colégio Bandeirantes e aos da Escola Politécnica, que auxiliaram em minha formação pessoal, acadêmica e profissional.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado e com quem compartilhei minhas conquistas e meus desafios.

“How wonderful it is that nobody need wait a single moment before starting to improve the world.”

(Anne Frank)

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo otimizar o processo de alocação de rotas de transportes de uma empresa brasileira do setor de transportes, a partir da necessidade de se definir periodicamente a transportadora terceirizada para a realização de cada rota de transporte. As rotas de transporte são caracterizadas por: *(i)* uma origem; *(ii)* um destino; *(iii)* uma distância; *(iv)* um produto; e *(v)* uma quantidade (em m³), específicos. Cada transportadora, por sua vez, possui capacidade e preço distintos das demais, o que torna a seleção da melhor empresa para realização de cada rota mais complexa. A fim de definir a melhor indicação de transportadora terceirizada para a demanda da empresa, foi desenvolvido um modelo matemático de programação linear inteira mista com função objetivo de minimização de custo de transporte e restrições de capacidade das transportadoras; atendimento à demanda; e números mínimo e máximo de transportadoras selecionadas. O modelo foi implementado no *software* CPLEX. Os resultados do modelo foram positivos e mostraram um potencial de redução de custos para a empresa, bem como diminuição do tempo da atividade de seleção de fornecedores. A utilização efetiva desse modelo pode contribuir para que a empresa tome decisões baseada em mais informações a partir da simulação de diferentes cenários e, com isso, otimize o uso de seus recursos.

Palavras-chave: Pesquisa operacional. Programação linear inteira mista. Seleção de fornecedores. Logística.

ABSTRACT

This work was developed with a Brazilian company of the logistics industry, which had the goal of optimizing its process of allocating transportation routes to its suppliers. The company needs to periodically select a third party supplier that would be responsible to perform each transportation route, which is defined by an specific origin, a specific destination, a specific distance, a specific product and a specific quantity (m^3). Each supplier has a distinct transportation capacity and a distinct cost, which leads to a complexity in selecting the best partner to each route. In order to solve this problem, a mathematical model of mixed integer linear programming was developed. The objective function aims to minimize the transportation costs and considers the constraints of the supplier's capacity, meeting of the demand and a number of minimum and maximum of selected suppliers. The model was solved using the CPLEX *software*. The results obtained were positive and showed a potential of cost reduction and of reducing the time needed to complete the process of supplier selection. With effective use of this model, the company can make well-based decisions and optimize the use of its resources.

Key words: Operations research. Mixed integer linear programming. Supplier selection. Logistics.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Distribuição geográfica de atuação da LogísticaSA | 17 |
| Figura 2 - Mapa de calor de regiões por representatividade no faturamento da LogísticaSA . | 18 |
| Figura 3 - Evolução da receita média dos transportadores brasileiros | 19 |
| Figura 4 - Esquema dos três macroprocessos da LogísticaSA | 19 |
| Figura 5 - Matriz de transportes brasileira e preços comparados com os EUA (2001)..... | 20 |
| Figura 6 - Fluxo processual da área de planejamento da LogísticaSA..... | 21 |
| Figura 7 - Macro ambiente de influências sobre a oferta de transporte | 24 |
| Figura 8 – Processo-alvo do problema | 25 |
| Figura 9 - Exemplos de rotas..... | 25 |
| Figura 10 - Cronograma de atividades | 26 |
| Figura 11 - Esquema de seleção de transportadoras..... | 28 |
| Figura 12 - Simplificação do Problema..... | 28 |
| Figura 13 - Níveis de abstração no desenvolvimento de modelos | 32 |
| Figura 14 - Processo de modelagem..... | 34 |
| Figura 15 - Rede de transporte | 36 |
| Figura 16 – Exemplo do problema de transbordo | 37 |
| Figura 17 - Processo dinâmico de seleção de fornecedores | 41 |
| Figura 18 - Forças competitivas do mercado..... | 54 |
| Figura 19 - Ilustração de $Max_Transp_O_i$ | 56 |
| Figura 20 - Ilustração dos resultados (Teste 1) | 59 |
| Figura 21 - Ilustração dos parâmetros obtidos | 66 |
| Figura 22 - Gráfico de volume transportado e capacidade por transportadora | 76 |
| Figura 23 - Número de rotas alocadas por transportadora..... | 77 |
| Figura 24 - Análise de Sensibilidade de custo por MTO e MTD | 83 |
| Figura 25 - Volume alocado por transportadora em dois cenários | 84 |
| Figura 26 - Custo de transporte nos dois cenários..... | 85 |
| Figura 27 - Custo de transporte com alteração de demanda..... | 86 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Atividades mais comumente terceirizadas nas empresas brasileiras (em 1993) | 22 |
| Tabela 2 - Vantagens e riscos da terceirização | 23 |
| Tabela 3 - Demanda de rotas | 25 |
| Tabela 4 - Exemplo de seleção de transportadoras..... | 27 |
| Tabela 5 - Critérios de seleção de fornecedores | 39 |
| Tabela 6 - Categorias de custos em transporte rodoviário..... | 50 |
| Tabela 7 - Exemplo de aplicação do conjunto de restrições (4)..... | 51 |
| Tabela 8 - Exemplo de <i>Min_transp</i> | 53 |
| Tabela 9 - Tabela de capacidades (Teste 1)..... | 58 |
| Tabela 10 - Tabela de demanda (Teste 1)..... | 58 |
| Tabela 11 - Tabela de custos (Teste 1)..... | 58 |
| Tabela 12 - Resultados (Teste 1) | 59 |
| Tabela 13 - Resultado do teste simplificado (variável T)..... | 60 |
| Tabela 14 - Resultado do teste simplificado (variável TRO) | 61 |
| Tabela 15 - Resultado do teste simplificado (variável TRD) | 61 |
| Tabela 16 - Resultado do teste simplificado por origem e transportadora | 62 |
| Tabela 17 - Resultado do teste simplificado por destino e transportadora | 62 |
| Tabela 18 - Relação entre <i>Max_Transp</i> e a função objetivo | 63 |
| Tabela 19 - Exemplo de dados de custo | 67 |
| Tabela 20 - Exemplo de dados de capacidade | 67 |
| Tabela 21 - Exemplo da planilha de demanda..... | 68 |
| Tabela 22 - Exemplo de dados de demanda transformados | 69 |
| Tabela 23 - Índices do modelo | 71 |
| Tabela 24 - Dimensão do modelo..... | 72 |
| Tabela 25 - Restrições do modelo | 72 |
| Tabela 26 - Volume transportado por transportadora..... | 73 |
| Tabela 27 - Capacidade utilizada por transportadora | 74 |
| Tabela 28 - Cumprimento de Demanda..... | 78 |
| Tabela 29 - Capacidade e utilização por transportadora..... | 79 |
| Tabela 30 - Alocação de transportadoras e origens | 81 |
| Tabela 31 - Alocação de transportadoras e destinos..... | 82 |
| Tabela 32 - Parâmetro de custo do teste simplificado | 93 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 33 - Parâmetro de demanda do teste simplificado | 104 |
| Tabela 34 - Parâmetro de capacidade do teste simplificado..... | 107 |
| Tabela 35 - Parâmetro Y do teste simplificado | 107 |
| Tabela 36 - Resultado de volume do teste simplificado..... | 109 |

LISTA DE ABREVIASÕES

| | |
|--------------|---|
| AHP | <i>Analytic Hierarquic Process</i> (Análise Multicritério) |
| ANTT | Agência Nacional de Transportes Terrestres |
| BNDES | Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social |
| CNT | Confederação Nacional de Transportes |
| FIESP | Federação das Indústrias do Estado de São Paulo |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| PL | Programação Linear |
| PLIM | Programação Linear Inteira Mista |
| PO | Pesquisa Operacional |
| RNTRC | Registro Nacional do Transporte Rodoviário de Cargas |
| SSP | <i>Supplier Selection Problem</i> (Problema de Seleção de Fornecedores) |
| TCO | <i>Total Cost of Ownership</i> |
| TRC | Transporte Rodoviário de Cargas |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 | DESCRIÇÃO DA EMPRESA E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA | 17 |
| 2.1 | A Empresa e o Setor | 17 |
| 2.2 | Definição do Problema | 25 |
| 2.3 | Objetivo do Trabalho | 29 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 31 |
| 3.1 | O problema..... | 31 |
| 3.2 | Pesquisa Operacional | 31 |
| 3.3 | Problemas de Transporte, Transbordo e Alocação | 35 |
| 3.4 | Problema de Seleção de Fornecedores..... | 39 |
| 4 | MODELO PROPOSTO | 45 |
| 4.1 | Modelo | 45 |
| 4.2 | Descrição do Modelo | 49 |
| 4.3 | Exemplos Simplificados | 57 |
| 5 | LEVANTAMENTO DE DADOS | 65 |
| 5.1 | Dados das Transportadoras..... | 66 |
| 5.2 | Dados do Mercado | 68 |
| 5.3 | Dados Operacionais..... | 69 |
| 6 | OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 71 |
| 6.1 | Resultados Computacionais..... | 71 |
| 6.2 | Comparação com a Situação Atual | 77 |
| 6.3 | Análise de Restrições | 78 |
| 6.4 | Análises de Sensibilidade | 83 |
| 7 | CONCLUSÃO..... | 87 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 89 |
| | APÊNDICE A – PARÂMETROS E RESULTADOS DO TESTE SIMPLIFICADO | 93 |
| | APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO NO CPLEX | 113 |

1 INTRODUÇÃO

Pode-se afirmar que a partir de 2009 o Brasil vem passando por uma revitalização do setor de transporte rodoviário de cargas (TRC). Tanto a demanda quanto a oferta do serviço aumentaram consideravelmente, possibilitando o desenvolvimento do setor no país. Por este motivo, as empresas têm dado cada vez mais atenção para a eficiência operacional, em um ambiente com foco no corte de despesas e otimização de recursos para se manterem competitivas. (ARAUJO, 2014)

E foi justamente nesse contexto que foi fundada a LogísticaSA¹, empresa operadora logística brasileira, objeto de análise deste trabalho.

Verificou-se que a LogísticaSA incorria em custos altos na contratação de empresas terceirizadas de transporte, sendo que tal processo era realizado manualmente pela área interna de planejamento da empresa.

Diante de tal questão desenvolveu-se o presente estudo, visando a criar uma solução para minimizar o custo dispendido pela empresa LogísticaSA no processo interno de alocação de rotas às suas transportadoras, por meio de um modelo de programação linear inteira mista (PLIM).

O principal resultado da resolução do modelo matemático construído é a definição de qual transportadora terceirizada deve ser alocada para cada ponto de demanda da LogísticaSA. Este ponto de demanda é representado por uma origem, um destino e um produto dentre o portfólio da empresa.

O presente trabalho está estruturado em oito capítulos sequenciais, que trazem as maiores especificações do caso, desde a apresentação da empresa e o contexto dos estudos realizados, o problema enfrentado, e a solução desenvolvida.

O capítulo dois apresenta a empresa objeto deste trabalho, com enfoque nas áreas internas mais relevantes para o estudo realizado, bem como discute o problema que se busca resolver.

Já o terceiro capítulo indica a revisão bibliográfica do problema, explorando alguns conceitos teóricos sobre Programação Linear, como os problemas de transportes, transbordo e de

¹ LogísticaSA é um nome fictício dado a uma empresa real que preferiu não se identificar

designação ou alocação, que foram utilizados como base para o desenvolvimento do modelo matemático proposto. Também são explorados artigos e livros que tratam sobre problemas matemáticos de seleção de fornecedores.

O capítulo quatro apresenta a proposta de resolução do problema por meio do modelo matemático de programação linear inteira mista. São definidas as restrições, os parâmetros de entrada, as variáveis e a função objetivo. Neste capítulo também é apresentado um exemplo simplificado do problema para validação do modelo.

O quinto capítulo trata da obtenção dos dados utilizados para a execução do modelo, de acordo com os parâmetros necessários definidos no capítulo anterior.

O capítulo seis apresenta os resultados finais do modelo desenvolvido, avaliando sua performance e impacto para a empresa. O capítulo também aferirá as restrições do modelo, trazendo uma análise de sensibilidade a partir da variação dos parâmetros de entrada e impacto no resultado final.

Por fim, apresentam-se as conclusões do estudo no sétimo capítulo, seguidas das referências bibliográficas e dos apêndices.

2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Nesse capítulo apresenta-se a empresa de desenvolvimento do trabalho, com enfoque nas áreas internas mais relevantes, bem como o problema que se busca resolver.

2.1 A Empresa e o Setor

A LogísticaSA é uma empresa operadora logística brasileira, fundada no início dos anos 2000 e com sede na cidade de São Paulo. A empresa conta com mais de vinte mil funcionários em sua folha de pagamento, e seu faturamento anual possui ordem de grandeza entre um e vinte bilhões de reais.

De acordo com a classificação do BNDES (2017), que leva em consideração a receita bruta das empresas brasileiras, a LogísticaSA é considerada e classificada como uma empresa de grande porte.

Além disso, a empresa possui uma carteira de mais de mil clientes em todas as regiões do país, conforme se verifica pela Figura 1. A região com maior representatividade de negócios é a Sudeste, enquanto que a de menor relevância é a Região Norte (ver Figura 2).

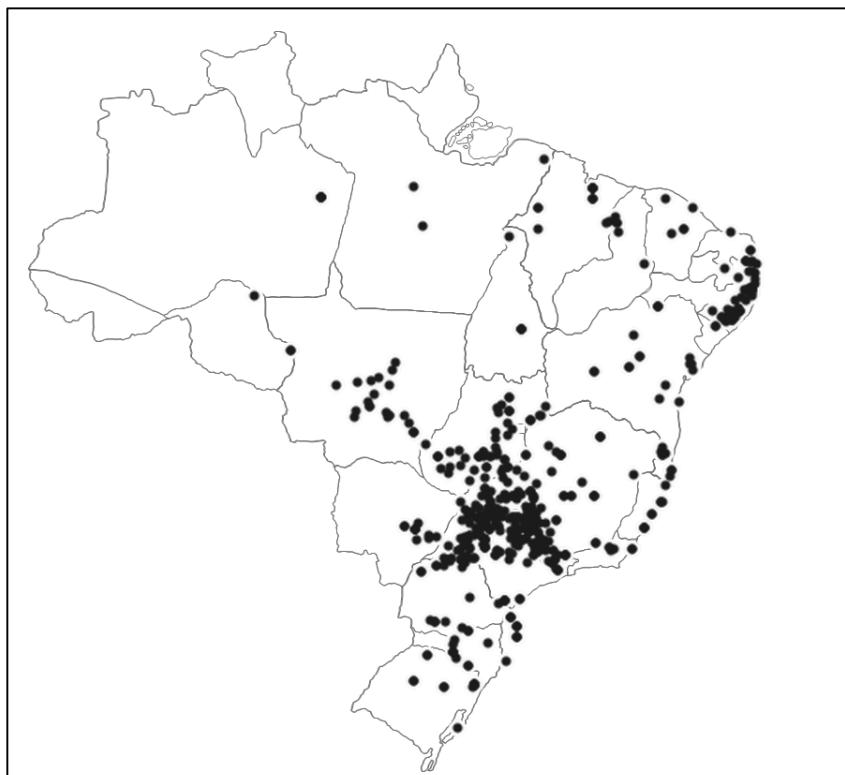


Figura 1 - Distribuição geográfica de atuação da LogísticaSA

Fonte: elaboração própria, com base em dados da LogísticaSA



Figura 2 - Mapa de calor de regiões por representatividade no faturamento da LogísticaSA

Fonte: elaboração própria, com base em dados da LogísticaSA

O setor de transportes brasileiro cresceu bastante no início dos anos 2000, conforme se verifica pela Figura 3, especialmente diante da desconcentração geográfica da economia brasileira na direção das regiões Nordeste, Centro-Oeste e Norte das últimas décadas. (FLEURY, 2003). Com isso, a receita média dos transportadores brasileiros aumentou mais de 250% em oito anos, o que inclui a empresa objeto deste estudo.

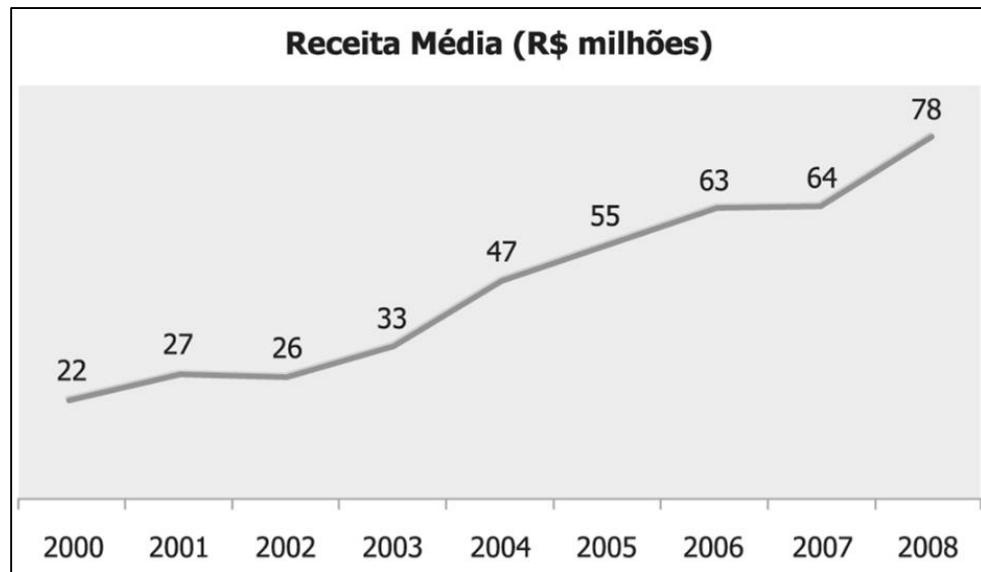


Figura 3 - Evolução da receita média dos transportadores brasileiros

Fonte: Araujo (2011)

As três principais atividades da LogísticaSA são a coleta, o transporte e a distribuição de cargas (ver Figura 4). Essas atividades são descritas brevemente abaixo:

- **Coleta:** coleta da carga nos diversos pontos de origem. Neste momento o material já está sob administração da LogísticaSA;
- **Transporte:** a carga é transportada por diferentes modais e pode passar por terminais intermediários antes de chegar ao seu destino final; e
- **Distribuição:** momento no qual a carga é recebida pelo cliente da LogísticaSA.

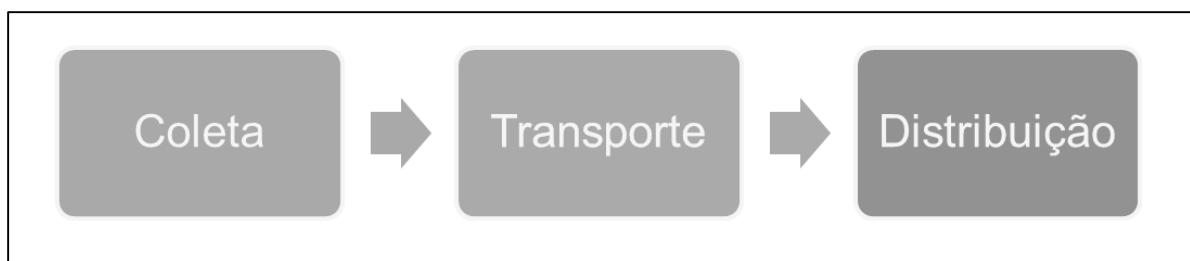


Figura 4 - Esquema dos três macroprocessos da LogísticaSA

Fonte: elaboração própria

Pode-se dizer que as cargas transportadas pela LogísticaSA se enquadram na classificação de “carga granel”, que é toda “*carga líquida ou seca embarcada e transportada sem acondicionamento, sem marca de identificação e sem contagem de unidades*” (FIESP, 2017).

A principal unidade de medida de quantidade da carga granel transportada é o volume, medido em metros cúbicos (m³).

A LogísticaSA utiliza quatro modais para o transporte de suas cargas no Brasil: rodoviário, ferroviário, hidroviário e dutoviário. O transporte rodoviário no Brasil representa mais de 60% de todas as cargas movimentadas no território nacional, o que indica forte concentração modal no país (CNT, 2014), em comparação com outros países como os EUA (26%), a Austrália (24%) e a China (8%) (WANKE; FLEURY, 2006).

Ainda em comparação com outros países, é possível verificar que o Brasil se encontra numa posição muito mais dependente do transporte rodoviário, especialmente quando comparado com os Estados Unidos. Veja-se pela Figura 5, que compara a matriz de transportes brasileira com a americana, que o país norte americano possuir uma matriz de transportes menos concentrada, sendo o modal principal o ferroviário, com menos de 40% de participação do total.

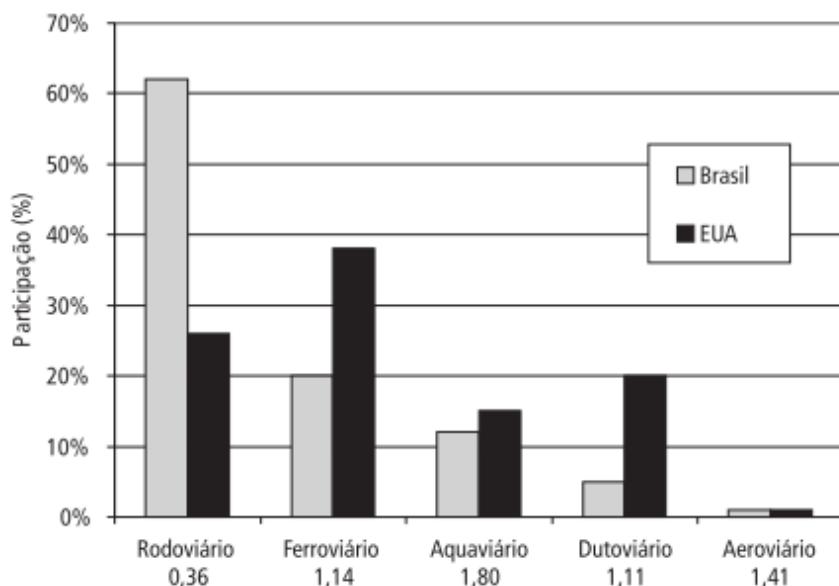


Figura 5 - Matriz de transportes brasileira e preços comparados com os EUA (2001)

Fonte: Fleury (2003)

Como reflexo da realidade brasileira, o modal predominante na cadeia logística da LogísticaSA é o transporte rodoviário, especialmente diante de questões de infraestrutura, de localização dos pontos de coleta e dos clientes, e também por decisões estratégicas da empresa.

Por este motivo que este trabalho se limitará a estudar apenas os fluxos de transporte rodoviário, que são gerenciados dentro da área de planejamento de transportes da LogísticaSA e que são mais detalhados na sequência do capítulo.

Área de Planejamento de Transportes

A área de planejamento de transportes da LogísticaSA é responsável pela execução de cinco atividades sequenciais, que são as seguintes:

1. Previsão de demanda dos clientes finais;
2. Planejamento do Serviço;
3. Roteirização;
4. Seleção de transportadoras; e
5. Execução e Replanejamento.

Tais atividades estão ilustradas em forma de fluxograma, conforme Figura 6.

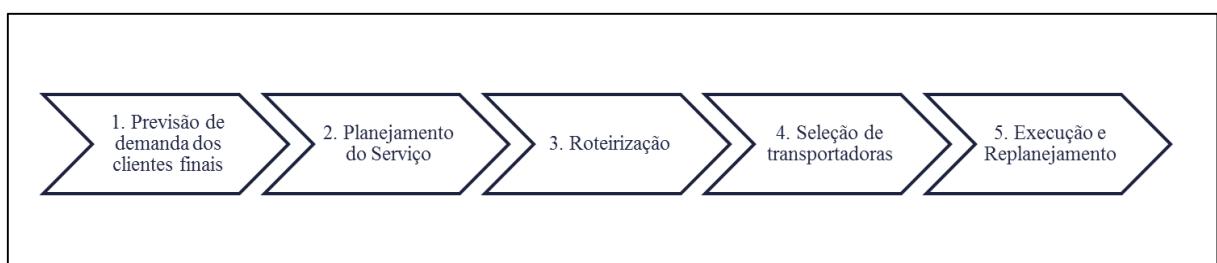


Figura 6 - Fluxo processual da área de planejamento da LogísticaSA

Fonte: elaboração própria

A primeira atividade da área é a previsão da demanda da empresa. A área utiliza técnicas de previsão estatística por séries temporais, aliadas a sistemas colaborativos de informação com seus clientes para prever a demanda para as próximas semanas e os próximos meses. Esta atividade é bastante estratégica para a empresa, pois é a partir dela que é possível realizar o planejamento da operação e o orçamento para os períodos seguintes. O principal resultado desta atividade é a criação de planilhas de demanda segmentadas em diversos níveis: por produto, por região, por tipo de cliente, entre outros.

A segunda atividade corresponde pelo planejamento do serviço a partir da previsão da demanda. Nesta etapa, as seguintes questões são respondidas:

- Quanto coletar de produto em cada ponto de origem?
- Qual demanda será atendida em cada período do mês?
- A empresa tem capacidade de atender a demanda?
- A empresa está com capacidade ociosa?
- O que precisa ser ajustado na cadeia logística para atender às decisões estratégicas e táticas da empresa?

A terceira atividade da área é a roteirização de toda a malha logística da empresa. Esta etapa define o volume de cada produto que será transportado entre quais pontos. Também cabe à roteirização priorizar os fluxos, definindo quais devem ser atendidos com maior urgência, baseando-se em critérios de risco e custo.

Após a definição das rotas, a LogísticaSA utiliza-se de empresas terceirizadas para realizá-las.

O processo de terceirização pode ser compreendido como sendo um processo gerenciado de transferência das atividades acessórias e de apoio a terceiros, de modo a permitir que a contratante concentre-se em seu negócio principal (*core business*). (QUEIROZ, 1992)

Como é possível identificar na Tabela 1, a atividade de transporte é a segunda mais terceirizada pelas maiores empresas do Brasil, ficando atrás apenas dos serviços alimentícios:

Tabela 1 - Atividades mais comumente terceirizadas nas empresas brasileiras (em 1993)

| Atividades terceirizadas | Nas 500 maiores empresas do país (em %) |
|--------------------------|---|
| Restaurante | 70,0 |
| Transporte | 58,3 |
| Segurança e portaria | 45,9 |
| Construção e montagem | 41,7 |
| Limpeza e faxina | sem dados |

Fonte: Elaborado com base em (MARINHO *et al.*, 2014)

Assim como a grande maioria das empresas do país, faz parte da estratégia operacional da LogísticaSA terceirizar os seus fretes. Neste caso, a “empresa-origem” é a LogísticaSA, que delega a atividade de fretes para as “empresas-destino” – que são referenciadas neste trabalho como fornecedores ou transportadoras.

A LogísticaSA não possui frota própria de transportes, e optou pela terceirização. Os principais motivos que levam a essa escolha são (MARINHO *et al.*, 2014):

- Redução dos custos fixos, como manutenção dos automóveis, salários e encargos de motoristas, etc.;
- Redução do tamanho da empresa;
- Aumento da flexibilidade e agilidade da organização; e
- Possibilidade de focar na sua competência nuclear (*core competence*).

Dado que a LogísticaSA não possui frota própria, a quarta etapa do fluxo processual apresentado é a seleção da transportadora (empresa terceirizada) que será responsável por cada frete (também nomeado de “rota”). Assim, a empresa enquadra-se na qualificação de “embarcadora”.

De acordo com Caixeta-Filho (2001), os principais agentes no mercado de transporte rodoviário de cargas (TRC) são:

1. Operador: empresa prestadora do serviço de transporte (transportadora terceirizada);
2. Embarcador: é o agente que precisa da viagem, dono da carga (LogísticaSA);
3. Regulador: entidade que exerce alguma forma de controle sobre a operação dos transportes. Essa regulação pode ser técnica ou operacional.

A Tabela 2 apresenta os principais riscos e as principais vantagens da opção pela terceirização. Todos esses fatores precisam ser considerados durante esta atividade, que será estudada com maior profundidade no presente trabalho.

Tabela 2 - Vantagens e riscos da terceirização

| Vantagens | Riscos |
|--|---|
| Economia de custos | Dificuldade de encontrar o parceiro ideal |
| Economia de investimentos | Especificidades de um contrato de parceria |
| "Enxugamento" administrativo (<i>downsizing</i>) | Resistências do quadro funcional |
| Transferência de tecnologia | Desconhecimento da legislação trabalhista |
| Sinergias | Dificuldade no controle do custo interno com a parceria |
| Especialização tecnológica | Dificuldade no relacionamento com os sindicatos |
| Maior empenho, criatividade e eficiência do terceiro em comparação a setores internos da empresa | Problemas de atrasos |
| | Perda de credibilidade no mercado |
| | Problemas de comunicação |
| | Possibilidade de responsabilização jurídica |

Fonte: MARINHO *et al.*, 2014

Os critérios utilizados para seleção de transportadoras vão além de custos, como o tempo de transporte; a tecnologia utilizada; a estratégia da própria empresa e o comportamento da demanda.

A própria oferta de transportadoras para essa atividade, por outro lado, também é influenciada por diversos fatores, como ilustra a Figura 7.

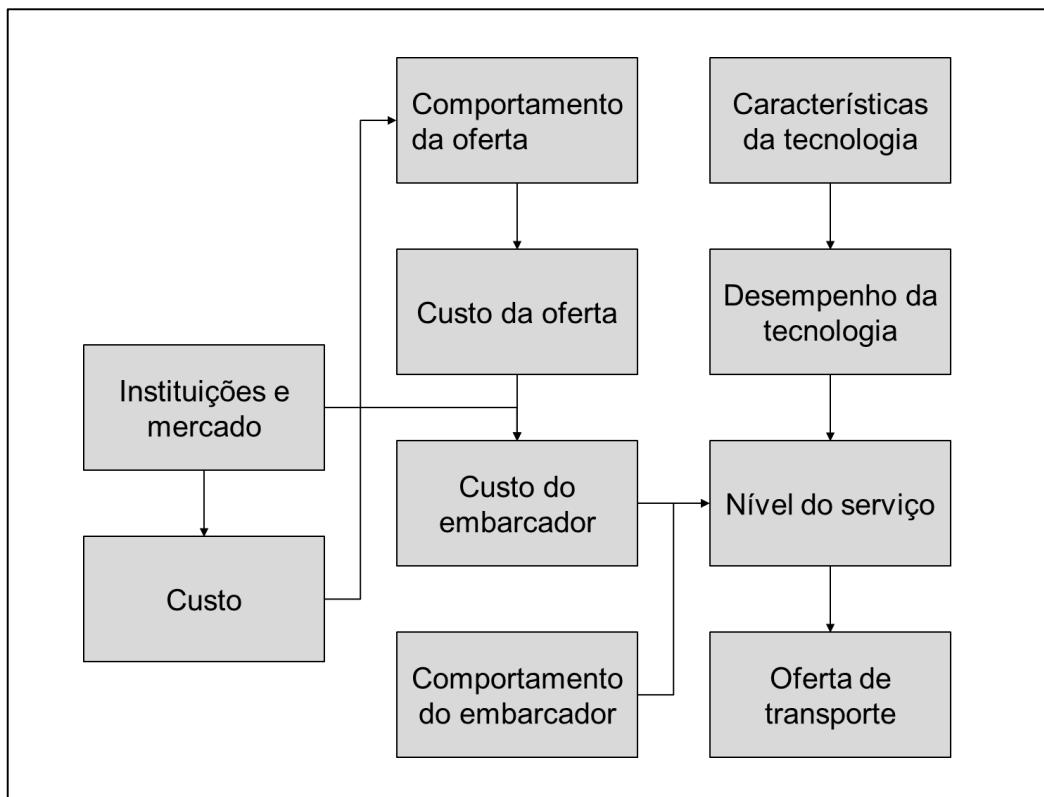


Figura 7 - Macro ambiente de influências sobre a oferta de transporte

Fonte: Kanafani (1983)

Por fim, a quinta atividade da área é a execução e o replanejamento do plano da empresa. É preciso que a empresa coloque em prática todo o plano traçado, e comece a operá-lo. Para isso, é necessário estabelecer contato e realizar contratos com fornecedores e clientes, mantendo sempre um bom canal de comunicação com as demais áreas da empresa. Com o passar do tempo, é normal que ocorram imprevistos, que fazem com que seja necessária a reavaliação do plano e redesenho de novas atividades.

Pode ser necessária a contratação de novos fornecedores, ou o cancelamento de alguma rota, por exemplo. Esta atividade está mais relacionada ao dia a dia da empresa e ao contato com a operação na prática, que deverá moldar-se à realidade enfrentada.

2.2 Definição do Problema

Considerando os processos da LogísticaSA apresentados na Seção 2.1, o foco deste trabalho será o processo quatro – seleção de transportadoras, como ilustra a Figura 8.



Figura 8 – Processo-alvo do problema

Fonte: elaboração própria

Este processo recebe da etapa anterior o planejamento de todas as rotas que a empresa pretende realizar no mês seguinte. Essas rotas são definidas por uma origem, destino, produto e quantidade próprios. Afim de ilustrar melhor o quanto exposto, veja-se a Figura 9.

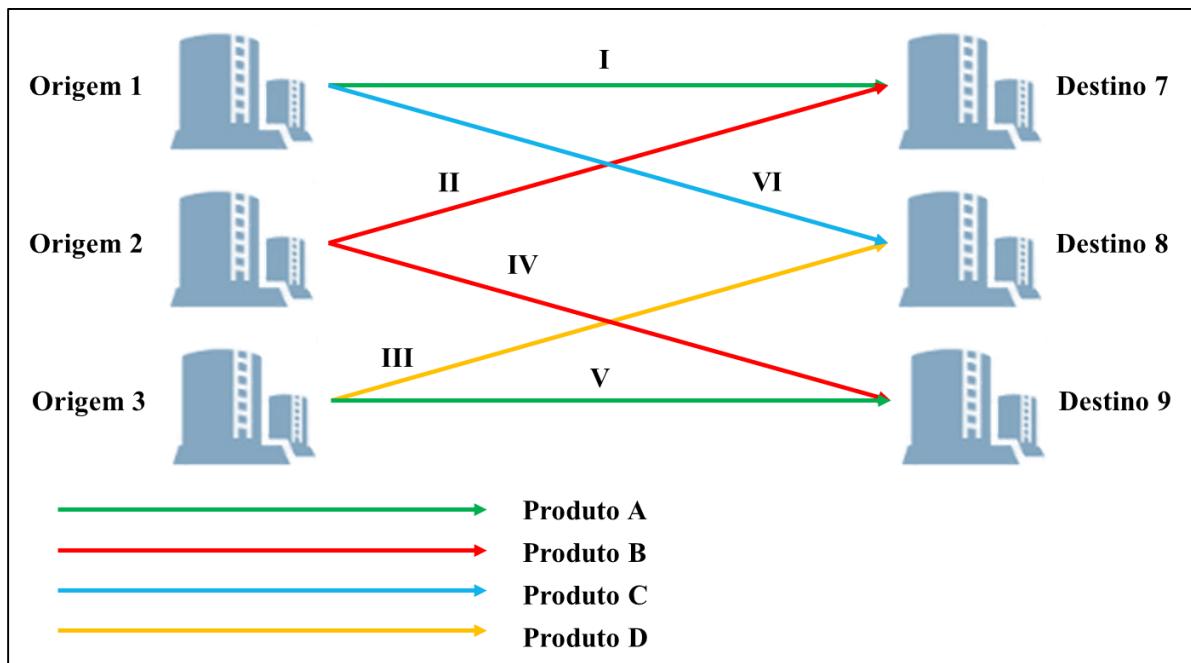


Figura 9 - Exemplos de rotas

Fonte: elaboração própria

A Tabela 3 representa quantitativamente o fluxo ilustrado na Figura 9.

Tabela 3 - Demanda de rotas

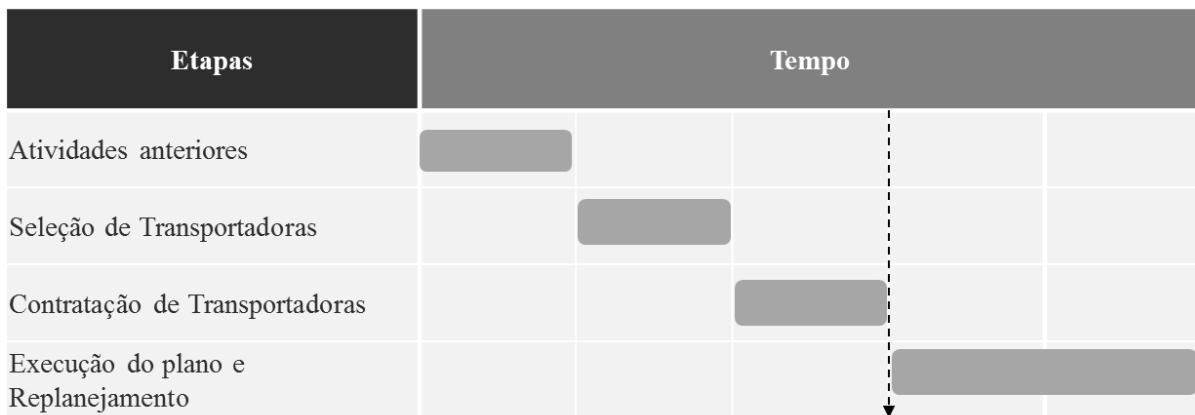
| Mês | Rota | Origem | Destino | Produto | Volume (m ³) |
|----------|------|--------|---------|---------|--------------------------|
| mar/2017 | I | 1 | 7 | A | 120 |
| mar/2017 | II | 2 | 7 | B | 160 |
| mar/2017 | III | 3 | 8 | D | 80 |
| mar/2017 | IV | 2 | 9 | B | 40 |
| mar/2017 | V | 3 | 9 | A | 120 |
| mar/2017 | VI | 1 | 8 | C | 200 |
| ... | | | | | |

Fonte: elaboração própria

A primeira coluna da Tabela 3 contém o mês para o qual a empresa está realizando seu planejamento. Em geral, este processo é realizado no início do mês anterior, momento pelo qual a empresa já possui as informações necessárias para definir as rotas, permitindo também a alocação e contratação de fornecedores com uma margem de tempo segura.

A coluna “Rota” remete ao identificador do trajeto, que também será utilizado em outros sistemas da empresa. As colunas “Origem” e “Destino” indicam o ponto inicial e final de cada rota. As colunas “Produto” e “Volume” indicam, respectivamente, qual será o objeto do transporte pela rota, e em qual quantidade (m³).

Veja-se, assim, um exemplo de cronograma de atividades, apresentado na Figura 10:

**Figura 10 - Cronograma de atividades**

Fonte: elaboração própria

Com estas informações em mãos a equipe de planejamento consegue realizar a seleção de transportadoras. O resultado principal desta etapa é a definição de qual empresa terceirizada irá

realizar cada uma das rotas definidas. Para realizar a seleção de transportadoras, a equipe utiliza critérios como custo, capacidade da transportadora, confiabilidade do serviço, entre outros.

Ressalta-se que somente participam deste processo de seleção de transportadoras as empresas que estejam cadastradas e habilitadas pela LogísticaSA. O primeiro critério para uma empresa terceira ser considerada como potencial fornecedora pela LogísticaSA é estar de acordo com as leis vigentes do país. Desde 2009, com a publicação da Lei nº 11.442/08 e da Resolução ANTT nº 3056/09 a Agencia Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) exige que os transportadores rodoviários sejam inscritos no Registro Nacional do Transporte Rodoviário de Cargas (RNTRC), como forma de habilitação.

Continuando o exemplo anterior, foram selecionadas transportadoras para realizar as rotas de I a VI e o resultado é apresentado na Tabela 4 e na Figura 11. Neste caso, cada uma das três transportadoras ficou responsável por duas rotas, que somam volumes distintos.

Tabela 4 - Exemplo de seleção de transportadoras

| Mês | Rota | Origem | Destino | Produto | Volume (m ³) | Transportadora |
|----------|------|--------|---------|---------|--------------------------|----------------|
| mar/2017 | I | 1 | 7 | A | 120 | T1 |
| mar/2017 | II | 2 | 7 | B | 160 | T2 |
| mar/2017 | III | 3 | 8 | D | 80 | T1 |
| mar/2017 | IV | 2 | 9 | B | 40 | T3 |
| mar/2017 | V | 3 | 9 | A | 120 | T3 |
| mar/2017 | VI | 1 | 8 | C | 200 | T2 |

Fonte: elaboração própria

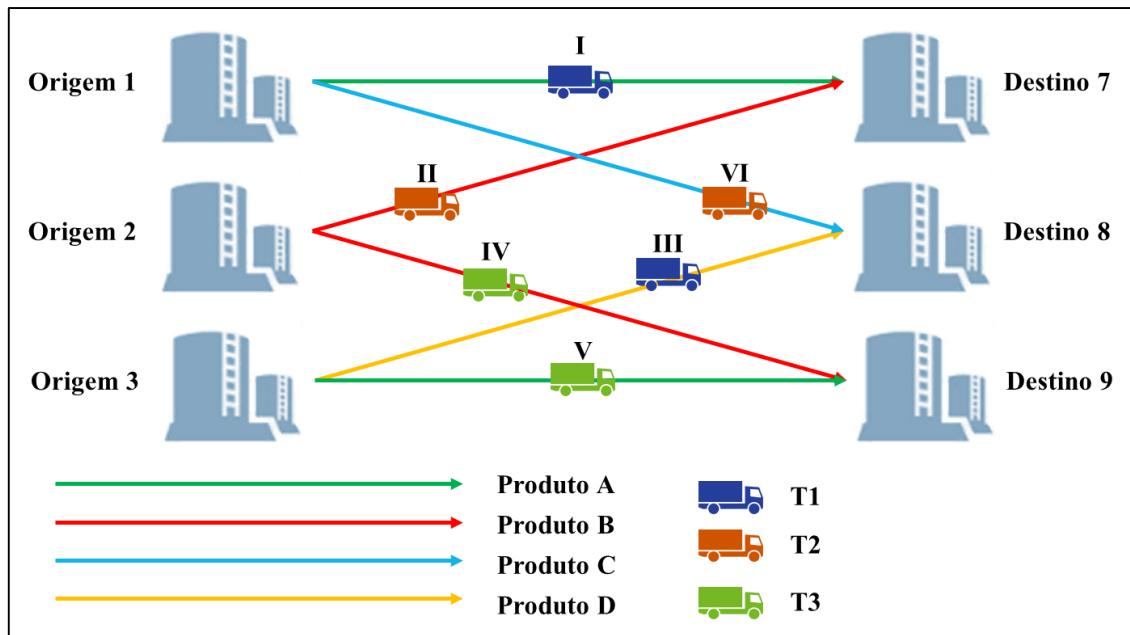


Figura 11 - Esquema de seleção de transportadoras

Fonte: elaboração própria

Na prática, este problema poderia ser simplificado de forma a considerar apenas as rotas (que incluem origem, destino, produto e quantidade) e as transportadoras, como representado na Figura 12.

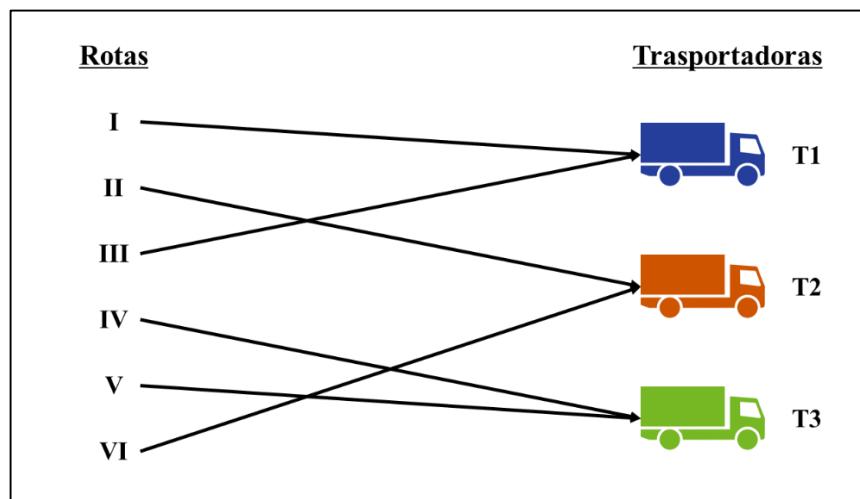


Figura 12 - Simplificação do Problema

Fonte: elaboração própria

Entretanto, a empresa nem sempre consegue chegar a uma distribuição de rotas que atenda toda a demanda e que, ao mesmo tempo, respeite as demais restrições de alocação, tais como a capacidade das transportadoras utilizando apenas as transportadoras e capacidades estabelecidos previamente. Faz parte do negócio da LogísticaSA realizar o seu plano de

alocação de rotas às transportadoras a partir dos valores de contrato, para que, em seguida, seja possível identificar as rotas remanescentes, e que deverão ser contratadas de modo pontual com cada fornecedor.

Quando a LogísticaSA contrata essas rotas fora do contrato, os preços costumam ter um custo médio superior ao praticado pelas outras transportadoras. A empresa só optaria pela contratação dessa transportadora dessas rotas caso não houvesse a possibilidade de alocação para as outras transportadoras de menor custo. É importante para a empresa estar sempre atenta a esses valores, para que possa renegociar contratos periodicamente e conseguir os melhores preços do mercado com seus fornecedores.

2.3 Objetivo do Trabalho

Atualmente, a atividade de alocação e contratação de transportadoras para as rotas é desempenhada por uma equipe de quatro pessoas da área de planejamento de transportes da LogísticaSA, de uma forma bastante manual.

Essa equipe também é responsável pela roteirização dos transportes, pela execução do plano e pelo replanejamento de rotas e transportadoras, pois na prática sempre são necessários ajustes ao longo do mês. A principal ferramenta utilizada pelos analistas são planilhas em Microsoft Excel, que contém as informações de demanda, de custos e de capacidades das transportadoras.

Como os analistas responsáveis por essa atividade já são mais experientes, eles possuem conhecimento sobre quais são as transportadoras que costumam ser as mais baratas em cada região e quais as rotas devem ser alocadas para cada transportadora. Existem algumas regras de negócio que não são bem definidas, como por exemplo o número mínimo de transportadoras que devem ser contratadas. Contudo, essas regras são consideradas no momento da alocação, devido à experiência dos analistas.

Essa atividade costuma ser bastante complexa, pois o número de origens, destinos, produtos e transportadoras é alto.

As quantidades variam mensalmente. Veja-se, por exemplo, um mês de referência em que existiam aproximadamente sessenta origens, cinquenta e seis destinos, vinte e três transportadoras e sete produtos. Caso existissem rotas de todas as origens para todos os destinos, de todos os produtos, o resultado seria mais de cinquenta mil rotas com necessidade de alocação. Contudo, o número de rotas do problema real varia em torno de trezentos.

Considerando o tamanho da operação, a execução manual da atividade de seleção de transportadoras tem duas principais consequências negativas: a duração da atividade e o resultado final. A atividade costuma durar cerca de três dias úteis para ser concluída, e é realizada mensalmente pela LogísticaSA. Entende-se que esta duração é elevada, e poderia ser reduzida com a implantação de um modelo matemático.

A segunda consequência diz respeito à não obtenção da solução ótima de alocação, que resultaria no custo mínimo de transportes para a empresa. Ao selecionar transportadoras de forma manual, os analistas podem não considerar combinações de rotas e transportadoras que levariam a uma maior redução do custo.

O objetivo deste trabalho, assim, é desenvolver modelos matemáticos que consigam tornar a atividade de alocação de rotas às transportadoras mais eficiente, tanto pela redução dos custos de transporte, quanto pela diminuição do tempo necessário para sua execução em comparação ao processo atual.

A Pesquisa Operacional e todas as suas ferramentas são de fundamental importância para que esse objetivo seja alcançado com êxito. Nos capítulos seguintes, serão abordados os métodos de resolução para este tipo de problema e os resultados obtidos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo é dedicado ao estudo dos principais temas relevantes para o desenvolvimento deste trabalho. Em um primeiro momento, os conceitos básicos de Pesquisa Operacional (PO) são introduzidos, bem como a origem do campo de estudo e suas principais características e aplicações.

Na sequência, parte-se do problema apresentado no capítulo anterior, e apresenta-se então uma revisão dos modelos matemáticos relacionados, suas características principais e as técnicas utilizadas na literatura.

3.1 O problema

O problema apresentado neste trabalho é a seleção de transportadoras terceirizadas (fornecedores) da empresa LogísticaSA para atender sua demanda, de modo a atingir um custo mínimo de transportes, respeitando-se todas as restrições impostas pelo negócio. Procura-se decidir para cada rota de frete da empresa (representada por uma origem, um destino, um produto e uma quantidade), e qual será a transportadora escolhida para realizá-la, como representado na Figura 12.

No caso do presente estudo, deve-se avaliar não apenas restrições de atendimento de demanda, como em casos presentes na literatura, mas também outras restrições inerentes ao negócio de transporte rodoviário de cargas (TRC) e à própria LogísticaSA

3.2 Pesquisa Operacional

De acordo com Arenales *et al.* (2007), o termo pesquisa operacional (tradução direta do termo em inglês *operations research*) foi criado na Inglaterra, durante a década de 1930 e estava relacionado com o estudo de técnicas operacionais militares. As primeiras aplicações de pesquisa operacional estiveram ligadas à Segunda Guerra Mundial, como o desenvolvimento de radares, manutenção de aviões e tanques, seleção do melhor tipo de avião para missões, dimensionamento de comboios de frota, entre outros.

Ravindran *et al.* (1987) explicam que após o final da guerra a pesquisa operacional passou a ser utilizada para resolver problemas gerenciais complexos das organizações, e uma das primeiras aplicações foi na produção e distribuição da indústria do petróleo. Um fator determinante para a expansão da disciplina foi a introdução e aprimoramento, na década de 1950, dos

computadores eletrônicos, que possibilitavam a resolução de problemas de escalas cada vez maiores, em menor tempo.

Um dos marcos mais importantes para o avanço da pesquisa operacional foi a publicação do *método simplex*, que até hoje é uma das ferramentas mais utilizadas para a resolução de problemas na área.

Arenales *et al.* (2007) citam que a pesquisa operacional envolve o desenvolvimento de métodos científicos para analisar sistemas e tomar decisões. Segundo Winston (2004), a pesquisa operacional utiliza uma abordagem científica para a tomada de decisões que busquem o ótimo de um sistema e reforça a ideia da existência de restrições de recursos (escassos).

Essa disciplina tem um papel fundamental na sociedade atual, dada a sua crescente complexidade e incerteza. As organizações demandam decisões cada vez mais ágeis e melhores, enquanto que a globalização aproxima rapidamente os diferentes agentes econômicos e sociais. Relata-se ainda a extensão de aplicações da disciplina, em áreas como agricultura, finanças, medicina, *marketing*, recursos naturais, ciências políticas, serviços urbanos e, inclusive, o setor de transportes, que é o tema deste trabalho. (ARENALES *et al.*, 2007)

A matemática é uma ferramenta fundamental no processo de entendimento dos fenômenos, processos e sistemas reais, que podem ser físicos, químicos, naturais ou sociais. Para tanto, é necessário descrever estes problemas por meio de relações matemáticas, que originam os modelos matemáticos. O esquema na Figura 13 ilustra como os modelos (abstratos) buscam explicar o mundo real presumido, que por sua vez, representa o mundo real de fato, assumindo-se algumas premissas e abstrações. (TAHA, 2007)

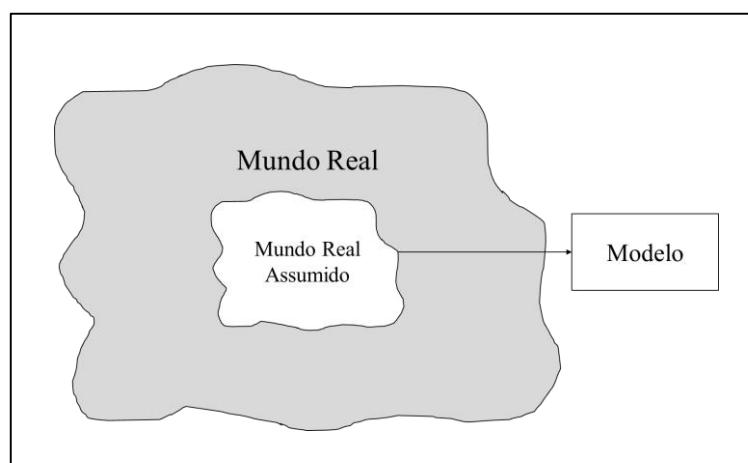


Figura 13 - Níveis de abstração no desenvolvimento de modelos

Fonte: Taha (2007)

Arenales *et al.* (2007) e Taha (2007) descrevem as cinco fases principais para a resolução de um problema por meio da pesquisa operacional (ver Figura 14):

- **Definição do problema:** delimita-se o escopo a ser estudado pelo problema, incluindo o que está e o que não está incluído. Esta atividade deve ser feita por toda a equipe de projeto, e seu objetivo é identificar os três elementos principais do problema: (1) descrição das alternativas, (2) definição do objetivo do estudo e (3) especificação das limitações dentro das quais o sistema modelado irá operar;
- **Construção do modelo:** esta fase traduz a fase anterior a partir de relações matemáticas e lógicas de simulação. Dependendo da formulação matemática construída, é possível utilizar algoritmos existentes para otimização ou mesmo por técnicas heurísticas. Em alguns casos também é possível utilizar técnicas de simulação ou uma combinação de simulação com otimização e heurística;
- **Solução do modelo:** são utilizados métodos matemáticos e algoritmos conhecidos para resolver o problema descrito no modelo da fase anterior. Destaca-se a importância de realizar análises de sensibilidade para obter informações adicionais acerca do funcionamento do modelo;
- **Validação do modelo:** verifica-se se o modelo representa adequadamente o comportamento esperado do sistema. Em termos gerais, deseja-se responder a pergunta: “o modelo faz sentido?”. É possível comparar os resultados com dados históricos, quando disponíveis; e
- **Implementação da solução:** esta etapa preocupa-se com a implementação na prática da solução construída, para que o modelo seja operacionalizado por uma equipe responsável e traga resultados concretos.

Destaca-se que este é um processo iterativo, que busca a construção do melhor modelo possível, e que este nem sempre será alcançado na primeira iteração. Esta sequência de atividades foi utilizada na construção do modelo matemático descrito nos capítulos seguintes.

Na literatura foram encontrados outros métodos de formulação e resolução de problemas semelhantes, sendo todos variações do descrito acima. Winston (2004), por exemplo, divide o processo em sete passos para a construção do modelo.

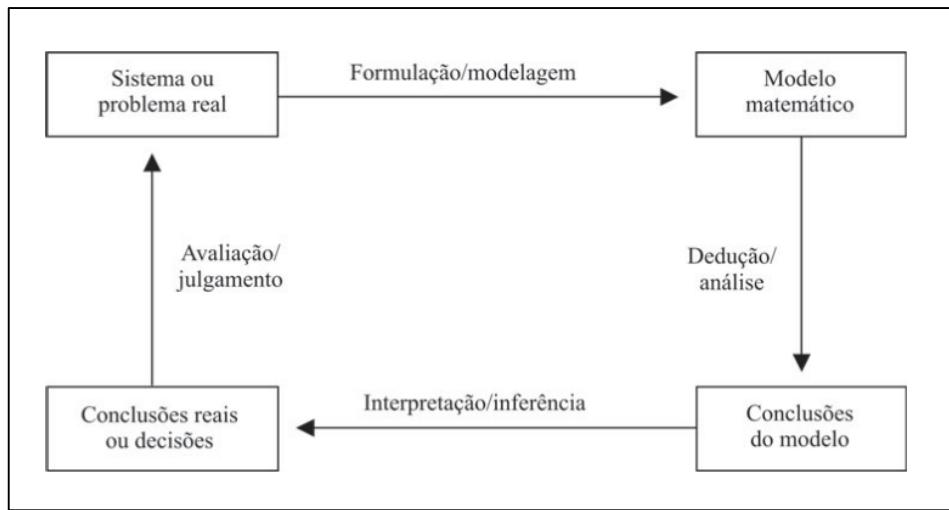


Figura 14 - Processo de modelagem

Fonte: Arenales *et al.* (2007)

Os modelos matemáticos prescritivos ou modelos de otimização devem possuir, segundo Winston (2004), certos componentes básicos: função objetivo, variáveis de decisão, restrições e o domínio das variáveis de decisão. Estes componentes são descritos a seguir:

- **Função objetivo:** É uma expressão matemática dependente de variáveis de decisão que o modelo busca otimizar. A otimização pode se dar pela maximização de seu valor final, como no caso de maximização da utilização de recursos ou maximização do lucro de uma empresa ou pode ser do tipo minimização, como em casos de redução de custos, por exemplo;
- **Variáveis de decisão:** São as variáveis que o modelo está permitido a alterar o valor, em sua busca pela solução ótima global do problema. Diferentes escolhas de valores para as variáveis de decisão geram resultados diferentes; e
- **Restrições:** São expressões matemáticas de igualdade ou desigualdade que limitam os possíveis valores para as variáveis de decisão, de modo a tentar traduzir limitações do mundo real para o modelo.

A **região viável** é composta por um conjunto de valores para as variáveis de decisão que respeite todas as restrições e o **domínio das variáveis**. Quando este conjunto de valores atinge seu máximo (ou mínimo), determina-se a **solução ótima** do problema.

Como descrito em Arenales *et al.* (2007), um problema de *programação linear inteira mista* (PLIM) tem a seguinte forma:

$$z = \max \mathbf{c}\mathbf{x} + \mathbf{d}\mathbf{y}$$

$$\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{y} \leq \mathbf{b}$$

$$\mathbf{x} \in R_+^n, \mathbf{y} \in Z_+^p$$

No qual **A**, uma matriz ($m \times n$), **D**, uma matriz ($m \times p$), **c**, um vetor ($1 \times n$), **d**, um vetor ($1 \times p$), e **b**, um vetor ($m \times 1$), representam os parâmetros do problema. Já os vetores de variáveis são **x**, dimensão ($n \times 1$) e **y**, dimensão ($p \times 1$).

Nos casos de todas as variáveis serem inteiras, o problema é classificado como sendo de *programação linear inteira* (PLI) e tem a seguinte forma:

$$z = \max \mathbf{c}\mathbf{x}$$

$$\mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}$$

$$\mathbf{x} \in Z_+^n$$

Quando todas as variáveis são binárias, tem-se um problema de *programação 0-1* ou *binária* (PB). O problema deste trabalho será tratado como sendo de *programação linear inteira mista*, com variáveis inteiras, binárias e reais.

3.3 Problemas de Transporte, Transbordo e Alocação

Nesta seção são descritos os problemas de transporte, transbordo e designação (ou alocação) enfrentados pela LogísticaSA na execução de seus serviços. Estes impasses, a partir do estudo de pesquisa operacional, são classificados como “problemas clássicos”, servindo como referência para a construção do modelo deste trabalho.

Veja-se, assim, alguns problemas clássicos traçados pela leitura e estudos referência no meio:

Taha (2007) define os modelos de transporte como uma classe especial de programas lineares, que lidam com o transporte de mercadorias de uma origem (como, por exemplo, fábricas) para destinos (tais como armazéns). O objetivo dos modelos é minimizar o custo de transporte e, ao mesmo tempo, atender às restrições de demanda do destino e de capacidade na origem. Também é destacada a flexibilidade deste problema, cuja aplicação pode igualmente se estender para áreas de operação, com controle de estoque e alocação de equipes.

Já a definição em Arenales *et al.* (2007), por outro lado, é mais específica, e apresenta que o problema consiste em transportar um produto dos centros de produção aos mercados consumidores de modo que o custo de transporte seja o menor possível.

Muito embora exista uma certa diferença quanto às definições dos problemas de transporte, a sua descrição geral é especificada pelas regras abaixo (WINSTON; GOLDBERG, 2004):

- I. São dados m pontos de oferta, também chamados de origens. Estes pontos possuem capacidade máxima de oferta de a_i unidades;
- II. São dados n pontos de demanda, também chamados de destinos. Estes pontos precisam receber ao menos b_j unidades;
- III. Cada unidade produzida no ponto de oferta i e transportado ao ponto de demanda j incorre em um custo variável de c_{ij} ;

A variável x_{ij} representa o número de unidades transportada do ponto de origem i para o ponto de destino j .

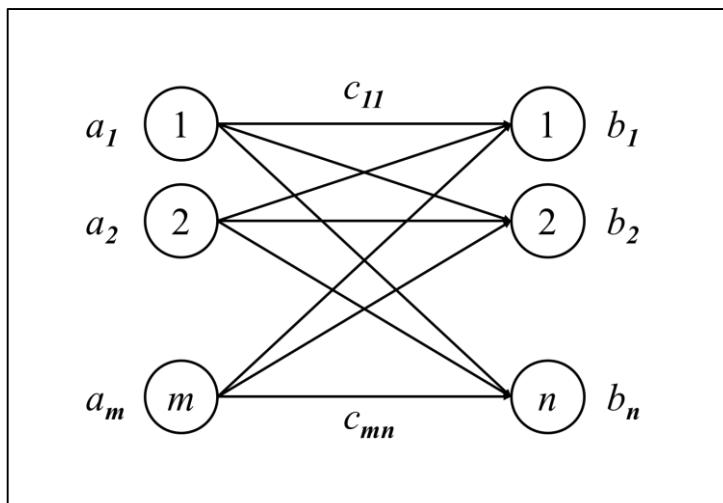


Figura 15 - Rede de transporte

Fonte: Adaptado de (ARENALES *et al.*, 2007)

O modelo matemático completo do problema, ilustrado na Figura 15 é apresentado por ARENALES *et al.* (2007):

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad j = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m \text{ e } j = 1, \dots, n$$

A função objetivo é o somatório dos produtos entre a quantidade transportada entre dois pontos e o custo unitário de transporte entre esses mesmos pontos. A primeira restrição limita a soma da quantidade transportada de um ponto de origem i em sua capacidade máxima a_i . Já a segunda restrição determina que cada ponto de destino j tenha a sua demanda b_j atendida. Além disso, a variável resposta x_{ij} deve ser não-negativa.

Problemas de transporte são ditos **balanceados** se o total da demanda é equivalente ao total da oferta, ou seja:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$$

Problemas de transbordo, são derivações dos problemas de transporte, que incluem localidades intermediárias, atuando como centros de distribuição (ver Figura 16).

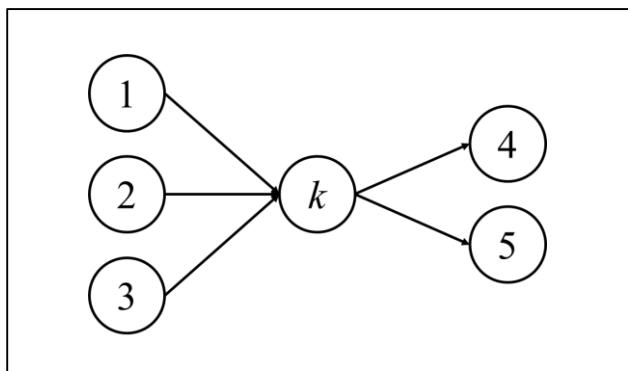


Figura 16 – Exemplo do problema de transbordo

Fonte: Adaptado de (ARENALES *et al.*, 2007)

Nesses casos, são incluídas restrições de fluxo e balanço de massa para garantir que tudo que entre nestes postos, também saia. Para todas as localidades intermediárias k deve-se valer:

$$\sum_i x_{ik} = \sum_j x_{kj}$$

O problema estudado no caso da LogísticaSA possui características dos problemas de transporte, mas também dos *problemas de alocação*. Winston (2004) define problemas de alocação (ou designação) como sendo um problema de transporte balanceado, cujas demandas e ofertas são equivalentes a um.

Dessa forma, o problema caracteriza-se pelo conhecimento do custo de designação de cada ponto de demanda para um ponto de oferta.

Por exemplo, supondo que existem n rotas que precisam ser atribuídas para n transportadoras e que p_{ij} representa o custo da transportadora i realizar a rota j . Sendo a variável de decisão x_{ij} (binária) igual a um se a transportadora i for designada para realizar a rota j e zero, caso contrário. Caso o número de rotas e transportadoras não seja igual, é possível adicionar nós fictícios aos problemas para satisfazer essa hipótese. Este caso pode ser análogo ao problema de transporte, no qual as rotas são as ofertas e as transportadoras as demandas. (TAHA, 2007)

Este problema de atribuição pode ser modelado matematicamente da seguinte forma (ARENALES *et al.*, 2007):

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot x_{ij}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, n$$

A função objetivo é o somatório do produto entre o vetor p_{ij} (custo da alocação) pela variável de decisão x_{ij} , que indica qual rotas foram alocadas para cada transportadora, e vice-versa. A primeira restrição determina que cada transportadora deve ser alocada para exatamente uma rota, enquanto a segunda restrição determina que cada rota deve ser alocada para exatamente uma transportadora. A variável resposta x_{ij} é binária.

3.4 Problema de Seleção de Fornecedores

A atividade de identificação dos melhores fornecedores para um determinado produto ou serviço é uma das principais atividades das empresas atualmente, e é fundamental para a boa gestão da cadeia de suprimentos.

De acordo com Ghodsypour e O'Brien (2001), a seleção dos fornecedores corretos reduz significativamente os custos de uma empresa, e contribui também para o aumento de sua competitividade no mercado. Contudo, essa tarefa pode ser bastante complexa, pois envolve critérios quantitativos, tais como preço, bem como qualitativos, como a relação entre as empresas e a qualidade do serviço.

Dickson (1966) realizou um estudo com mais de cento e setenta entrevistados para avaliar quais seriam os critérios que deveriam ser considerados para a seleção de fornecedores. Seu estudo indicou que as empresas de sucesso utilizam vinte e três critérios para a seleção e avaliação de seus fornecedores.

Veja-se, conforme Tabela 5, os critérios de seleção de fornecedores mais utilizados:

Tabela 5 - Critérios de seleção de fornecedores

| Ranking | Fator |
|---------|--------------------------------|
| 1 | Qualidade |
| 2 | Entrega |
| 3 | Performance histórica |
| | Garantias e Políticas de |
| 4 | devolução |
| 5 | Capacidade produtiva |
| 6 | Preço |
| 7 | Capacidade técnica |
| 8 | Posição financeira |
| 9 | <i>Compliance</i> processual |
| 10 | Sistema de comunicação |
| 11 | Reputação e posição no mercado |

| | |
|----|-----------------------------|
| 12 | Desejo de negócio |
| 13 | Gestão e organização |
| 14 | Controles operacionais |
| 15 | Serviços de reparo |
| 16 | Atitude |
| 17 | Impressão |
| 18 | Habilidade de embalagem |
| 19 | Histórico trabalhista |
| 20 | Localização geográfica |
| 21 | Volume de negócio histórico |
| 22 | Treinamento |
| 23 | Combinados recíprocos |

Fonte: adaptado de Dickson (1966)

Segundo Cohen e Rousell (2004), as organizações estão cada vez mais buscando ferramentas para auxiliar o processo de tomada de decisão, o que demonstra a necessidade de se criar um modelo apto a reunir e otimizar todos os critérios de forma satisfatória.

Para tanto, foram desenvolvidos empiricamente diversos métodos para se buscar a resolução dos impasses, cada um com objetivos e focos diferentes.

Maloni e Benton (1997), por sua vez, descrevem uma gama de oportunidades das quais as empresas têm para utilizar a pesquisa operacional no campo da gestão da cadeia de suprimentos, e como isso pode levar ao desenvolvimento de produtos e serviços de maior qualidade, mais baratos e desenvolvidos cada vez mais rápido. Dentre as oportunidades, são citadas: seleção de fornecedores, definição de tamanho de lote e definição de planos de produção.

Conforme Ávila *et al.* (2012), o problema de seleção de fornecedores (ou *Supplier Selection Problem – SSP*) corresponde à segunda atividade dentro de um processo de três etapas: qualificação, seleção e avaliação (ver Figura 17). Como esse processo é contínuo e está sujeito a novas entradas e saídas de parceiros, ele pode ser classificado como dinâmico.

Esse processo inicia-se com a *qualificação*, fase na qual os fornecedores precisam atender aos requisitos básicos ou mínimos estabelecidos pela empresa, como por exemplo o cumprimento de alguma regulação ou a obtenção de uma certificação.

Após o filtro inicial, os fornecedores são comparados com base em alguns critérios definidos pela empresa contratante, conforme mencionado anteriormente.

Após a seleção e contratação dos fornecedores, inicia-se a terceira etapa do processo, na qual é realizada a avaliação. Esta, por sua vez, não é a etapa final do processo como um todo, mas apenas finaliza um ciclo, uma vez que o processo é contínuo, e as informações obtidas nessa fase serão utilizadas na próxima etapa de qualificação de fornecedores, reiniciando o ciclo.

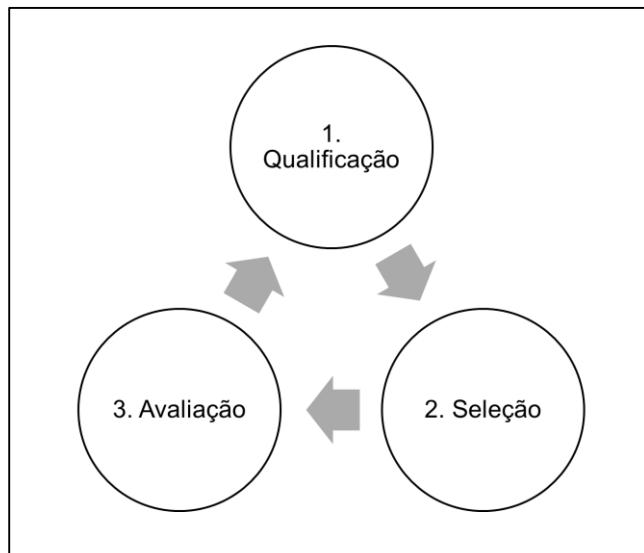


Figura 17 - Processo dinâmico de seleção de fornecedores

Fonte: (ÁVILA *et al.*, 2012)

Existe uma grande variedade de técnicas e ferramentas para a escolha de fornecedores. Pode-se citar alguns deles:

- **Ponderação linear:** método de distribuição de pesos para critérios e atribuição de notas para os fornecedores que são avaliados por uma análise cruzada em matriz. O fornecedor com a maior nota é o selecionado. (WEBER; CURRENT J.R.; BENTON W.C., 1991)
- **Programação matemática:** o problema é formulado por meio de um modelo com função objetivo e restrições que busca ser minimizado ou maximizado. Este será o principal tema do presente trabalho. (GABALLA, 1974)
- **Modelos multicritérios:** são avaliados diversos critérios e um conjunto de alternativas de forma sistemática. Um dos métodos mais clássicos discutidos na literatura é o *Analytic Hierarquic Process* (AHP, ou Análise Multicritério), desenvolvido por Thomas L. Saaty (2008). (ÁVILA *et al.*, 2012; KAHRAMAN *et al.*, 2003; KHAN; JAYANT, 2015; KUBDE, 2012).

- **Total Cost of Ownership (TCO):** o processo de escolha do fornecedor considera todos os custos que o produto ou serviço incorreu durante seu ciclo de vida.
- **Teoria Fuzzy:** métodos de atribuição de valores quantitativos a características qualitativas de modo a avaliar os fornecedores de forma holística. (KAHRAMAN; CEBECI; ULUKAN, 2003; KHAN; JAYANT, 2015; M.N. QURESHI; KUMAR; KUMAR, 2008)

Gaballa (1974) foi um dos primeiros autores a aplicar programação matemática na seleção de fornecedores de um caso real. Para tanto, foi utilizado um modelo de programação linear inteira mista para resolver um problema de minimização de custos com fornecedores dos correios australianos, considerando a capacidade dos fornecedores e o atendimento da demanda.

Nos anos seguintes, outros autores publicaram novos métodos de aplicação de pesquisa operacional na seleção de fornecedores. Anthony e Buffa (1977) desenvolveram um modelo com único objetivo para auxiliar o processo de compras de fornecedores em um intervalo de tempo. Buffa e Jackson (1983) apresentaram um modelo multicritério para a seleção de fornecedores que considera dois grupos de requisitos: os atributos do fornecedor (quantitativos e qualitativos) e os requisitos da empresa compradora.

Turner (1988) desenvolveu um programa matemático para a companhia de carvão britânica (*British Coal*) que também minimizava o custo total de compra considerando a capacidade do fornecedor, as quantidades mínimas e máximas de pedido, a demanda e características regionais.

Bender *et al.* (1985) resolveram um problema semelhante para a *International Business Machines* (IBM). Eles aplicaram um programa com objetivo único de minimizar a soma dos custos de estoque, compra e transporte simultaneamente para n períodos, porém não foi apresentada a formulação matemática final.

Uma evolução do modelo foi proposta por Pan (1989). Neste modelo, o autor considera que a demanda pode ser dividida entre os vendedores, de modo a garantir a oferta de produto/serviço para o comprador. Dessa forma, diminui-se o risco operacional da falta. Pan considera o custo na função objetivo, enquanto o nível de serviço e a qualidade são restrições na modelagem.

Chaudhry *et al.* (1993) desenvolveram um modelo de programação linear inteira mista semelhante com o objetivo de seleção de fornecedores. A função objetivo do modelo proposto

por eles considera os custos fixos e variáveis da compra e utiliza como restrições a qualidade e a capacidade dos fornecedores como restrições.

Rosenthal *et al.* (1995) propuseram um modelo de programação linear inteira mista para resolver um problema de seleção de fornecedores para um conjunto de produtos no qual as capacidades e a qualidade e os preços dos fornecedores variam. Neste caso foi utilizada uma função objetivo única para a resolução.

Ghodsypour e O'Brien (2001) desenvolveram um modelo de seleção de fornecedores em dois estágios. No primeiro, propuseram um modelo de seleção com o objetivo de minimizar o custo logístico total da empresa, incluindo o preço total, os custos de estoque e de pedido e restrito peça capacidade do vendedor e pela demanda do comprador (quantidade e qualidade). Na sequência, os autores exploraram diferentes funções objetivos que podem ser consideradas com diferentes pesos em problemas do mesmo tipo.

Firouz, Keskin e Melouk (2017) trabalharam em um problema de seleção de fornecedores em uma empresa com um único produto e que desejava fazer o transbordo entre múltiplos centros de distribuição. Os estoques dos centros de distribuição são repostos pelos fornecedores escolhidos a partir de um modelo que considera seu preço, sua capacidade e sua qualidade. Neste trabalho, os autores também exploraram o uso de uma heurística de decisão, associada a um *software* de simulação.

A partir da análise das soluções propostas pelos autores citados acima, em seguida será apresentado o modelo matemático de programação linear inteira mista desenvolvido para solucionar o problema de alocação de rotas à fornecedores no caso concreto, da LogísticaSA.

A formulação do modelo foi inspirada nas referências bibliográficas de problemas similares, e utiliza conceitos de problemas de transporte e transbordo (atendimento da demanda e restrição de capacidade), alocação (definir um fornecedor por rota) e de seleção de fornecedores (critérios de custo para seleção de fornecedores).

4 MODELO PROPOSTO

Este capítulo apresenta a modelagem matemática de programação linear inteira mista (PLIM) desenvolvida para solucionar o problema de alocação de rotas a fornecedores da empresa Logística SA.

Primeiramente, o modelo completo será introduzido e detalhado, com seus índices, parâmetros, constantes, variáveis, função objetivo e restrições. Na Seção 4.2, as restrições são detalhadas tanto para explicar como funcionam, quanto para explicar a sua importância para o resultado final esperado do modelo matemático.

Após a descrição do modelo, são apresentados exemplos simplificados do problema, em instâncias reduzidas. Apresenta-se a discussão quanto aos principais resultados obtidos, bem como do comportamento do modelo como um todo.

4.1 Modelo

O modelo apresentado nesta seção busca solucionar o problema de alocação de rotas às transportadoras terceirizadas pela LogísticaSA, de modo a atender à demanda, respeitando as restrições de número mínimo de transportadoras contratadas, capacidade de transporte das empresas e número máximo de operadoras em um ponto de origem ou destino.

Para o desenvolvimento do modelo foram utilizados como referência os problemas de transporte, transbordo e alocação definidos anteriormente.

Índices

$$i = 1, \dots, I$$

Local de origem das rotas que serão alocadas às transportadoras pelo modelo. O índice i varia de um até o número total de origens das rotas (I).

$$j = 1, \dots, J$$

Local de destino das rotas que serão alocadas às transportadoras pelo modelo. O índice j varia de um até o número total de destinos das rotas (J).

$t = 1, \dots, T$

Transportadora contratada para atender determinada rota. O índice t varia de um até o número total de transportadoras cadastradas no sistema mais 1 (T), onde a última transportadora representa a demanda que não foi atendida pelas transportadoras cadastradas, sendo uma transportadora fictícia.

$p = 1, \dots, P$

Produto que será transportado. O índice p varia de um até o número total de produtos que se planeja transportar (P).

Parâmetros

Min_transp

Número mínimo de transportadoras que devem ser selecionadas. É um número inteiro positivo, definido pela equipe de operação responsável pela alocação de transportadoras.

C_{ijtp}

Custo, em R\$/m³ do transporte do produto p pela transportadora t na rota da origem i para o destino j . Este valor é tabelado em contrato

D_{ijp}

Demandas, em m³, do produto p da rota da origem i para o destino j . Esse valor é dado como entrada de outras áreas de planejamento da Logística AS.

K_{tp}

Capacidade, em m³, de transporte do produto p pela transportadora t . O valor é estabelecido em contrato.

Y_{ijt}

Parâmetro binário, cujo valor é um caso a transportadora t possua contrato para realizar a rota da origem i para o destino j ou zero caso não possua contrato. Este valor é uma definição da área responsável pela seleção de transportadoras.

| | |
|--------------------------------------|--|
| $Max_Transp_O_i$ | Número que indica o máximo de transportadoras distintas que podem operar na origem i . |
| $Max_Transp_D_j$ | Número que indica o máximo de transportadoras distintas que podem operar no destino j . |
| M | Parâmetro utilizado com a função de auxiliar no funcionamento das restrições. É um número inteiro positivo suficientemente grande. |

Variáveis de Decisão

| | |
|------------------------------|--|
| V_{ijtp} | Variáveis reais positivas que indicam o volume, em m^3 , que foi alocado para a transportadora t , do produto p , na rota da origem i para o destino j . |
| T_t | Variáveis binárias que assumem o valor 1 caso a transportadora t seja alocada para alguma rota e 0 caso contrário. |
| TRO_{it} | Variáveis binárias que assumem o valor 1 caso a transportadora t seja alocada para alguma rota com origem em i e 0 caso contrário. |
| TRD_{jt} | Variáveis binárias que assumem o valor 1 caso a transportadora t seja alocada para alguma rota com destino em j e 0 caso contrário. |

Modelo Proposto

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P C_{ijtp} V_{ijtp} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{t=1}^T V_{ijtp} \geq D_{ijp} \quad \forall i, j, p \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J V_{ijtp} \leq K_{tp} \quad \forall t, p \quad (3)$$

$$\sum_{p=1}^P V_{ijtp} \leq Y_{ijtp} M \quad \forall i, j, t \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P V_{ijtp} \geq T_t \quad \forall t \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T V_{ijtp} \leq T_t M \quad \forall t \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T T_t \geq \text{Min_transp} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P V_{ijtp} \geq \text{TR}O_{it} \quad \forall i, t \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P V_{ijtp} \leq \text{TR}O_{it} M \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P V_{ijtp} \geq TRD_{jt} \quad \forall j, t \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P V_{ijtp} \leq TRD_{jt} M \quad \forall j, t \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^T TRO_{it} \leq Max_Transp_O_i \quad \forall i \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^T TRD_{jt} \leq Max_Transp_D_j \quad \forall j \quad (13)$$

$$V_{ijtp} \geq 0 \quad \forall i, j, t, p \quad (14)$$

$$T_t, TRD_{jt}, TRO_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, t, p \quad (15)$$

A função objetivo e os conjuntos de restrições serão apresentados na próxima seção (4.2).

4.2 Descrição do Modelo

Nessa seção detalha-se cada uma das equações apresentadas na seção anterior de forma descriptiva. Cada conjunto de equações é identificada pelo número à sua direita.

A função objetivo (1) minimiza o custo total de transportes com fornecedores da empresa LogísticaSA. O valor é calculado como o produto do parâmetro de custo individual C_{ijtp} (R\$/m³) pela variável V_{ijtp} (m³), sendo o resultado um valor em R\$. O parâmetro de custo é um valor tabelado e fixado em contrato entre a LogísticaSA e cada fornecedor. Já a variável V_{ijtp} informa qual o volume do produto p será transportado pela transportadora t na rota de i para j . Esse componente representa a alocação tradicional de transportadoras através dos volumes pré-estabelecidos em seus contratos com a LogísticaSA.

Um modelo clássico de custeio de transporte rodoviário proposto por Lima (2013), classifica os custos em duas categorias, como exposto na Tabela 6. No caso em estudo, esses custos são todos arcados pelas empresas terceirizadas, tanto os fixos quanto os variáveis. As

transportadoras repassam esses custos, com uma margem de lucro para a LogísticaSA pelo parâmetro variável de custo C_{ijtp} .

Tabela 6 - Categorias de custos em transporte rodoviário

| Custos Fixos | Custos Variáveis |
|------------------------------------|-------------------------|
| depreciação dos veículos | pneus |
| remuneração do capital | óleo/lubrificação |
| custos administrativos | lavagem/manutenção |
| IPVA/seguro obrigatório de veículo | combustível |
| pessoal | pedágio |

Fonte: elaboração própria, baseado em Lima (2013)

Ressalta-se que a função objetivo visa a redução do custo de transporte, e não de todos os custos logísticos da empresa. A equação de custos logísticos, descrita por Caixeta-Filho (2001) é apresentada a seguir:

$$\text{Custos logísticos} = \text{custo direto do transporte} + \text{custo financeiro do estoque em trânsito} + \text{custo financeiro do estoque médio no destino e do estoque de segurança}$$

O modelo visa a redução do custo direto do transporte, visto que a redução do estoque em trânsito e o custo financeiro do estoque médio e de segurança são avaliados nas etapas anteriores do processo da LogísticaSA.

O conjunto de restrições (2) busca garantir que a demanda D_{ijp} seja atingida, considerando todos os produtos p e todas as rotas das origens i para os locais de destino j . Nota-se que a demanda de um determinado produto p em uma rota de i para j será atingida através da soma dos volumes transportados por todas as transportadoras. Dessa forma, sempre que houver a demanda de um produto em uma rota, será alocada ao menos uma transportadora para supri-la. Contudo, essa restrição não delimita o número de transportadoras consideradas para atender à demanda.

Nota-se também, que o conjunto de restrições (2) não restringe um valor superior para a variável V_{ijtp} . Isso não é necessário, pois essa função será desempenhada pela minimização da função objetivo, visto que quanto maior o volume transportado, maior o custo de transporte da LogísticaSA.

O conjunto de restrições (3) indica que a soma do volume transportado por uma transportadora t de um produto p não pode ultrapassar o valor estabelecido no contrato com a LogísticaSA.

Cada produto do portfólio da LogísticaSA possui a sua especificidade e, consequentemente, demanda um tipo de transporte diferenciado. Sendo assim, cada fornecedor tem cadastrado no sistema da empresa a sua capacidade para transportar aquele determinado tipo de produto no período, considerando as demandas da empresa.

O conjunto de restrições (4) busca relacionar a variável V_{ijtp} com o parâmetro do modelo Y_{ijt} . Quando o parâmetro Y_{ijt} for zero, então V_{ijtp} deve ser zero também. Quando Y_{ijt} for um, então V_{ijtp} pode assumir qualquer valor maior ou igual a zero. Algumas funções deste conjunto de parâmetros Y são garantir o controle de qualidade da alocação de fornecedores e também a pré-seleção de um determinado fornecedor pela área responsável por operar o modelo.

A Tabela 7 ilustra o funcionamento do parâmetro Y . Neste exemplo, considera-se que todas as transportadoras têm capacidade de atender a demanda e as outras restrições não impactam a decisão do modelo. Deste modo, a função objetivo será minimizada com a escolha da transportadora de menor custo para essa determinada rota.

O cenário 1 representa um cenário no qual todas as transportadoras estão habilitadas a realizar a rota e, assim, a transportadora $t2$ seria a escolhida. Já no cenário 2, apenas a transportadora $t5$ está habilitada para realizar a rota e seria a escolhida. Esta situação pode ocorrer por regras de negócio e foram um pedido da LogísticaSA para o modelo. A transportadora $t5$ pode ter uma qualidade superior que as demais para a rota ou essa é simplesmente uma decisão estratégica para a empresa. Por fim, no cenário 3, apenas as transportadoras $t1$ e $t2$ foram desabilitadas para a rota, seja por motivos comerciais ou estratégicos. Neste caso o modelo buscaria a opção de menor custo entre as transportadoras restantes.

Tabela 7 - Exemplo de aplicação do conjunto de restrições (4)

| Transportadora | Custo (R\$/m ³) | Y (binário) | | |
|----------------|-----------------------------|-------------|-----------|-----------|
| | | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
| t1 | 10,90 | 1 | 0 | 0 |
| t2 | 10,70 | 1 | 0 | 0 |
| t3 | 11,30 | 1 | 0 | 1 |
| t4 | 11,10 | 1 | 0 | 1 |
| t5 | 12,10 | 1 | 1 | 1 |

Fonte: elaboração própria

O parâmetro Y também pode servir como forma de pré-seleção de fornecedores aptos a realizar uma determinada rota a partir de critérios subjetivos. Alguns critérios indicados por Marinho *et al.* (2014) são:

- Reputação e imagem do fornecedor;
- Informação disponível de outros compradores com experiências com esse fornecedor;
- Informações de bancos de dados governamentais ou outras entidades de classe (ANTT, FIESP, etc.);
- Testes de pré-avaliação;
- A tecnologia utilizada pelo fornecedor (sistemas de informação, idade e condição da frota);
- A qualidade do serviço prestado anteriormente pelo fornecedor.

Os conjuntos de restrições (5) e (6) relacionam as variáveis T_t com as variáveis V_{ijtp} . O conjunto de restrições (5) define que a variável T para uma transportadora t deve ser menor ou igual à soma de todos os volumes transportados por esta transportadora em qualquer rota e de qualquer produto. Com isso, garante-se que caso uma transportadora não possua nenhum volume alocado, a variável T assumirá valor zero.

Já o conjunto de restrições (6) garante que sempre que existir algum volume V_{ijtp} positivo de uma transportadora t , a variável T_t , sendo binária, deverá assumir o valor de 1 para satisfazer as inequações.

A restrição (7) é responsável por garantir que o modelo selecionará ao menos um número mínimo de transportadoras para a realização das rotas. O número mínimo de transportadoras é um parâmetro definido como dado de entrada do modelo (*Min_transp*) e é uma regra do negócio da empresa. O objetivo desse parâmetro é evitar que a LogísticaSA dependa de poucos fornecedores para realizar todas as suas rotas.

Caso a empresa não tenha a intenção de restringir o número mínimo de transportadoras, basta que o parâmetro possua o valor zero ou um, pois um é o número mínimo de transportadoras necessárias para atender à demanda da empresa, em um cenário que haja alguma transportadora com essa capacidade.

Por um lado, comprehende-se que quanto maior o contrato de rotas de um fornecedor, maior é o poder de negociação por parte da empresa para reduzir os custos e isso deve ser levado em

consideração. Quando um fornecedor recebe mais rotas, existe uma possibilidade maior de realizar **operações casadas**, que reduzem o custo total do transporte e torna a operação mais eficiente.

Por outro lado, depender de poucas empresas para realizar todos os transportes é um risco de negócio muito alto, pois a empresa possui menos flexibilidade para trocar fornecedores e o poder de barganha dos fornecedores também aumenta. Por isso, a LogísticaSA buscou resolver a questão da dependência de poucos fornecedores por meio do parâmetro *Min_transp*. Cabe ressaltar que este parâmetro pode ser alterado facilmente e é possível realizar análises de sensibilidade entre o valor do parâmetro e o resultado da função objetivo.

A Tabela 8 ilustra um exemplo fictício no qual existem dez transportadoras habilitadas pela LogísticaSA e todas possuem capacidade individual de atender à demanda da empresa.

Tabela 8 - Exemplo de *Min_transp*

| Cenário | <i>Min_transp</i> | Número de Transportadoras selecionadas pelo modelo | Função Objetivo |
|---------|-------------------|--|-----------------|
| | | | Custo (R\$) |
| I | 1 | 3 | 300 |
| II | 5 | 5 | 350 |

Fonte: elaboração própria

No cenário I, o número mínimo de transportadoras de 1 não é um fator restritivo para a solução, como foi explicado anteriormente. Neste caso, o modelo selecionou três transportadoras e o custo total foi de R\$ 300. Já no cenário II, existe uma regra de negócio que determina que o número mínimo de transportadoras deve ser cinco e o modelo selecionou cinco transportadoras com um custo total de R\$ 350. Enquanto um cenário prioriza apenas o custo, o outro considera o risco operacional.

A Figura 18 ilustra um modelo de avaliação das forças competitivas em um mercado, que auxiliam a compreensão da importância do conjunto de restrições (7).

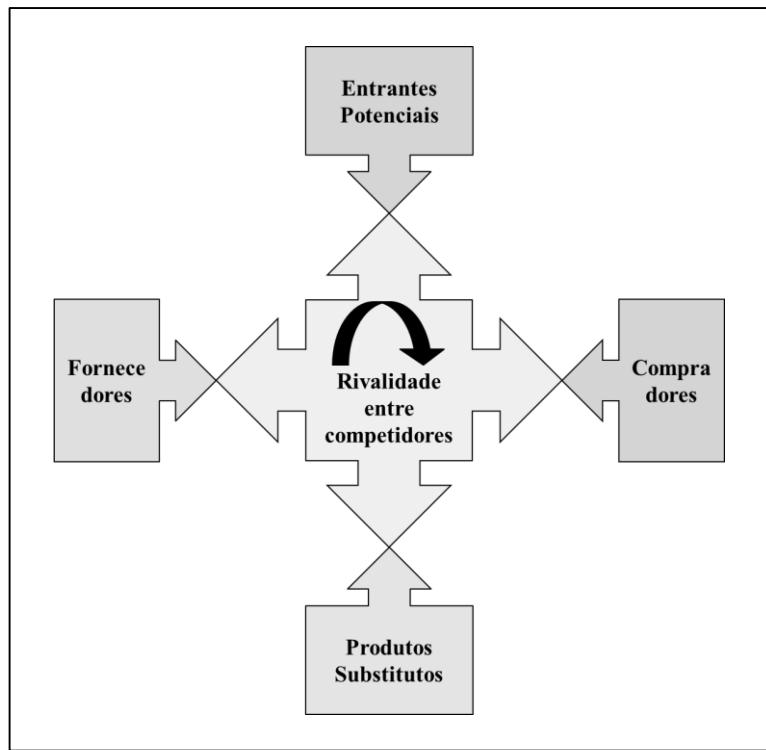


Figura 18 - Forças competitivas do mercado

Fonte: Adaptado de (PORTER, 1999)

Quanto maior o poder de barganha dos fornecedores, menor será a atratividade do setor avaliado. Esse poder aumenta na medida em que o número de fornecedores é reduzido em comparação ao número de compradores potenciais, pois eles concentram maior representatividade do mercado. Já o poder dos compradores é maior quando as compras passam a ser em maior escala, pois eles aumentam sua relevância frente aos fornecedores. Conclui-se que quanto maior o poder de barganha dos compradores, menor a atratividade do mercado. (PORTER, 1999)

Araujo (2014) lista algumas razões para que haja uma maior concentração nos fornecedores de transportes rodoviários:

- A limitação da capacidade instalada de montadoras e fabricantes de caminhões;
- O alto grau de dependência de motoristas autônomos do setor, com uma frota envelhecida e sucateada;
- Falta de investimento em rodovias;
- Restrições legais de operação do segmento.

Ainda assim, existirão casos nos quais a LogísticaSA irá lidar com fornecedores muito poderosos. Para esses casos, existem outras estratégias recomendadas que devem ser gerenciadas pela equipe de compras da empresa (MARINHO *et al.*, 2014):

- Padronizar as compras com estes fornecedores, fazendo com que novas empresas possam atuar no mesmo segmento;
- Estimular que novos fornecedores atuem nas regiões de maior concentração;
- Firmar contratos de longo prazo que estabeleçam custos menores e que sejam vantajosos para ambas as partes.

Os conjuntos de restrições (8) e (9) relacionam as variáveis TRO_{it} com as variáveis V_{ijtp} . O conjunto de restrições (8) define que a variável TRO para uma transportadora t e origem i deve ser menor ou igual à soma de todos os volumes transportados por esta transportadora em qualquer rota em origem em i , de qualquer produto. Com isso, garante-se que caso uma transportadora não possua nenhum volume alocado partindo daquela determinada origem, a variável TRO assumirá valor zero.

Já o conjunto de restrições (9) garante que sempre que existir algum volume V_{ijtp} positivo de uma transportadora t partindo da origem i , a variável TRO_{it} , sendo binária, deverá assumir o valor de 1 para satisfazer as inequações.

Os conjuntos de restrições (10) e (11) relacionam as variáveis TRD_{jt} com as variáveis V_{ijtp} , de forma análoga aos conjuntos de restrições (8) e (9), alterando origens por destinos. A diferença entre os dois conjuntos de variáveis é que um relaciona-se com as origens (TRD) e o outro com os destinos (TRD).

O conjunto de restrições (12) delimita um número máximo de transportadoras que podem operar em uma origem específica a partir da relação entre a soma das variáveis TRO_{it} e o parâmetro $Max_Transp_O_i$.

Caso não houvesse restrições de número máximo de transportadoras que pudessem realizar rotas a partir de uma determinada origem i , a solução ótima poderia, em última instância, alocar todas as T transportadoras habilitadas pela empresa para trabalhar em um mesmo local.

Todavia, por mais que o modelo tenha o objetivo de redução de custo de transporte, quanto maior o número de transportadoras operando em uma mesma origem, maior a complexidade da

operação e de sua gestão, o que pode resultar em maior tempo de espera de caminhões, acarretando em aumento de custos.

Existem alguns benefícios vinculados à redução do número de fornecedores que atuam em uma região, como apontado por MARINHO *et al.* (2014):

- **Foco do gerenciamento na qualidade:** com menos fornecedores, a equipe pode se dedicar mais a assuntos relativos à qualidade do que a atividades burocráticas;
- **Redução da variabilidade:** menos fornecedores significa menos variabilidade de processos internos e de complexidade, o que também reduz custo e tempo de carga e descarga;
- **Redução de custos:** é possível reduzir custos com menos fornecedores, ao focar-se na parceria de longo prazo e também aos custos da não qualidade;
- **Estabelecimento de parcerias em regiões.**

A Figura 19 ilustra um caso no qual n transportadoras possuem rotas com origem em um mesmo ponto i .

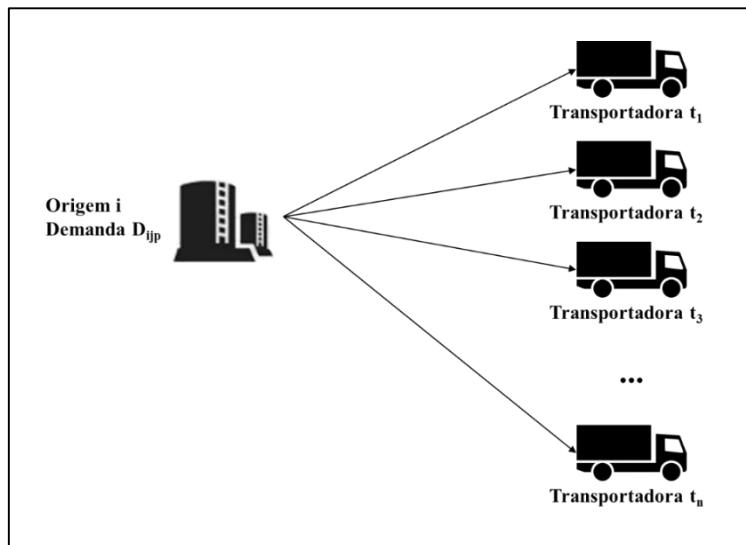


Figura 19 - Ilustração de $Max_Transp_O_i$

Fonte: elaboração própria

No caso hipotético de n ser igual a 1, os funcionários da origem i já sabem como são os procedimentos daquela determinada transportadora, e já conhecem os principais motoristas, enquanto que a própria transportadora possui maior familiaridade com aquela origem, seus procedimentos, sistemas e funcionários. Dessa forma, o tempo de carga do caminhão é reduzido, o que reduz o tempo que ele fica parado e, por consequência, reduz os custos das

transportadoras e agiliza o transporte. À medida em que o número n vai crescendo, essa agilidade vai diminuindo.

Tendo em vista essa condição, e em busca de redução do tempo de carga dos caminhões, a LogísticaSA determina o número máximo de transportadoras que podem realizar rotas partindo de uma origem i , representado por $Max_Transp_O_i$. Este caso poderia ser representado por limitar o número n no exemplo anterior.

O parâmetro $Max_Transp_O_i$ é definido para cada origem i , e não como um parâmetro único, pois cada origem possui características próprias, tais como tamanho, localização, infraestrutura e número de funcionários. Assim, cabe aos responsáveis da área de planejamento da LogísticaSA definir e alterar esses parâmetros de acordo com as regras do negócio.

O conjunto de restrições (13) é análogo ao conjunto de restrições (12), porém relaciona as variáveis TRD_{jt} com o parâmetro $Max_Transp_D_j$.

Por fim, os conjuntos de restrições (14) e (15) definem o domínio das variáveis do modelo.

4.3 Exemplos Simplificados

Com o objetivo de validação do modelo, foram realizados diversos testes em conjuntos reduzidos de dados. Em cada teste iterativo verificou-se se a solução apresentada pela resolução do modelo estava aderente aos valores esperados e, assim, foi possível aprimorar o modelo. Todos os testes foram realizados com o auxílio do software CPLEX 12.7.1 e do Microsoft Excel 2013.

Na primeira iteração foi resolvido um problema com três origens, três destinos, três transportadoras e apenas um único produto. Também foram desconsiderados os conjuntos de restrições (8, 9, 10, 11, 12 e 13), pois o objetivo principal do teste era validar a alocação de rotas que respeitasse as capacidades das transportadoras e cumprisse a demanda.

Os dados relativos ao primeiro teste são apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11.

Tabela 9 - Tabela de capacidades (Teste 1)

| transportadora | $K(t)$ |
|-----------------------|--------------------------|
| 1 | 700 |
| 2 | 200 |
| 3 | 200 |

Fonte: elaboração própria

Tabela 10 - Tabela de demanda (Teste 1)

| $D(i,j)$ | destino | | |
|----------------------------|----------------|-----|-----|
| | origem | 1 | 2 |
| 1 | 200 | 100 | 50 |
| 2 | 50 | 100 | 200 |
| 3 | 50 | 200 | 100 |

Fonte: elaboração própria

Tabela 11 - Tabela de custos (Teste 1)

| Origem | Destino | Transportadora | $C(i,j,t)$ |
|---------------|----------------|-----------------------|------------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 10 |
| 1 | 1 | 2 | 20 |
| 1 | 1 | 3 | 30 |
| 1 | 2 | 1 | 10 |
| 1 | 2 | 2 | 20 |
| 1 | 2 | 3 | 30 |
| 1 | 3 | 1 | 10 |
| 1 | 3 | 2 | 20 |
| 1 | 3 | 3 | 30 |
| 2 | 1 | 1 | 30 |
| 2 | 1 | 2 | 10 |
| 2 | 1 | 3 | 20 |
| 2 | 2 | 1 | 30 |
| 2 | 2 | 2 | 10 |
| 2 | 2 | 3 | 20 |
| 2 | 3 | 1 | 30 |
| 2 | 3 | 2 | 10 |
| 2 | 3 | 3 | 20 |
| 3 | 1 | 1 | 20 |
| 3 | 1 | 2 | 30 |
| 3 | 1 | 3 | 10 |
| 3 | 2 | 1 | 20 |
| 3 | 2 | 2 | 30 |
| 3 | 2 | 3 | 10 |
| 3 | 3 | 1 | 20 |

| | | | |
|---|---|---|----|
| 3 | 3 | 2 | 30 |
| 3 | 3 | 3 | 10 |

Fonte: elaboração própria

Os parâmetros Y foram considerados como 1, ou seja, todas as transportadoras estavam habilitadas para realizar todas as rotas.

A resolução deste teste, com trinta variáveis e quarenta e seis restrições, resultou em uma função objetivo com valor de quinze mil reais. Os fluxos com volume maior que zero são apresentados na Tabela 12. O esquema representativo da solução é ilustrado na Figura 20.

Tabela 12 - Resultados (Teste 1)

| Origem | Destino | Transportadora | $C(i,j,t)$ | $V(i,j,t)$ |
|--------|---------|----------------|------------|------------|
| 1 | 1 | 1 | 10 | 200 |
| 3 | 2 | 1 | 20 | 200 |
| 2 | 3 | 3 | 20 | 150 |
| 1 | 2 | 1 | 10 | 100 |
| 2 | 2 | 2 | 10 | 100 |
| 1 | 3 | 1 | 10 | 50 |
| 2 | 1 | 2 | 10 | 50 |
| 2 | 3 | 2 | 10 | 50 |
| 3 | 1 | 1 | 20 | 50 |
| 3 | 3 | 1 | 20 | 50 |
| 3 | 3 | 3 | 10 | 50 |

Fonte: elaboração própria

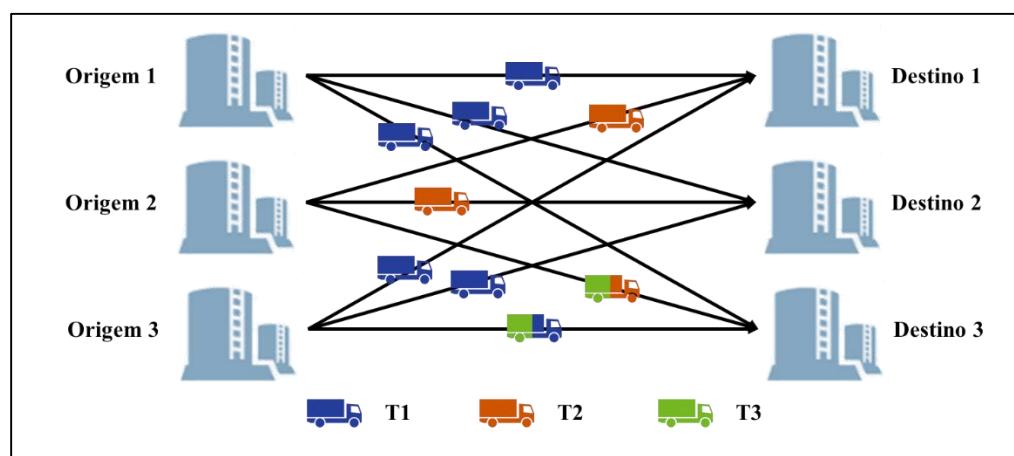


Figura 20 - Ilustração dos resultados (Teste 1)

Fonte: elaboração própria

A partir dos resultados do primeiro teste, verificou-se a eficácia das restrições testadas, e a resolução do modelo gerou a alocação de transportadoras de modo a respeitar as capacidades e atender a demanda.

Em seguida, testou-se a validade do conjunto de restrições (8), (9), (10) e (11), que correlacionam variáveis de decisão, e certificou-se que estavam funcionando corretamente. Testou-se então o comportamento do modelo ao limitar o número mínimo de transportadoras contratadas e o número máximo de transportadoras permitidas em uma origem ou destino.

Esse teste auxiliou o amadurecimento da modelagem em relação à necessidade de uma transportadora fictícia para receber as demandas extras não alocadas por contrato. Por fim, foi realizado o quarto teste, utilizando a modelagem completa.

Para fins didáticos de explicação do modelo, o último desses testes será apresentado em detalhe nessa seção, já com o modelo completo, contendo todas as restrições, porém com um tamanho menor que o real. Foram utilizados dez pontos de origem, dez pontos de destino, cinco transportadoras e duas categorias de produto. Os parâmetros e resultados completos do teste podem ser consultados no *Apêndice A*.

O número mínimo de fornecedoras contratadas (*Min_transp*) utilizado foi de três. Já os parâmetros *Max_Transp_O* e *Max_Transp_D*, que definem o número máximo de transportadoras que podem atuar em um ponto de origem ou destino, foram todos inicializados como três. Durante os testes, os resultados obtidos estiveram sempre consistentes.

Neste exemplo, o modelo selecionou todas as cinco transportadoras para executar ao menos uma rota, respeitando assim, a restrição do número mínimo de três transportadoras (Tabela 13).

Tabela 13 - Resultado do teste simplificado (variável T)

| T _t | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|
| t=1 | t=2 | t=3 | t=4 | t=5 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Fonte: elaboração própria

Os resultados das variáveis *TRO* e *TRD* exibidos nas Tabelas 14 e 15 evidenciam como o modelo respeitou as restrições do número máximo de três transportadoras por origem ou destino. Para facilitar a interpretação dos dados, foram preenchidos apenas os campos com valor

igual a 1. Dessa forma, é possível identificar que nenhuma das linhas possui mais de três valores preenchidos.

Tabela 14 - Resultado do teste simplificado (variável TRO)

| origem | TRO _{it} | | | | |
|-----------|-------------------|---|---|---|---|
| | transportadora | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 8 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 9 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 10 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |

Fonte: elaboração própria

Tabela 15 - Resultado do teste simplificado (variável TRD)

| destino | TRD _{jt} | | | | |
|-----------|-------------------|---|---|---|---|
| | transportadora | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 8 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 10 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |

Fonte: elaboração própria

Além disso, pode-se validar que as variáveis TRO e TRD estavam sendo inicializadas corretamente quando comparados os seus valores com os valores de volume (V_{ijtp}). Sempre que o volume era maior que zero, o valor das variáveis auxiliares era um. Essa análise é feita comparando os dados anteriores com as Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 - Resultado do teste simplificado por origem e transportadora

| origem | V _{ijtp} | | | | |
|--------|-------------------|----|----|----|----|
| | transportadora | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 1 | 12 | 0 | 2 | 19 | 0 |
| 2 | 17 | 0 | 0 | 14 | 24 |
| 3 | 0 | 4 | 6 | 1 | 0 |
| 4 | 15 | 0 | 24 | 16 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 14 | 9 | 23 |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 11 | 0 |
| 7 | 11 | 0 | 0 | 18 | 18 |
| 8 | 10 | 0 | 0 | 14 | 5 |
| 9 | 11 | 10 | 0 | 7 | 0 |
| 10 | 2 | 0 | 9 | 0 | 9 |

Fonte: elaboração própria

Tabela 17 - Resultado do teste simplificado por destino e transportadora

| destino | V _{ijtp} | | | | |
|---------|-------------------|---|----|----|----|
| | transportadora | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 1 | 10 | 0 | 0 | 20 | 12 |
| 2 | 10 | 0 | 8 | 9 | 0 |
| 3 | 10 | 0 | 0 | 16 | 15 |
| 4 | 0 | 4 | 4 | 0 | 8 |
| 5 | 7 | 0 | 0 | 1 | 15 |
| 6 | 0 | 0 | 7 | 19 | 11 |
| 7 | 7 | 0 | 12 | 0 | 10 |
| 8 | 0 | 0 | 16 | 9 | 8 |
| 9 | 35 | 9 | 0 | 22 | 0 |
| 10 | 0 | 1 | 8 | 13 | 0 |

Fonte: elaboração própria

Também foram realizados testes para identificar como as restrições de número máximo de transportadoras em um ponto de origem ou destino afetariam o resultado final do modelo.

Para a tanto, foi considerado que este parâmetro seria igual dentre as origens e destinos. A partir dos dados da Tabela 18, verifica-se que quando o parâmetro *Max_Transp* é reduzido, o valor da função objetivo aumenta. Como o objetivo do modelo é minimizar o custo de transportes da LogísticaSA, o custo é reduzido se o parâmetro *Max_Transp* for maior, como o esperado

durante a modelagem. Isso se deve ao fato de que quanto mais restritivo for o problema, menor o conjunto de soluções viáveis dentro da qual busca-se a solução ótima.

Entretanto, percebe-se que quando o parâmetro é alterado de quatro para cinco, não há alteração na função objetivo. Desse modo, infere-se que a solução ótima do modelo é a mesma nos dois casos, ou seja, mesmo quando o modelo permitiu que fossem escolhidas cinco transportadoras por origem e destino, a solução ótima já seria com um valor máximo de quatro.

Tabela 18 - Relação entre *Max_Transp* e a função objetivo

| Max_Transp | Função Objetivo |
|-------------------|------------------------|
| 2 | 1.591 |
| 3 | 1.371 |
| 4 | 1.319 |
| 5 | 1.319 |

Fonte: elaboração própria

Também foram realizados testes para entender como os parâmetros de entrada modificavam o resultado do modelo. O modelo se comportou como o esperado, de forma que quando uma transportadora tinha seu custo aumentado, o modelo optava pela contratação das outras transportadoras. O contrário ocorria quando foram reduzidos os custos.

Quando a capacidade de uma transportadora de baixo custo, que já estava totalmente alocada, era aumentada, a resolução do modelo tratava de alocar mais demanda à essa transportadora. Por outro lado, aumentar a capacidade de uma transportadora de maior custo e que possuía capacidade ociosa não impactou o resultado do teste.

Dessa forma, concluiu-se que o modelo estava pronto para ser testado com o tamanho real do problema.

5 LEVANTAMENTO DE DADOS

O objetivo principal deste capítulo é apresentar os parâmetros do modelo e descrever sucintamente o modo como foram coletados.

Isso porque em qualquer problema de modelagem matemática, a etapa de obtenção de dados é uma das mais importantes, pois eles são a fundação do problema. Um mesmo modelo rodando com dados iniciais distintos irá gerar resultados completamente divergentes. Portanto, é importante que esta etapa seja conduzida com cuidado, especialmente para que o objetivo do trabalho possa ser concluído com êxito.

A obtenção de dados foi realizada em reuniões com a equipe de planejamento da LogísticaSA, após algumas entrevistas para entendimento da operação e do problema apresentado. Os dados foram fornecidos em planilhas eletrônicas no formato *Microsoft Excel (xlsx)* e apresentados durante as reuniões. Os dados necessários que não existiam previamente no sistema da empresa em planilhas foram obtidos e definidos nas próprias reuniões com os responsáveis pela operação da área.

Os dados utilizados neste trabalho refletem os parâmetros reais da empresa, porém não são os dados reais. Utilizou-se um índice deflator a pedido da empresa, como modo de proteção de suas informações operacionais. Dessa forma, não se compromete a assertividade e eficiência do modelo e, ao mesmo tempo, garante-se a segurança dos dados da LogísticaSA.

A Figura 21 ilustra os parâmetros de entrada para o modelo, os quais foram divididos em três categorias principais: dados das transportadoras, dados classificados como do mercado e dados de restrições operacionais.

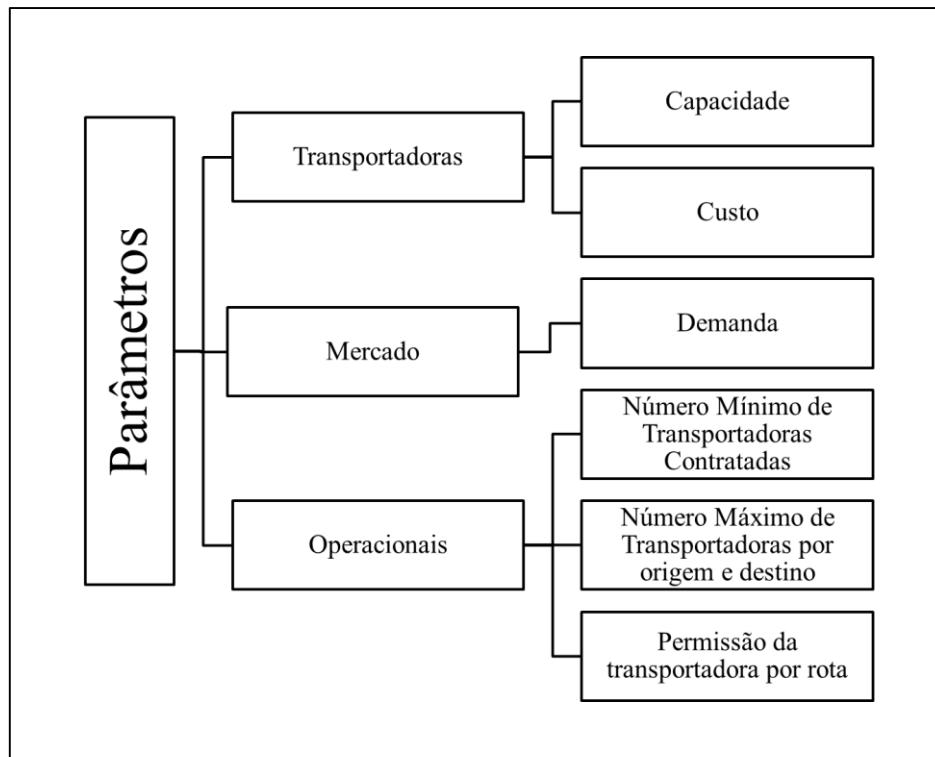


Figura 21 - Ilustração dos parâmetros obtidos

Fonte: elaboração própria

5.1 Dados das Transportadoras

Os dados de entrada das transportadoras são a capacidade (K) e o custo (C).

A capacidade reflete a volumetria (em metros cúbicos) que a transportadora terceirizada se compromete em conseguir transportar de um determinado produto em todas as rotas com a LogísticaSA. Essa capacidade é função da quantidade de veículos e motoristas que cada transportadora possui disponível e também da negociação feita com a empresa e de seu planejamento. Cada transportadora possui uma capacidade distinta para cada produto e esse parâmetro pode mudar a cada mês com a compra ou venda de caminhões.

O custo é o valor (em reais por metro cúbico) que a transportadora terceirizada cobra para transportar um determinado produto em uma determinada rota (origem e destino) para a LogísticaSA.

Ambos parâmetros, de custo e capacidade, são dados definidos em contratos entre a LogísticaSA e as transportadoras terceirizadas habilitadas pela empresa. Dessa forma, a

obtenção dos dados foi feita de forma direta, a partir das planilhas que continham essas informações.

Um exemplo da forma como os dados são obtidos é apresentado nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Exemplo de dados de custo

| Origem (i) | Destino (i) | Produto (p) | Transportadora (t) | Custo (C em R\$ por m ³) |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|--|
| 1 | 7 | 1 | 1 | 3,5 |
| 2 | 8 | 3 | 1 | 2,4 |
| 3 | 9 | 2 | 1 | 2,5 |
| 4 | 10 | 3 | 2 | 2,2 |
| 5 | 11 | 5 | 2 | 1 |
| ... | | | | |

Fonte: elaboração própria

Tabela 20 - Exemplo de dados de capacidade

| Produto (p) | Transportadora (t) | Capacidade (K em m ³) |
|-----------------------|------------------------------|---|
| 1 | 1 | 10 |
| 3 | 1 | 15 |
| 2 | 2 | 20 |
| 3 | 2 | 20 |
| 5 | 3 | 10 |
| ... | | |

Fonte: elaboração própria

Após a obtenção dos dados no formato apresentado, foi necessário um ajuste para que eles pudessem ser lidos pela programação em *Cplex*. O ajuste foi principalmente atribuição de valor 0 de capacidade para rotas não habilitadas às transportadoras e mudança no formato das tabelas para matrizes.

Além disso, um dos principais dados de transportadoras é o número de empresas habilitadas a executar rotas pela empresa. Quanto maior o número de empresas, maior a dimensão do problema (pelo índice *t*).

5.2 Dados do Mercado

O principal dado de entrada dentro da categoria de “Mercado” é a demanda. Este parâmetro representa a necessidade de um determinado produto (p) que precisa ser transportado na rota de uma origem (i) para um destino (j). Como explicado anteriormente, os dados de previsão de demanda são definidos nas etapas anteriores da área de planejamento de transportes, sendo disponibilizados na atividade de roteirização.

A partir dos dados de demanda, podem-se determinar as dimensões dos índices de origens, destinos e produtos do modelo. Quando maior a quantidade de rotas e produtos diferentes, maior a complexidade do problema.

A Tabela 21 é um exemplo de como os dados obtidos são estruturados. A principal diferença é que origens, destinos e produtos não costumam estar em códigos, mas sim com a especificação da cidade. Por exemplo, a origem um representa Rio de Janeiro e o destino sete representa São Paulo. Para que os dados sejam adaptados para o modelo, foi necessário traduzir os nomes para códigos que fossem coerentes com os outros parâmetros definidos.

Tabela 21 - Exemplo da planilha de demanda

| Origem (i) | Destino (i) | Produto (p) | Demand (D em m ³) |
|---------------|----------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | 7 | 1 | 10 |
| 2 | 8 | 3 | 15 |
| 3 | 9 | 2 | 18 |
| 4 | 10 | 3 | 20 |
| 5 | 11 | 5 | 30 |
| ... | | | |

Fonte: elaboração própria

Foi necessário um tratamento dos dados de demanda para que estivessem em um formato adequado ao *Cplex*. Quando não havia demanda cadastrada para uma determinada rota ou produto, foi incluído o valor zero na matriz. Um exemplo do novo formato da matriz de demanda é exibido na Tabela 22.

Tabela 22 - Exemplo de dados de demanda transformados

| i | j | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 |
|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 7 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 8 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 9 | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 10 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 | 0 |

Fonte: elaboração própria

5.3 Dados Operacionais

Os três principais parâmetros operacionais são: número mínimo de transportadoras contratadas, número máximo de transportadoras operantes em uma origem ou destino, e a habilitação de uma determinada rota a uma determinada transportadora.

O número mínimo de transportadoras contratadas não era um dado existente nos dados das planilhas da LogísticaSA, mas era apenas utilizado informalmente pela área de planejamento. Esse parâmetro não é o mesmo em todos os períodos, podendo sofrer variações. Para efeito dos testes do modelo, foi utilizado o valor quatro, definido em reuniões junto à equipe de operação.

O número máximo de transportadoras operantes em uma origem ou destino também não é um dado praticado pela empresa e tabelado atualmente. Ele surgiu como uma possibilidade dentro das restrições do modelo, de modo a otimizar a operação da empresa.

Para efeito dos testes do modelo foi utilizado o mesmo valor dez para todos os parâmetros TRD_j e TRO_i , porém esses parâmetros são facilmente ajustáveis em uma planilha eletrônica *Microsoft Excel*, e a LogísticaSA pode optar por alterá-los futuramente. A equipe de operação justificou o número dez para os testes, por ser próximo ao praticado atualmente pela empresa.

O parâmetro binário Y determina se uma transportadora t está habilitada (ou não) para fazer a rota de uma origem i para um destino j . Este parâmetro também é facilmente ajustável, bastando substituir um valor 1 por 0 para que o modelo pare de alocar uma determinada rota para a transportadora definida. Dessa forma, facilita-se o trabalho dos analistas da área que hoje excluem manualmente as transportadoras.

O próximo capítulo irá apresentar os resultados obtidos a partir da execução do modelo proposto no capítulo quatro, com os dados apresentados neste capítulo cinco. Também serão feitas análises de sensibilidade com o modelo.

6 OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados computacionais gerados pela utilização modelo de programação linear inteira mista proposto anteriormente para resolver o problema de alocação de rotas a fornecedores. Além disso, também foram realizadas análises de sensibilidade para identificar como o modelo se comporta quando seus principais parâmetros de entrada variam.

Os números apresentados na sequência deste trabalho foram multiplicados por um valor constante, definido arbitrariamente pelo autor, a pedido da empresa LogísticaSA a fim de respeitar o sigilo de dados. Reforça-se, ainda que, mesmo com a multiplicação dos dados por um valor constante, o resultado obtido com os cenários testados é análogo à situação real da empresa, não comprometendo, assim, a validade das análises.

Assim como citado anteriormente na seção de testes, o *software* utilizado para a implantação do modelo e obtenção dos resultados foi o CPLEX com o auxílio da interface OPL na versão 12.7.1.0. Foi utilizado o computador notebook da marca *Lenovo*, marca E431, com processador *Intel® Core™ I5-3320M* de 2,6 GHz e 8 GB de memória RAM instalada. O sistema operacional instalado utilizado foi o *Windows 7 Professional 64 Bits*.

6.1 Resultados Computacionais

O modelo de programação linear inteira mista (PLIM) apresentado possui 567.288 variáveis, sendo destas 564.480 variáveis reais e 2.808 variáveis binárias. Todas as variáveis são não-negativas, como definido nos conjuntos de restrições (14) e (15). As Tabelas 23 e 24 detalham as variáveis.

Tabela 23 - Índices do modelo

| índice | significado | dimensão |
|--------|----------------|----------|
| i | origem | 60 |
| j | destino | 56 |
| t | transportadora | 24 |
| p | produto | 7 |

Fonte: elaboração própria

Tabela 24 - Dimensão do modelo

| variável | domínio | dimensão | quantidade |
|-----------------|----------------|--------------------------------|---|
| V | real | $i \times j \times t \times p$ | $60 \times 56 \times 24 \times 7 = 564.480$ |
| T | binária | t | 24 |
| TRO | binária | $i \times t$ | $60 \times 24 = 1.440$ |
| TRD | binária | $j \times t$ | $56 \times 24 = 1.344$ |
| Total | | | 567.288 |

Fonte: elaboração própria

Além da função objetivo (1), o modelo apresenta outros quatorze conjuntos de restrições, que se desdobram em cento e dez mil e sessenta e uma restrições (ver Tabela 25).

Tabela 25 - Restrições do modelo

| Conjunto de restrições | Repetições (\forall) | Quantidade de restrições |
|-------------------------------|--|---------------------------------|
| 1 | <i>objetivo</i> | - |
| 2 | i, j, p | 23.520 |
| 3 | t, p | 168 |
| 4 | i, j, t | 80.640 |
| 5 | t | 24 |
| 6 | t | 24 |
| 7 | - | 1 |
| 8 | i, t | 1.440 |
| 9 | i, t | 1.440 |
| 10 | j, t | 1.344 |
| 11 | j, t | 1.344 |
| 12 | i | 60 |
| 13 | j | 56 |
| 14 | <i>domínio</i> | - |
| 15 | <i>domínio</i> | - |
| Total | | 110.061 |

Fonte: elaboração própria

Neste cenário, o modelo foi solucionado com o suporte do *software* CPLEX, e o tempo computacional necessário para o cenário ótimo foi de setenta e cinco segundos. Entende-se que esse tempo adequa-se bem ao contexto da área e atende às necessidades da empresa, pois é uma decisão de caráter tático, realizada uma ou mais vezes ao mês.

O resultado da função objetivo foi de R\$ 56.670.686,00 para o custo de transportes com a alocação de todas as rotas à alguma transportadora. A Tabela 26 exibe os resultados consolidados por produto e por transportadora do modelo.

Tabela 26 - Volume transportado por transportadora

| Produto | Transportadora | | | | | | | | | | | | | Total Geral (m ³) | | | | | | |
|--|----------------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------------|------------|-----------|----------|------------|------------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 16 | 17 | 18 | 21 | 22 | 23 | 24* | |
| 1 | 44 | 44 | 44 | 20 | 14 | 10 | 34 | 32 | 2 | 8 | 4 | 12 | 8 | 22 | 36 | 2 | 2 | 147 | 485 | |
| 2 | 44 | 44 | 44 | 20 | 14 | 10 | 34 | 32 | 2 | 8 | 4 | 12 | 8 | 22 | 36 | 2 | 2 | 87 | 425 | |
| 3 | 115 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 88 | |
| 4 | 44 | 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | 420 | |
| 5 | 44 | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | 180 | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 150 | |
| 7 | 44 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 25 | |
| Total Geral (m³) | 335 | 120 | 88 | 282 | 28 | 20 | 110 | 123 | 4 | 32 | 21 | 63 | 45 | 24 | 103 | 72 | 6 | 100 | 234 | 1.810 |

Fonte: elaboração própria

Como mencionado no Capítulo 4, transportadora 24 é uma transportadora fictícia que absorve as rotas que não puderam ser alocadas nos contratos já existentes com as demais vinte e três

transportadoras. O custo associado à essa transportadora é considerado o dobro do maior valor praticado pelas outras transportadoras nas rotas similares, de modo que o modelo deveria evitar contratá-la, pelo seu objetivo de minimização de custos.

No caso considerado, foram alocados 234 m³ para a transportadora 24, que representam 12,9 % do volume total alocado entre todas as transportadoras. A transportadora fictícia recebeu apenas os produtos 1 e 2.

As Tabelas 26 e 27 apresentam os principais resultados do modelo. Percebe-se que as principais transportadoras contratadas foram as de número 1 e 5, seguidas pelas de número 24* (fictícia), 10, 2, 8, 18 e 23.

A coluna transportadora indica qual a empresa terceirizada que teve as rotas alocadas. A coluna volume transportado indica o valor, em metros cúbicos, de todos os produtos que serão transportados pela fornecedora, de acordo com o número de rotas alocadas na terceira coluna. A capacidade indicada na quarta coluna, em metros cúbicos, representa o volume máximo que poderia ser transportado por aquela empresa de acordo com o contrato, enquanto que a última coluna indica qual o percentual da capacidade que foi utilizado. Ou seja, se aquela empresa está operando no limite de seu contrato ou se possui margem para novas rotas.

Tabela 27 - Capacidade utilizada por transportadora

| Transportadora | Volume Transportado (m ³) | Número de rotas alocadas | Capacidade (m ³) | % da capacidade utilizada |
|----------------|---------------------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 | 335 | 44 | 384 | 87,2% |
| 5 | 282 | 36 | 282 | 100,0% |
| 24* | 234 | 32 | - | - |
| 10 | 123 | 23 | 356 | 34,6% |
| 2 | 120 | 19 | 502 | 23,9% |
| 8 | 110 | 18 | 322 | 34,2% |
| 18 | 103 | 17 | 208 | 49,5% |
| 23 | 100 | 14 | 108 | 92,6% |
| 3 | 88 | 12 | 336 | 26,2% |
| 21 | 72 | 11 | 322 | 22,4% |
| 14 | 63 | 9 | 112 | 56,3% |
| 16 | 45 | 7 | 82 | 54,9% |
| 12 | 32 | 7 | 228 | 14,0% |
| 6 | 28 | 6 | 172 | 16,3% |
| 17 | 24 | 5 | 86 | 27,9% |
| 13 | 21 | 5 | 190 | 11,1% |

| | | | | |
|----|----|---|-----|-------|
| 7 | 20 | 5 | 180 | 11,1% |
| 22 | 6 | 3 | 108 | 5,6% |
| 11 | 4 | 2 | 38 | 10,5% |
| 4 | 0 | 0 | 216 | 0,0% |
| 9 | 0 | 0 | 144 | 0,0% |
| 15 | 0 | 0 | 50 | 0,0% |
| 19 | 0 | 0 | 38 | 0,0% |
| 20 | 0 | 0 | 24 | 0,0% |

Fonte: elaboração própria

As transportadoras 1, 23 e 5 tiveram sua capacidade quase totalmente ocupada, com os valores de 87,2%, 92,6% e 100%, respectivamente. Esses valores mostram que existe uma oportunidade de renegociação de contrato por parte da LogísticaSA, e que faz sentido expandir a parceria com essas empresas.

Das 24 transportadoras cadastradas no modelo, apenas 19 foram selecionadas no modelo final. As transportadoras 4, 9, 15, 19 e 20 não tiveram nenhuma rota alocada e não seriam contratadas no período em questão. Essa informação também pode ser útil em uma eventual renegociação de contrato, seja pela disponibilização de novas rotas por essas empresas ou pela redução de custos, para que sejam competitivas e estrategicamente favoráveis frente às outras transportadoras.

Os gráficos das Figuras 22 e 23 demonstram qual foi a distribuição de rotas entre as transportadoras, em volume e em quantidade absoluta de rotas, ordenadas por ordem decrescente. As transportadoras 1 e 5 juntas representam 34% do volume total alocado no período, de 1.810 metros cúbicos e aproximadamente 29% da quantidade absoluta de rotas, de 275.

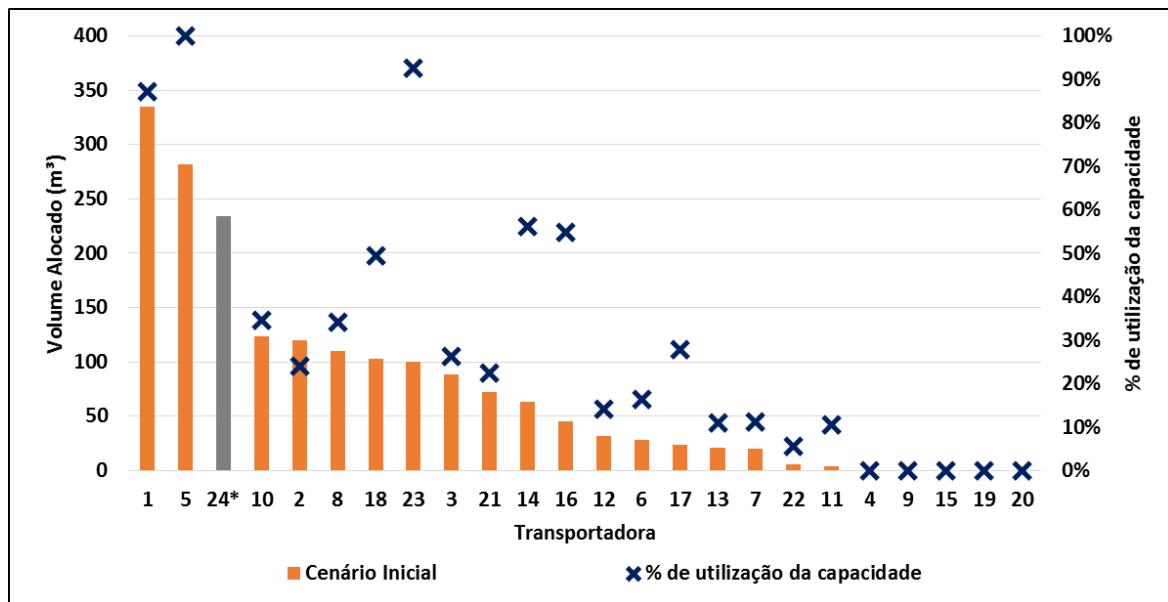


Figura 22 - Gráfico de volume transportado e capacidade por transportadora

Fonte: elaboração própria

É importante para a LogísticaSA considerar sempre os dados de volume alocado e percentual da capacidade utilizada por transportadora de forma integrada. Ambos os dados estão relacionados, porém fornecem informações complementares, que auxiliam a empresa a entender como está a situação de seus contratos e de sua operação como um todo.

Uma empresa que recorrentemente apresente um percentual alto de utilização de sua capacidade ou de máxima utilização representa uma possibilidade de revisão de contrato para que se aumente o volume máximo pré-estabelecido.

Por outro lado, uma empresa que possui um percentual baixo de utilização de capacidade pode significar que existem no mercado outras transportadoras realizando as mesmas rotas por um custo mais baixo. Assim, a LogísticaSA pode sugerir que essas transportadoras com maior folga de capacidade passem a oferecer novas rotas ou atuar com outros produtos.

Para decidir quais são as melhores rotas e produtos que podem ser contratados com as transportadoras menos aproveitadas, podem ser consideradas as rotas que consistentemente aparecem dentre aquelas alocadas à transportadora fictícia, ou seja, aquelas que possuem menos oferta e acabam tendo um custo médio maior.

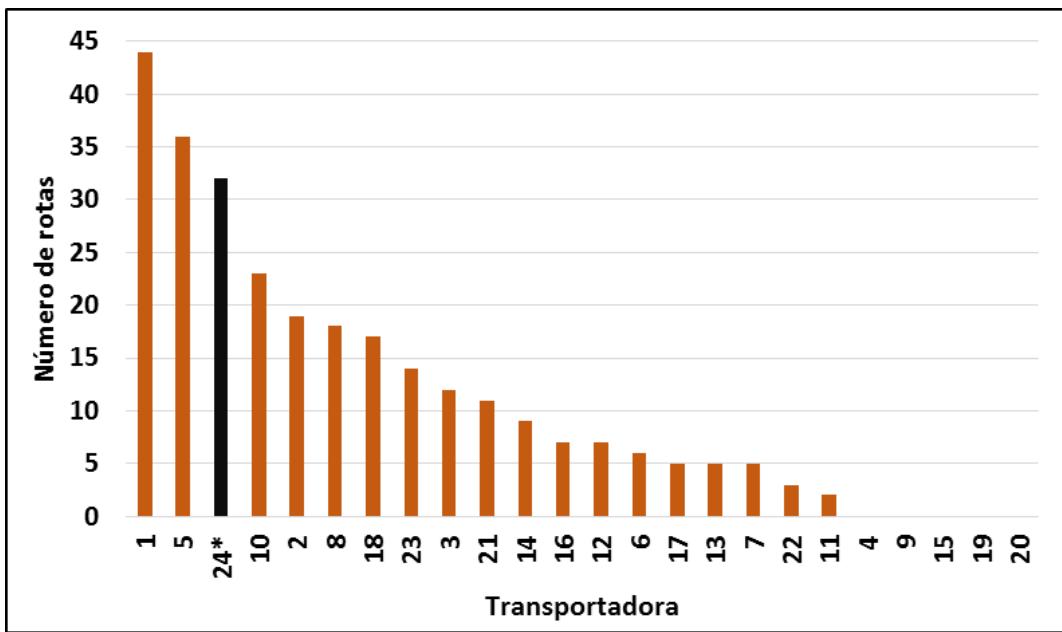


Figura 23 - Número de rotas alocadas por transportadora

Fonte: elaboração própria

6.2 Comparação com a Situação Atual

O custo considerado como base para comparação de resultados com o modelo descrito, em um mês com os mesmos dados é de cinquenta e oito milhões de reais. Dessa forma, com a função objetivo de R\$ 56.670.686, obtém-se uma redução de aproximadamente 2,29% dos custos de transportes para a empresa e que anualmente poderia passar de dez milhões de reais de valor agregado, dependendo de sua implantação.

Entende-se que o custo obtido ainda poderia ser reduzido, pois os valores utilizados nas rotas alocadas à transportadoras fictícias foram superestimados. Isso significa que, na prática, quando a LogísticaSA for renegociar essas rotas com as transportadoras, ela conseguirá preços mais baixos do que o estimado no modelo. Na média, rotas contratadas individualmente possuem valor 40% maior do que o preço original de mercado, enquanto que o parâmetro de custo do modelo era 100% maior.

Além disso, o resultado foi obtido após setenta e cinco segundos de execução do modelo no CPLEX. Isso significa uma redução de complexidade do trabalho da área responsável da LogísticaSA, pois atualmente essa atividade leva em torno de três dias para ser finalizada.

No mês considerado como base de comparação, todas as vinte e três transportadoras mencionadas foram contratadas com a alocação de alguma rota. Contudo, no modelo, apenas

dezoito foram selecionadas. Dessa forma, também é possível reduzir a complexidade da operação da empresa ou diminuir ainda mais os custos praticados por seus fornecedores.

A resolução do modelo alocou 87% da demanda para transportadoras com contrato e 13% para a transportadora fictícia, que representa a negociação posterior. Esse valor é ligeiramente inferior ao praticado atualmente pela LogísticaSA que, em média, é de 15% de rotas contratadas de forma pontual.

6.3 Análise de Restrições

A partir dos resultados obtidos com o modelo, é possível observar como foi o comportamento e a função de cada uma das restrições no cenário global do problema.

A Tabela 28 apresenta o resultado de demanda e volume transportado por cada um dos sete tipos de produto que a LogísticaSA trabalha. Nota-se que 100% da demanda prevista foi atendida por alguma das transportadoras, evidenciando que a restrição de cumprimento de demanda foi atendida.

Tabela 28 - Cumprimento de Demanda

| Produto | Demand | Volume transportado |
|---------|--------|---------------------|
| 1 | 485 | 485 |
| 2 | 425 | 425 |
| 3 | 420 | 420 |
| 4 | 180 | 180 |
| 5 | 150 | 150 |
| 6 | 25 | 25 |
| 7 | 125 | 125 |

Fonte: elaboração própria

A Tabela 29 apresenta as capacidades de cada transportadora e a sua utilização. Nenhuma transportadora teve mais volume alocado do que sua capacidade contratada permitia, o que evidencia o atendimento à restrição de capacidade do modelo.

A única transportadora que utilizou por completo sua capacidade contratada foi a de número 5. As demais possuem capacidade ociosa que poderia ser contratada em caso de um aumento ou simplesmente alteração do perfil da demanda.

Tabela 29 - Capacidade e utilização por transportadora

| Transportadora | Volume Transportado (m³) | Capacidade (m³) | % da capacidade utilizada |
|-----------------------|--|-----------------------------------|----------------------------------|
| 5 | 282 | 282 | 100,0% |
| 23 | 100 | 108 | 92,6% |
| 1 | 335 | 384 | 87,2% |
| 14 | 63 | 112 | 56,3% |
| 16 | 45 | 82 | 54,9% |
| 18 | 103 | 208 | 49,5% |
| 10 | 123 | 356 | 34,6% |
| 8 | 110 | 322 | 34,2% |
| 17 | 24 | 86 | 27,9% |
| 3 | 88 | 336 | 26,2% |
| 2 | 120 | 502 | 23,9% |
| 21 | 72 | 322 | 22,4% |
| 6 | 28 | 172 | 16,3% |
| 12 | 32 | 228 | 14,0% |
| 7 | 20 | 180 | 11,1% |
| 13 | 21 | 190 | 11,1% |
| 11 | 4 | 38 | 10,5% |
| 22 | 6 | 108 | 5,6% |
| 4 | 0 | 216 | 0,0% |
| 9 | 0 | 144 | 0,0% |
| 15 | 0 | 50 | 0,0% |
| 19 | 0 | 38 | 0,0% |
| 20 | 0 | 24 | 0,0% |

Fonte: elaboração própria

O número mínimo de transportadoras que havia sido acordado para testes com a LogísticaSA era de quatro transportadoras. Ainda assim, nota-se que existem transportadoras que são complementares geograficamente e que não conseguem atender toda a demanda da empresa, espalhada pelo Brasil. Sendo assim, o modelo selecionou dezoito transportadoras (além da fictícia) para atender a demanda. Desse modo, o número mínimo de transportadoras que deveria ser selecionado foi superado.

O número máximo de transportadoras por local de origem e por local de destino definido pela LogísticaSA foi de dez transportadoras.

As Tabelas 30 e 31 exibem a distribuição das vinte e quatro transportadoras (incluindo a fictícia) e suas alocações nos cinquenta e seis locais de destino e sessenta locais de origem. A marcação

de “X” significa que aquela transportadora realiza alguma rota que possui aquela origem como ponto inicial ou aquele determinado destino como ponto final para algum dos produtos alocados.

Percebe-se que apenas o ponto de origem de número 40 atingiu o limite de dez transportadoras e todas respeitaram a restrição do número máximo de transportadoras.

Tabela 30 - Alocação de transportadoras e origens

| Origem | Transportadoras | | | | | | | | | | | | | | N.º de transportadoras | | | | |
|--------|-----------------|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|------------------------|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 16 | 17 | 18 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 1 | X | X | | | | | | X | | | | X | | | | | | | 5 |
| 2 | | | | | | | | X | X | | | | | | | | | | 2 |
| 3 | X | X | | X | | | | | | | X | | | | | | | | 4 |
| 4 | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | 1 |
| 5 | X | | | | | | X | | | | | X | | | | | | | 3 |
| 6 | X | | | | | | | | | | X | | | X | | | | | 3 |
| 7 | | | | | | X | | | X | | | | | X | | | | | 3 |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | 1 |
| 9 | X | | X | | | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| 10 | 9 | X | X | | | | X | | | X | | | X | | | | | | 6 |
| 11 | X | | X | | | X | X | | X | | X | | | X | | | | | 8 |
| 12 | | X | X | | | | X | | | | | | | X | | | | | 5 |
| 13 | X | | | | | X | | | | | | | X | | | | | | 3 |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | 1 |
| 15 | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |
| 16 | | | | | | | | X | | | | | | | X | | | | 2 |
| 17 | X | | | | | | | | | X | | | | X | | | | | 3 |
| 18 | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |
| 19 | | | | | | | | | | | X | | | | X | | | | 2 |
| 20 | | | | | | | | X | | | | | | | | | | | 1 |
| 21 | X | X | | X | | | | | | | X | | | | | X | | | 5 |
| 22 | X | | | | | | | | | | | X | | | | | | | 2 |
| 23 | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |
| 24 | X | | X | | | | | | X | | | X | | X | | | X | | 6 |
| 25 | X | | | | | | | | | | | X | | | X | | | | 3 |
| 26 | | X | X | X | X | | X | | | | | | | | | | X | | 4 |
| 27 | X | X | X | X | | | X | | X | | | | X | | | X | X | | 9 |
| 28 | | X | | | | | | | | X | | | X | | | | X | | 4 |
| 29 | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |
| 30 | X | | X | | | | X | | | X | | | | | X | | X | | 6 |
| 31 | X | X | | | | X | | X | | | X | | X | | | X | X | | 8 |
| 32 | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | 1 |
| 33 | X | | X | | | X | | | X | | | X | | | | | | | 5 |
| 34 | X | X | | | | X | | | | | | | | | | X | X | | 6 |
| 35 | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | 1 |
| 36 | X | X | | | | X | X | X | X | | X | | X | | | | | | 7 |
| 37 | | X | | | X | X | X | X | | | X | | | X | X | X | | | 9 |
| 38 | X | | X | | | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| 39 | | | X | | | | | | | | | | | | | | X | | 2 |
| 40 | X | X | X | X | X | | | | X | | X | | | | X | | X | | 10 |
| 41 | | X | | | X | | | | | | | | X | | | | X | | 4 |
| 42 | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | 1 |
| 43 | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | 1 |
| 44 | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | 1 |
| 45 | | | X | | | | | | | | | | | | | X | | | 2 |
| 46 | | | | | | X | | | | | | | | | | X | | | 2 |
| 47 | | | X | X | | | | | | X | | | X | | | X | | | 5 |
| 48 | | X | X | | | | | | | | X | | | | | | | | 3 |
| 49 | | | | | | | | | | | X | | | | | X | | | 2 |
| 50 | X | | X | | | | | | | | X | | | | | | X | | 3 |
| 51 | | | X | | | | | | | | X | | | | | | | | 2 |
| 52 | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |
| 53 | X | | X | | | | | | | | | X | | | | | | | 3 |
| 54 | X | | X | | | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| 55 | | | X | | | | | | | | X | | | | X | | | | 3 |
| 56 | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | 1 |
| 57 | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | 1 |
| 58 | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | 1 |
| 59 | X | | | | | | | | | | | | | | | X | | | 1 |
| 60 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |

Fonte: elaboração própria

Tabela 31 - Alocação de transportadoras e destinos

| Destino | Transportadoras | | | | | | | | | | | | | | N.º de transportadoras | | | | | |
|---------|-----------------|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|---------------------------|----|----|----|----|---|
| | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 16 | 17 | 18 | 21 | 22 | 23 | 24 | |
| 1 | X | X | | | | | | X | | | | | | | | | | X | 5 | |
| 2 | X | | | | | | | | | | | | | | | | | X | 2 | |
| 3 | | X | X | X | | | | | | | | | | X | | | | | 4 | |
| 4 | X | X | | X | | | | X | | | | | | | | | | | 4 | |
| 5 | X | | X | | | | | | | | | X | X | | X | | | | | 5 |
| 6 | X | | | | | | | | | | | | | | | | | X | 2 | |
| 7 | | X | X | | | | X | | | | | | | | | | | X | 4 | |
| 8 | X | X | | X | | | | | | | | X | | | | | | | 5 | |
| 9 | X | | X | | | | | | | | | | | | | | | | 2 | |
| 10 | X | | | | | | | | | | | X | | | | | | X | 3 | |
| 11 | | X | | | | X | X | | | | | | | | | | | | 3 | |
| 12 | | X | | | | | | | | | | | X | | | | | | 2 | |
| 13 | | | X | | | | | | | | | | | X | | X | | | 3 | |
| 14 | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | X | 3 | |
| 15 | X | | X | | | X | | X | | | | X | | | | | | | 5 | |
| 16 | X | | | | | | | | | | | | X | | | | | X | 3 | |
| 17 | X | X | X | | | | X | | | X | | X | | | | | | X | 7 | |
| 18 | X | X | X | X | | | | | | X | | | | X | | | | | 6 | |
| 19 | X | | | | | | | | | | | X | | | | | | X | 3 | |
| 20 | | X | | X | | | | | | | | | | | | | | X | 3 | |
| 21 | X | | | | X | | | | | | | | | | | | | X | X | 4 |
| 22 | X | X | | | | | | | | | | | | X | | X | | | 4 | |
| 23 | X | | X | | | | | | | | | X | | | | | | X | 5 | |
| 24 | | | X | | | | | | | | | X | | | | | | X | 3 | |
| 25 | | X | | | X | X | | | X | | | | | X | | | X | X | 7 | |
| 26 | X | X | | X | | | | | | | | | | | | | | X | 4 | |
| 27 | X | | X | X | | | | | | | | X | | | X | | | | 5 | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | 2 | |
| 29 | | X | X | | | | | | | | | | X | | | | | | 3 | |
| 30 | X | | | | | | | | | | | | | X | | | | X | 3 | |
| 31 | X | X | | | | | | | X | | X | X | X | | | | | | 6 | |
| 32 | X | | | | | | | | X | | | | | X | | | | | 3 | |
| 33 | X | | X | | | | | | | | | | | | | | | | 2 | |
| 34 | | | X | | | | | | X | | X | | | | X | | | | 4 | |
| 35 | | | | X | X | | | | | X | | | | X | X | | | | 4 | |
| 36 | X | | | X | | | | | | X | | | X | | | | | | 4 | |
| 37 | X | | | | | | | | | X | | | | | | | | X | 3 | |
| 38 | X | X | X | X | | | X | | | X | | | | | X | | X | X | 9 | |
| 39 | X | | | | X | | | | | | | X | | | | | X | X | 5 | |
| 40 | X | | | X | X | X | | | | X | | X | | | | | | | 6 | |
| 41 | | | X | | | | | | | X | | | | | | | | X | 3 | |
| 42 | | | | | X | | X | | X | | | | | | | X | X | | 6 | |
| 43 | X | | | | | X | | | | | | | | | | | | | 2 | |
| 44 | X | | X | X | | X | | | X | | | | | | | | | | 6 | |
| 45 | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | 1 | |
| 46 | X | X | | | | | X | | | X | | X | | X | | | X | X | 7 | |
| 47 | X | X | | X | X | X | | | | X | | | X | | | | | | 7 | |
| 48 | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | 1 | |
| 49 | | | | X | | | | | | | | | | | X | | | | 2 | |
| 50 | X | X | | | | | | | | X | | X | | | | | | X | 5 | |
| 51 | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | 1 | |
| 52 | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | 1 | |
| 53 | X | | | | | | | | | | X | | X | | | | | | 4 | |
| 54 | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | |
| 55 | | | | | | | | | | | | X | | | X | | | | 2 | |
| 56 | | | | | | | | | | | | X | | | X | | | | 2 | |

Fonte: elaboração própria

6.4 Análises de Sensibilidade

Esta seção será destinada a apresentar análises de sensibilidades que foram julgadas convenientes a ser produzidas com relação ao modelo apresentado anteriormente. As análises foram feitas a partir da alteração de parâmetros de entrada do modelo e da verificação dos resultados gerados.

Número máximo de transportadoras

O número máximo de transportadoras definido pela LogísticaSA foi de dez transportadoras por local de origem ou destino. Isso significa que o modelo possui um limite de transportadoras que podem receber rotas que contenham a mesma origem ou o mesmo destino.

Assim como explicado no capítulo quatro, o objetivo dessa restrição é reduzir a complexidade operacional de cada local e também reduzir o tempo de carga e descarga dos caminhões que passarem nos pontos. Dessa forma, também é possível reduzir os custos de transporte.

Foi realizada uma análise aumentando a restrição do parâmetro *Max_Transp*, ou seja, reduzindo o limite de transportadoras. O parâmetro variou de dez até um e os resultados são exibidos na Figura 24.

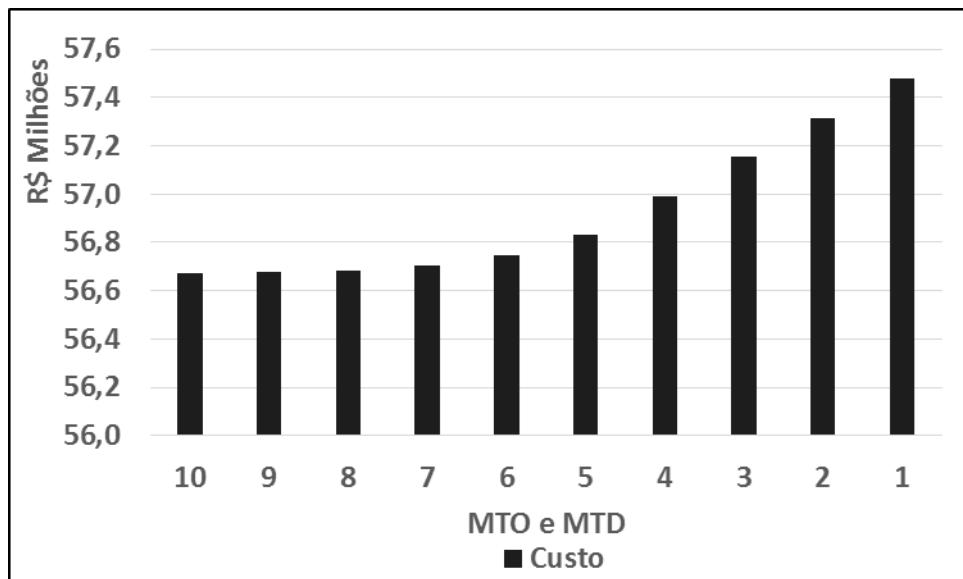


Figura 24 - Análise de Sensibilidade de custo por MTO e MTD

Fonte: elaboração própria

Assim como era esperado, quanto menor o valor dos parâmetros MTO e MTD, mais restritivo é o modelo e menor o espaço viável de possíveis soluções e, consequentemente, o valor da função objetivo é maior, pois o modelo é de minimização de custos.

O gráfico apresentado permite à LogísticaSA selecionar qual é o parâmetro que mais se adequa à sua política de seleção de fornecedores vigentes, com base também no custo de transporte. O custo varia entre R\$ 56,7 e R\$ 57,5 milhões.

Transportadora 1

Como apresentado neste capítulo, na Figura 22, a transportadora de número 1 é a principal fornecedora da LogísticaSA, com 18,5% do volume alocado e 16% das rotas alocadas.

A Figura 25 apresenta dois cenários: o cenário inicial, com todas as transportadoras e um novo cenário, no qual a transportadora um não é contratada. Esse novo cenário ilustra uma situação na qual a LogísticaSA para de contratar a sua principal fornecedora, por qualquer que seja o motivo.

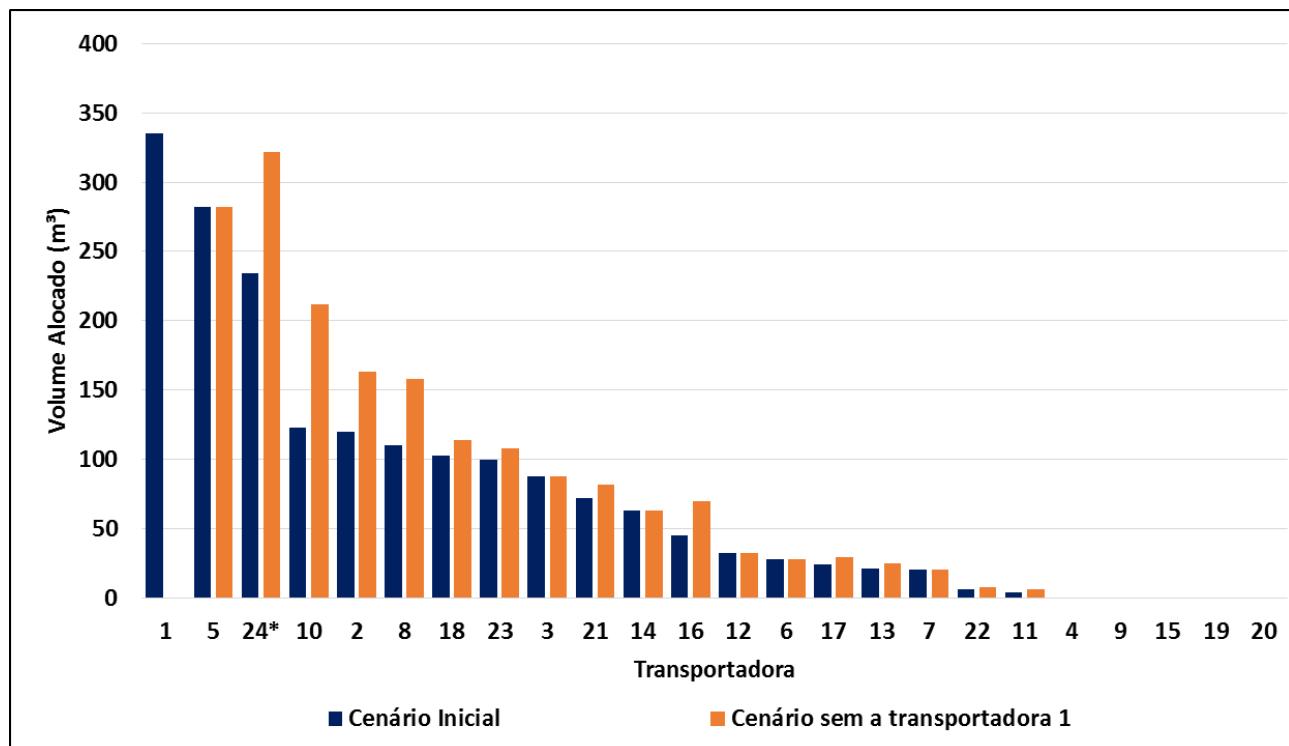


Figura 25 - Volume alocado por transportadora em dois cenários

Fonte: elaboração própria

O novo cenário pode ser facilmente simulado a partir da alteração do parâmetro Y , que determina quais transportadoras estão aptas para executar quais rotas. Ele ilustra como o volume que estava alocado inicialmente com a transportadora um foi redistribuído para as demais transportadoras.

Apesar de as rotas terem sido realocadas sem a necessidade de contratação de novas transportadoras, o volume alocado para a transportadora fictícia aumentou, o que elevou o custo total em aproximadamente 9,5%, como apresentado na Figura 26.

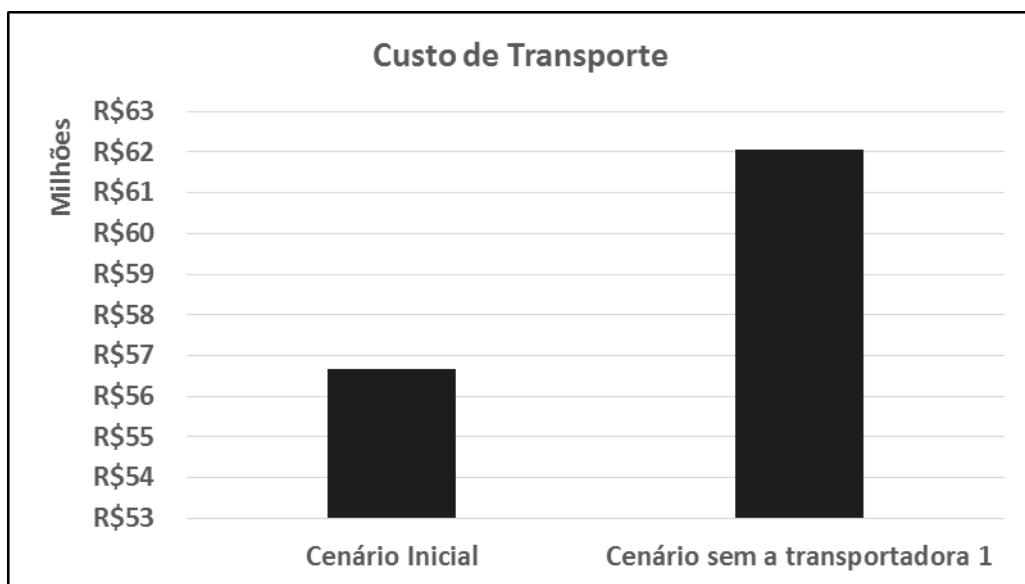


Figura 26 - Custo de transporte nos dois cenários

Fonte: elaboração própria

Neste novo cenário, existe a possibilidade de a LogísticaSA renegociar os valores de contrato com as transportadoras restantes, visto que elas terão um aumento significativo de volume transportado. Dessa forma, é possível reduzir o aumento no custo de transporte.

Alteração da Demanda

A LogísticaSA também está sujeita a alterações na demanda de suas rotas. Nesta seção serão avaliados dois cenários: aumento de 20% na demanda e redução de 20% na demanda com base nos valores e volumes já exibidos anteriormente. Sabe-se que novas rotas podem surgir a cada ciclo operacional, bem como alteração de produtos ou mesmo o surgimento de novos fornecedores e novos pontos de origem e destino.

A Figura 27 exibe os resultados obtidos pela minimização da função objetivo nos três cenários.

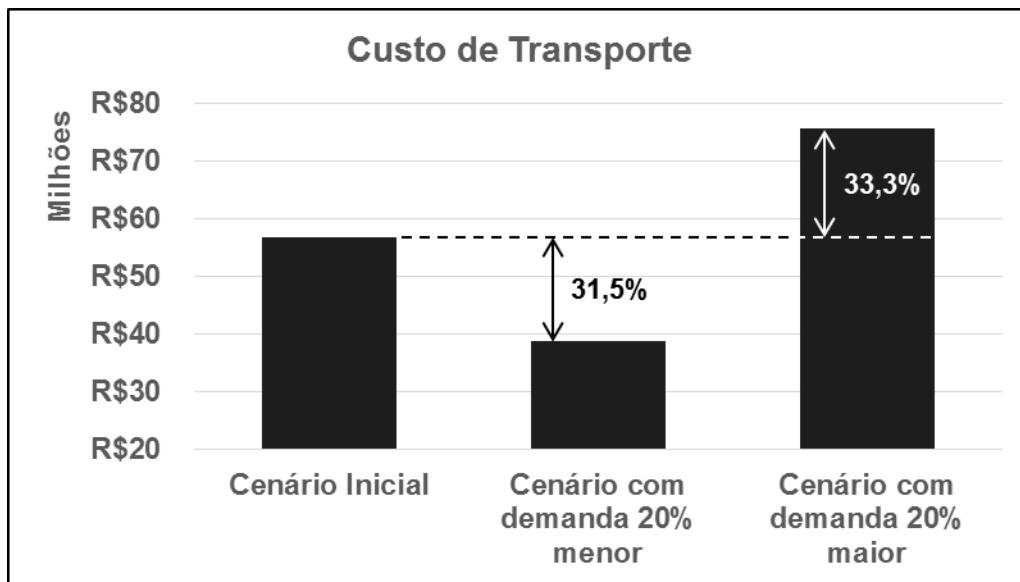


Figura 27 - Custo de transporte com alteração de demanda

Fonte: elaboração própria

Em um cenário com 20% de redução do volume demandado, a redução de custos é de 31,5%.

Já no cenário de aumento de 20% do volume demandado, os custos de transportes aumentam em um terço do cenário inicial. A variação de custo por demanda não é linear, pois quanto maior a demanda, maior a necessidade de contratação por parte da LogísticaSA de transportadoras com preços mais caros de transporte.

Além disso, quanto maior a demanda, maior a necessidade de alocação de rotas além do limite especificado em contrato com as transportadoras, o que acaba elevando o custo total. Essa alocação é representada pela transportadora fictícia (24). A evolução do volume alocado foi de 234, 52 e 416 metros cúbicos, respectivamente ao exibido na Figura 27.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho busca propor uma solução para o problema de seleção de fornecedores, representado pela alocação de rotas a transportadoras que prestam serviço para a empresa LogísticaSA, empresa brasileira do setor de transportes.

Atualmente, a definição de qual transportadora terceirizada será a responsável por cada rota é realizada de um modo bastante manual e não otimizado, sem o apoio de modelos matemáticos.

O modelo matemático de programação linear inteira mista desenvolvido neste trabalho visa a ser uma ferramenta de apoio à decisão da área de planejamento e logística da empresa LogísticaSA, selecionando as transportadoras responsáveis por realizar cada rota demandada de modo a reduzir o custo total de transporte.

O modelo leva em consideração o atendimento à demanda, as restrições de capacidade de cada transportadora e também definições táticas de números mínimo e máximo de transportadoras que podem operar no sistema como um todo e em cada ponto de origem e destino.

Tendo em vista os resultados exibidos no capítulo anterior, o modelo apresentou uma redução de custo de transporte de 2,29% com base no cenário inicial apresentado pela empresa, atendendo à mesma demanda. Assim, entende-se que o trabalho foi capaz de criar um modelo válido que representasse as condições do problema real de forma satisfatória, e que fosse capaz de reduzir os custos da empresa.

Além disso, existe um potencial para redução de custos ainda maior, a depender da negociação de rotas pontuais com as transportadoras, pois os custos considerados nas contratações pontuais foram superestimados na comparação com valores históricos praticados. A LogísticaSA também tem a possibilidade de concentração de rotas em algumas fornecedoras, para aumentar o seu poder de barganha e reduzir o preço contratado.

A adoção do modelo matemático também permite a redução do tempo operacional para definição de quais transportadoras serão selecionadas. Atualmente o processo leva cerca de três dias. Os testes computacionais com auxílio do *software* CPLEX levaram cerca de dois minutos cada.

Na prática, o modelo matemático implantado e operante na empresa é uma poderosa ferramenta de apoio a decisões gerenciais, que pode ser utilizada para renegociação de seus contratos e

para acompanhamento de sua operação a partir da simulação de diversos cenários de modo ágil e eficaz. A LogísticaSA consegue ter visibilidade constante de quais são seus principais parceiros, quais estão operando como gargalo e quais não estão sendo aproveitados.

Também é possível identificar quais são as rotas que recorrentemente tem os maiores preços e a menor oferta para atuar sobre elas. Assim, espera-se que a contratação de fornecedores pela empresa atinja um novo patamar de eficiência operacional e de custos.

Para trabalhos futuros sugere-se, primeiramente, a verificação da efetividade do modelo na redução de custos com dados reais de períodos distintos consecutivos. Além disso, seria interessante saber como a performance computacional do modelo se comportaria com o aumento da complexidade operacional, com o aumento de pontos de origem, de destino, de transportadoras e de produtos.

Para a empresa LogísticaSA, seria interessante verificar a possibilidade de expansão de escopo do modelo para incluir outros meios de transporte além do Transporte Rodoviário de Cargas (TRC), tais como o dutoviário, o hidroviário e o ferroviário. Assim seria possível tratar o problema de forma completa e obter uma redução de custos maior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTHONY, T. F.; BUFFA, F. P. Strategic purchasing scheduling. **Journal of Purchasing and Materials Management**, v. 13, n. 3, p. 27–31, 1977.

ANTT. **Agência Nacional de Transportes Terrestres. Resolução nº 3.056.** Dispõe sobre o exercício da atividade de transporte rodoviário de cargas por conta de terceiros e mediante remuneração, estabelece procedimentos para inscrição e manutenção no Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Cargas – RNTRC. Brasília, 2009.

ARAUJO, J. G. DE. Transporte rodoviário de cargas no Brasil: mercado atual e próximas tendências. **ILOS – Instituto de Logística e Supply Chain**, p. 1–12, 2011.

ARAUJO, J. G. DE. Desafios e oportunidades do transporte rodoviário. **Harvard Business Review**, p. 1–6, 2014.

ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

ÁVILA, P. et al. Supplier's Selection Model based on an Empirical Study. **International Conference on Health and Social Care Information Systems and Technologies**, v. 5, p. 625–634, 2012.

BNDES. **Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social - Página Oficial**. Disponível em: <<http://www.bnDES.gov.br/wps/portal/site/home/finan>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

BRASIL. **Lei nº 11.442**. Dispõe sobre o transporte rodoviário de cargas por conta de terceiros e mediante remuneração e revoga a Lei nº. 6.813, de 10 de julho de 1980. Brasília: Diário Oficial da União, 08 janeiro 2008, 2008.

BUFFA, F. P.; JACKSON, W. M. A goal programming model for purchase planning. **Journal of Purchasing and Materials Management**, v. 19, n. 3, p. 27–34, 1983.

CAIXETA-FILHO, J. V.; MARTINS, R. S. **Gestão Logística do Transporte de Cargas**. São Paulo: Atlas, 2001.

CHAUDHRY, S. S.; FORST, F. G.; ZYDIAK, J. L. Vendor selection with price breaks. **European Journal of Operational Research**, v. 70, n. 1, p. 52–66, 1993.

CNT. **Plano CNT de Logística**. Brasília: CNT (Confederação Nacional do Transporte), 2014.

COHEN, S.; ROUSSEL, J. Strategic supply chain management: the five disciplines for Top Performance. **McGraw-Hill**, 2004.

DICKSON, G. W. An analysis of vendor selection systems and decisions. **Journal of Purchasing**, v. 2, n. 1, p. 5–17, 1966.

FIESP. **Federação das Indústrias do Estado de São Paulo - Página Oficial**. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/transporte-e-logistica/natureza-de-carga/>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

FIROUZ, M.; KESKIN, B. B.; MELOUK, S. H. An integrated supplier selection and inventory problem with multi-sourcing and lateral transshipments. **European Journal of Operational Research**, v. 70, p. 77–93, 2017.

FLEURY, P. F. Terceirização logística no Brasil. In: **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento do fluxo de produtos e dos recursos**. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2003. p. 313–324.

GABALLA, A. A. Minimum Cost Allocation of Tenders. **Operational Research Quarterly**, v. 25, n. 3, p. 389–398, 1974.

GHODSYOUR, S. H.; O'BRIEN, C. The total cost of logistics in supplier selection, under conditions of multiple sourcing, multiple criteria and capacity constraint. **International Journal of Production Economics**, v. 73, n. 1, p. 15–27, 2001.

KAHRAMAN, C.; CEBECI, U.; ULUKAN, Z. Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP. **Logistics Information Management**, v. 16, n. 6, p. 382–394, 2003.

KANAFANI, A. K. **Transportation demand analysis**. New York: McGraw-Hill, 1983.

KHAN, M.; JAYANT, A. Multi-Criteria Supplier Selection Using Fuzzy-AHP Approach : A Case Study of Manufacturing Company. **International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology (Ijrmet)**, v. 5, n. 1, p. 73–79, 2015.

- LIMA, M. Custo do transporte rodoviário de cargas. In: **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento do fluxo de produtos e dos recursos**. Coleção Coppead de administração. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2013.
- M.N. QURESHI; KUMAR, D.; KUMAR, P. An integrated model to identify and classify the key criteria and their role in the assessment of 3PL services providers. **Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics**, v. 20, n. 2, p. 227–249, 2008.
- MALONI, M. J.; BENTON, W. C. **Supply chain partnerships: Opportunities for operations research****European Journal of Operational Research**, 1997.
- MARINHO, B. DE L. et al. **Gestão estratégica de fornecedores e contratos**. 1a. ed. São Paulo: Saraiva, 2014.
- P.S. BENDER et al. Improving purchasing productivity at IBM with a normative decision support system. **Interfaces**, v. 15, n. 3, p. 106–115, 1985.
- PAN, A. C. Allocation of order quantity among suppliers. **Journal of Purchasing and Materials Management**, v. 25, n. 3, p. 36–39, 1989.
- PORTER, M. **Competição: estratégias competitivas essenciais**. 10a. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1999.
- QUEIROZ, C. A. R. **Manual da terceirização**. São Paulo: STS, 1992.
- RAVINDRAN, A.; PHILLIPS, D. T.; SOLBERG, J. J. **Operations Research: Principles and Practice**. 2nd. ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- ROSENTHAL, E. C.; ZYDIAK, J. L.; CHAUDHRY, S. S. Vendor selection with bundling. **Decision Sciences**, v. 1, n. 26, p. 35–48, 1995.
- TAHA, H. A. **Operations Research An Introduction**. 8th. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2007.
- TURNER, I. An independent system for the evaluation of contract tenders. **Operational Research Society**, v. 39, n. 6, p. 551–561, 1988.

WANKE, P.; FLEURY, P. F. Capítulo 12 - Transporte de cargas no Brasil: estudo exploratório das principais variáveis relacionadas aos diferentes modais e às suas estruturas de custos. In: **Estrutura e Dinâmica do Setor de Serviços no Brasil**. Brasília: IPEA, 2006. p. 409–464.

WEBER, C. .; CURRENT J.R.; BENTON W.C. Vendor selection criteria and methods. **European Journal of Operational Research**, v. 50, p. 2–18, 1991.

WINSTON, W. L.; GOLDBERG, J. B. **Operations Research: applications and algorithms**. 4th. ed. Belmont, CA: Thomson/Brooks/Cole, 2004.

APÊNDICE A – PARÂMETROS E RESULTADOS DO TESTE SIMPLIFICADO

Tabela 32 - Parâmetro de custo do teste simplificado

| | | | C_{ijtp} | |
|----------|----------|----------|------------|------------|
| i | j | t | p=1 | p=2 |
| 1 | 1 | 1 | 3 | 9 |
| 1 | 1 | 2 | 4 | 6 |
| 1 | 1 | 3 | 7 | 9 |
| 1 | 1 | 4 | 2 | 5 |
| 1 | 1 | 5 | 2 | 8 |
| 1 | 2 | 1 | 4 | 6 |
| 1 | 2 | 2 | 1 | 9 |
| 1 | 2 | 3 | 1 | 10 |
| 1 | 2 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 2 | 5 | 1 | 7 |
| 1 | 3 | 1 | 2 | 6 |
| 1 | 3 | 2 | 7 | 8 |
| 1 | 3 | 3 | 6 | 6 |
| 1 | 3 | 4 | 4 | 10 |
| 1 | 3 | 5 | 3 | 6 |
| 1 | 4 | 1 | 4 | 6 |
| 1 | 4 | 2 | 4 | 8 |
| 1 | 4 | 3 | 3 | 10 |
| 1 | 4 | 4 | 6 | 10 |
| 1 | 4 | 5 | 4 | 8 |
| 1 | 5 | 1 | 6 | 6 |
| 1 | 5 | 2 | 3 | 5 |
| 1 | 5 | 3 | 4 | 10 |
| 1 | 5 | 4 | 1 | 10 |
| 1 | 5 | 5 | 2 | 9 |
| 1 | 6 | 1 | 6 | 7 |
| 1 | 6 | 2 | 6 | 6 |
| 1 | 6 | 3 | 1 | 6 |
| 1 | 6 | 4 | 4 | 9 |
| 1 | 6 | 5 | 3 | 8 |
| 1 | 7 | 1 | 7 | 7 |
| 1 | 7 | 2 | 5 | 7 |
| 1 | 7 | 3 | 6 | 9 |
| 1 | 7 | 4 | 1 | 6 |
| 1 | 7 | 5 | 5 | 9 |
| 1 | 8 | 1 | 6 | 8 |

| | | | | |
|---|----|---|---|----|
| 1 | 8 | 2 | 5 | 9 |
| 1 | 8 | 3 | 3 | 10 |
| 1 | 8 | 4 | 6 | 5 |
| 1 | 8 | 5 | 5 | 10 |
| 1 | 9 | 1 | 1 | 6 |
| 1 | 9 | 2 | 4 | 6 |
| 1 | 9 | 3 | 3 | 8 |
| 1 | 9 | 4 | 4 | 5 |
| 1 | 9 | 5 | 3 | 10 |
| 1 | 10 | 1 | 1 | 8 |
| 1 | 10 | 2 | 7 | 7 |
| 1 | 10 | 3 | 2 | 9 |
| 1 | 10 | 4 | 7 | 6 |
| 1 | 10 | 5 | 4 | 5 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 9 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 9 |
| 2 | 1 | 3 | 4 | 10 |
| 2 | 1 | 4 | 1 | 6 |
| 2 | 1 | 5 | 7 | 6 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 9 |
| 2 | 2 | 2 | 3 | 6 |
| 2 | 2 | 3 | 1 | 9 |
| 2 | 2 | 4 | 6 | 6 |
| 2 | 2 | 5 | 7 | 10 |
| 2 | 3 | 1 | 6 | 8 |
| 2 | 3 | 2 | 3 | 9 |
| 2 | 3 | 3 | 5 | 9 |
| 2 | 3 | 4 | 2 | 10 |
| 2 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| 2 | 4 | 1 | 1 | 6 |
| 2 | 4 | 2 | 2 | 10 |
| 2 | 4 | 3 | 2 | 10 |
| 2 | 4 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | 4 | 5 | 4 | 10 |
| 2 | 5 | 1 | 1 | 10 |
| 2 | 5 | 2 | 3 | 10 |
| 2 | 5 | 3 | 3 | 9 |
| 2 | 5 | 4 | 5 | 10 |
| 2 | 5 | 5 | 6 | 5 |
| 2 | 6 | 1 | 5 | 5 |
| 2 | 6 | 2 | 7 | 10 |
| 2 | 6 | 3 | 2 | 10 |
| 2 | 6 | 4 | 4 | 10 |
| 2 | 6 | 5 | 4 | 9 |

| | | | | |
|---|----|---|---|----|
| 2 | 7 | 1 | 6 | 5 |
| 2 | 7 | 2 | 2 | 7 |
| 2 | 7 | 3 | 1 | 10 |
| 2 | 7 | 4 | 3 | 5 |
| 2 | 7 | 5 | 2 | 9 |
| 2 | 8 | 1 | 7 | 8 |
| 2 | 8 | 2 | 1 | 10 |
| 2 | 8 | 3 | 7 | 9 |
| 2 | 8 | 4 | 3 | 6 |
| 2 | 8 | 5 | 7 | 5 |
| 2 | 9 | 1 | 4 | 5 |
| 2 | 9 | 2 | 7 | 9 |
| 2 | 9 | 3 | 3 | 8 |
| 2 | 9 | 4 | 6 | 7 |
| 2 | 9 | 5 | 3 | 5 |
| 2 | 10 | 1 | 3 | 10 |
| 2 | 10 | 2 | 7 | 8 |
| 2 | 10 | 3 | 6 | 5 |
| 2 | 10 | 4 | 7 | 6 |
| 2 | 10 | 5 | 6 | 10 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 7 |
| 3 | 1 | 2 | 7 | 6 |
| 3 | 1 | 3 | 5 | 8 |
| 3 | 1 | 4 | 4 | 6 |
| 3 | 1 | 5 | 4 | 8 |
| 3 | 2 | 1 | 2 | 9 |
| 3 | 2 | 2 | 7 | 5 |
| 3 | 2 | 3 | 7 | 7 |
| 3 | 2 | 4 | 1 | 6 |
| 3 | 2 | 5 | 1 | 8 |
| 3 | 3 | 1 | 5 | 6 |
| 3 | 3 | 2 | 1 | 9 |
| 3 | 3 | 3 | 6 | 7 |
| 3 | 3 | 4 | 7 | 6 |
| 3 | 3 | 5 | 4 | 9 |
| 3 | 4 | 1 | 3 | 6 |
| 3 | 4 | 2 | 2 | 7 |
| 3 | 4 | 3 | 7 | 10 |
| 3 | 4 | 4 | 7 | 10 |
| 3 | 4 | 5 | 3 | 9 |
| 3 | 5 | 1 | 1 | 8 |
| 3 | 5 | 2 | 6 | 8 |
| 3 | 5 | 3 | 2 | 8 |
| 3 | 5 | 4 | 4 | 10 |

| | | | | |
|---|----|---|---|----|
| 3 | 5 | 5 | 3 | 8 |
| 3 | 6 | 1 | 2 | 9 |
| 3 | 6 | 2 | 7 | 5 |
| 3 | 6 | 3 | 4 | 8 |
| 3 | 6 | 4 | 6 | 6 |
| 3 | 6 | 5 | 4 | 8 |
| 3 | 7 | 1 | 5 | 5 |
| 3 | 7 | 2 | 2 | 5 |
| 3 | 7 | 3 | 2 | 8 |
| 3 | 7 | 4 | 6 | 8 |
| 3 | 7 | 5 | 4 | 5 |
| 3 | 8 | 1 | 7 | 8 |
| 3 | 8 | 2 | 1 | 5 |
| 3 | 8 | 3 | 1 | 8 |
| 3 | 8 | 4 | 5 | 7 |
| 3 | 8 | 5 | 3 | 6 |
| 3 | 9 | 1 | 2 | 8 |
| 3 | 9 | 2 | 4 | 8 |
| 3 | 9 | 3 | 4 | 9 |
| 3 | 9 | 4 | 5 | 8 |
| 3 | 9 | 5 | 6 | 5 |
| 3 | 10 | 1 | 1 | 10 |
| 3 | 10 | 2 | 7 | 10 |
| 3 | 10 | 3 | 3 | 7 |
| 3 | 10 | 4 | 7 | 5 |
| 3 | 10 | 5 | 3 | 5 |
| 4 | 1 | 1 | 2 | 8 |
| 4 | 1 | 2 | 4 | 7 |
| 4 | 1 | 3 | 1 | 8 |
| 4 | 1 | 4 | 5 | 6 |
| 4 | 1 | 5 | 4 | 6 |
| 4 | 2 | 1 | 7 | 7 |
| 4 | 2 | 2 | 5 | 6 |
| 4 | 2 | 3 | 6 | 9 |
| 4 | 2 | 4 | 6 | 6 |
| 4 | 2 | 5 | 6 | 6 |
| 4 | 3 | 1 | 2 | 10 |
| 4 | 3 | 2 | 1 | 6 |
| 4 | 3 | 3 | 3 | 6 |
| 4 | 3 | 4 | 2 | 7 |
| 4 | 3 | 5 | 6 | 8 |
| 4 | 4 | 1 | 6 | 6 |
| 4 | 4 | 2 | 7 | 8 |
| 4 | 4 | 3 | 1 | 6 |

| | | | | |
|---|----|---|---|----|
| 4 | 4 | 4 | 2 | 5 |
| 4 | 4 | 5 | 4 | 5 |
| 4 | 5 | 1 | 1 | 8 |
| 4 | 5 | 2 | 6 | 7 |
| 4 | 5 | 3 | 2 | 10 |
| 4 | 5 | 4 | 7 | 8 |
| 4 | 5 | 5 | 4 | 6 |
| 4 | 6 | 1 | 4 | 9 |
| 4 | 6 | 2 | 4 | 9 |
| 4 | 6 | 3 | 6 | 7 |
| 4 | 6 | 4 | 2 | 7 |
| 4 | 6 | 5 | 7 | 9 |
| 4 | 7 | 1 | 6 | 8 |
| 4 | 7 | 2 | 6 | 5 |
| 4 | 7 | 3 | 2 | 5 |
| 4 | 7 | 4 | 2 | 8 |
| 4 | 7 | 5 | 6 | 10 |
| 4 | 8 | 1 | 5 | 10 |
| 4 | 8 | 2 | 3 | 8 |
| 4 | 8 | 3 | 7 | 5 |
| 4 | 8 | 4 | 3 | 6 |
| 4 | 8 | 5 | 3 | 10 |
| 4 | 9 | 1 | 1 | 6 |
| 4 | 9 | 2 | 6 | 6 |
| 4 | 9 | 3 | 3 | 6 |
| 4 | 9 | 4 | 1 | 9 |
| 4 | 9 | 5 | 6 | 5 |
| 4 | 10 | 1 | 3 | 10 |
| 4 | 10 | 2 | 1 | 9 |
| 4 | 10 | 3 | 1 | 6 |
| 4 | 10 | 4 | 2 | 8 |
| 4 | 10 | 5 | 7 | 5 |
| 5 | 1 | 1 | 4 | 8 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 6 |
| 5 | 1 | 3 | 6 | 5 |
| 5 | 1 | 4 | 7 | 8 |
| 5 | 1 | 5 | 1 | 6 |
| 5 | 2 | 1 | 3 | 10 |
| 5 | 2 | 2 | 2 | 10 |
| 5 | 2 | 3 | 2 | 10 |
| 5 | 2 | 4 | 4 | 8 |
| 5 | 2 | 5 | 6 | 6 |
| 5 | 3 | 1 | 1 | 5 |
| 5 | 3 | 2 | 7 | 10 |

| | | | | |
|---|----|---|---|----|
| 5 | 3 | 3 | 4 | 6 |
| 5 | 3 | 4 | 2 | 9 |
| 5 | 3 | 5 | 1 | 6 |
| 5 | 4 | 1 | 2 | 10 |
| 5 | 4 | 2 | 7 | 8 |
| 5 | 4 | 3 | 2 | 5 |
| 5 | 4 | 4 | 7 | 7 |
| 5 | 4 | 5 | 2 | 10 |
| 5 | 5 | 1 | 7 | 8 |
| 5 | 5 | 2 | 1 | 9 |
| 5 | 5 | 3 | 4 | 5 |
| 5 | 5 | 4 | 3 | 8 |
| 5 | 5 | 5 | 3 | 5 |
| 5 | 6 | 1 | 7 | 9 |
| 5 | 6 | 2 | 5 | 10 |
| 5 | 6 | 3 | 6 | 10 |
| 5 | 6 | 4 | 5 | 8 |
| 5 | 6 | 5 | 4 | 5 |
| 5 | 7 | 1 | 3 | 8 |
| 5 | 7 | 2 | 5 | 5 |
| 5 | 7 | 3 | 7 | 5 |
| 5 | 7 | 4 | 1 | 8 |
| 5 | 7 | 5 | 7 | 6 |
| 5 | 8 | 1 | 3 | 5 |
| 5 | 8 | 2 | 7 | 6 |
| 5 | 8 | 3 | 1 | 6 |
| 5 | 8 | 4 | 1 | 6 |
| 5 | 8 | 5 | 4 | 8 |
| 5 | 9 | 1 | 1 | 6 |
| 5 | 9 | 2 | 4 | 10 |
| 5 | 9 | 3 | 7 | 8 |
| 5 | 9 | 4 | 2 | 6 |
| 5 | 9 | 5 | 7 | 5 |
| 5 | 10 | 1 | 5 | 6 |
| 5 | 10 | 2 | 1 | 9 |
| 5 | 10 | 3 | 2 | 6 |
| 5 | 10 | 4 | 6 | 5 |
| 5 | 10 | 5 | 3 | 7 |
| 6 | 1 | 1 | 6 | 6 |
| 6 | 1 | 2 | 5 | 8 |
| 6 | 1 | 3 | 4 | 8 |
| 6 | 1 | 4 | 1 | 6 |
| 6 | 1 | 5 | 3 | 8 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 10 |

| | | | | |
|---|----|---|---|----|
| 6 | 2 | 2 | 5 | 9 |
| 6 | 2 | 3 | 2 | 7 |
| 6 | 2 | 4 | 5 | 10 |
| 6 | 2 | 5 | 5 | 10 |
| 6 | 3 | 1 | 7 | 8 |
| 6 | 3 | 2 | 7 | 7 |
| 6 | 3 | 3 | 5 | 8 |
| 6 | 3 | 4 | 2 | 6 |
| 6 | 3 | 5 | 4 | 7 |
| 6 | 4 | 1 | 6 | 10 |
| 6 | 4 | 2 | 7 | 9 |
| 6 | 4 | 3 | 2 | 7 |
| 6 | 4 | 4 | 5 | 8 |
| 6 | 4 | 5 | 6 | 5 |
| 6 | 5 | 1 | 4 | 7 |
| 6 | 5 | 2 | 7 | 10 |
| 6 | 5 | 3 | 1 | 7 |
| 6 | 5 | 4 | 1 | 7 |
| 6 | 5 | 5 | 1 | 9 |
| 6 | 6 | 1 | 6 | 8 |
| 6 | 6 | 2 | 5 | 8 |
| 6 | 6 | 3 | 4 | 5 |
| 6 | 6 | 4 | 3 | 7 |
| 6 | 6 | 5 | 1 | 7 |
| 6 | 7 | 1 | 1 | 6 |
| 6 | 7 | 2 | 4 | 9 |
| 6 | 7 | 3 | 5 | 5 |
| 6 | 7 | 4 | 2 | 7 |
| 6 | 7 | 5 | 6 | 10 |
| 6 | 8 | 1 | 4 | 5 |
| 6 | 8 | 2 | 2 | 8 |
| 6 | 8 | 3 | 6 | 9 |
| 6 | 8 | 4 | 4 | 8 |
| 6 | 8 | 5 | 4 | 8 |
| 6 | 9 | 1 | 6 | 10 |
| 6 | 9 | 2 | 2 | 9 |
| 6 | 9 | 3 | 2 | 8 |
| 6 | 9 | 4 | 4 | 8 |
| 6 | 9 | 5 | 6 | 6 |
| 6 | 10 | 1 | 4 | 7 |
| 6 | 10 | 2 | 6 | 9 |
| 6 | 10 | 3 | 3 | 7 |
| 6 | 10 | 4 | 2 | 7 |
| 6 | 10 | 5 | 1 | 9 |

| | | | | |
|---|---|---|---|----|
| 7 | 1 | 1 | 5 | 9 |
| 7 | 1 | 2 | 3 | 10 |
| 7 | 1 | 3 | 3 | 10 |
| 7 | 1 | 4 | 3 | 9 |
| 7 | 1 | 5 | 3 | 7 |
| 7 | 2 | 1 | 6 | 9 |
| 7 | 2 | 2 | 6 | 6 |
| 7 | 2 | 3 | 6 | 9 |
| 7 | 2 | 4 | 4 | 8 |
| 7 | 2 | 5 | 7 | 8 |
| 7 | 3 | 1 | 5 | 6 |
| 7 | 3 | 2 | 6 | 6 |
| 7 | 3 | 3 | 7 | 5 |
| 7 | 3 | 4 | 7 | 6 |
| 7 | 3 | 5 | 2 | 8 |
| 7 | 4 | 1 | 6 | 5 |
| 7 | 4 | 2 | 6 | 9 |
| 7 | 4 | 3 | 5 | 9 |
| 7 | 4 | 4 | 2 | 6 |
| 7 | 4 | 5 | 4 | 5 |
| 7 | 5 | 1 | 7 | 9 |
| 7 | 5 | 2 | 3 | 6 |
| 7 | 5 | 3 | 5 | 7 |
| 7 | 5 | 4 | 5 | 10 |
| 7 | 5 | 5 | 2 | 7 |
| 7 | 6 | 1 | 1 | 10 |
| 7 | 6 | 2 | 6 | 10 |
| 7 | 6 | 3 | 6 | 8 |
| 7 | 6 | 4 | 4 | 7 |
| 7 | 6 | 5 | 1 | 7 |
| 7 | 7 | 1 | 1 | 5 |
| 7 | 7 | 2 | 7 | 8 |
| 7 | 7 | 3 | 4 | 10 |
| 7 | 7 | 4 | 1 | 6 |
| 7 | 7 | 5 | 2 | 8 |
| 7 | 8 | 1 | 6 | 6 |
| 7 | 8 | 2 | 7 | 5 |
| 7 | 8 | 3 | 4 | 7 |
| 7 | 8 | 4 | 3 | 5 |
| 7 | 8 | 5 | 3 | 6 |
| 7 | 9 | 1 | 7 | 5 |
| 7 | 9 | 2 | 4 | 8 |
| 7 | 9 | 3 | 7 | 9 |
| 7 | 9 | 4 | 1 | 9 |

| | | | | |
|---|----|---|---|----|
| 7 | 9 | 5 | 4 | 7 |
| 7 | 10 | 1 | 2 | 9 |
| 7 | 10 | 2 | 3 | 8 |
| 7 | 10 | 3 | 3 | 10 |
| 7 | 10 | 4 | 2 | 6 |
| 7 | 10 | 5 | 3 | 6 |
| 8 | 1 | 1 | 3 | 6 |
| 8 | 1 | 2 | 4 | 10 |
| 8 | 1 | 3 | 3 | 5 |
| 8 | 1 | 4 | 3 | 6 |
| 8 | 1 | 5 | 2 | 6 |
| 8 | 2 | 1 | 7 | 7 |
| 8 | 2 | 2 | 3 | 6 |
| 8 | 2 | 3 | 6 | 6 |
| 8 | 2 | 4 | 3 | 6 |
| 8 | 2 | 5 | 7 | 5 |
| 8 | 3 | 1 | 1 | 10 |
| 8 | 3 | 2 | 5 | 9 |
| 8 | 3 | 3 | 4 | 10 |
| 8 | 3 | 4 | 4 | 9 |
| 8 | 3 | 5 | 1 | 6 |
| 8 | 4 | 1 | 5 | 9 |
| 8 | 4 | 2 | 6 | 10 |
| 8 | 4 | 3 | 2 | 8 |
| 8 | 4 | 4 | 3 | 5 |
| 8 | 4 | 5 | 1 | 10 |
| 8 | 5 | 1 | 1 | 6 |
| 8 | 5 | 2 | 4 | 10 |
| 8 | 5 | 3 | 2 | 5 |
| 8 | 5 | 4 | 2 | 5 |
| 8 | 5 | 5 | 4 | 9 |
| 8 | 6 | 1 | 7 | 7 |
| 8 | 6 | 2 | 6 | 9 |
| 8 | 6 | 3 | 4 | 8 |
| 8 | 6 | 4 | 1 | 8 |
| 8 | 6 | 5 | 1 | 5 |
| 8 | 7 | 1 | 4 | 10 |
| 8 | 7 | 2 | 4 | 10 |
| 8 | 7 | 3 | 7 | 8 |
| 8 | 7 | 4 | 6 | 10 |
| 8 | 7 | 5 | 1 | 6 |
| 8 | 8 | 1 | 4 | 9 |
| 8 | 8 | 2 | 6 | 6 |
| 8 | 8 | 3 | 4 | 8 |

| | | | | |
|---|----|---|---|----|
| 8 | 8 | 4 | 7 | 5 |
| 8 | 8 | 5 | 3 | 8 |
| 8 | 9 | 1 | 1 | 5 |
| 8 | 9 | 2 | 7 | 7 |
| 8 | 9 | 3 | 2 | 10 |
| 8 | 9 | 4 | 7 | 9 |
| 8 | 9 | 5 | 3 | 9 |
| 8 | 10 | 1 | 7 | 10 |
| 8 | 10 | 2 | 4 | 10 |
| 8 | 10 | 3 | 6 | 10 |
| 8 | 10 | 4 | 7 | 8 |
| 8 | 10 | 5 | 2 | 6 |
| 9 | 1 | 1 | 2 | 7 |
| 9 | 1 | 2 | 2 | 5 |
| 9 | 1 | 3 | 2 | 8 |
| 9 | 1 | 4 | 1 | 8 |
| 9 | 1 | 5 | 5 | 8 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 5 |
| 9 | 2 | 2 | 1 | 10 |
| 9 | 2 | 3 | 1 | 10 |
| 9 | 2 | 4 | 3 | 6 |
| 9 | 2 | 5 | 4 | 6 |
| 9 | 3 | 1 | 3 | 8 |
| 9 | 3 | 2 | 3 | 8 |
| 9 | 3 | 3 | 5 | 6 |
| 9 | 3 | 4 | 6 | 5 |
| 9 | 3 | 5 | 2 | 7 |
| 9 | 4 | 1 | 3 | 5 |
| 9 | 4 | 2 | 5 | 5 |
| 9 | 4 | 3 | 3 | 8 |
| 9 | 4 | 4 | 3 | 9 |
| 9 | 4 | 5 | 2 | 10 |
| 9 | 5 | 1 | 2 | 6 |
| 9 | 5 | 2 | 5 | 5 |
| 9 | 5 | 3 | 4 | 10 |
| 9 | 5 | 4 | 4 | 9 |
| 9 | 5 | 5 | 7 | 8 |
| 9 | 6 | 1 | 3 | 5 |
| 9 | 6 | 2 | 6 | 10 |
| 9 | 6 | 3 | 7 | 10 |
| 9 | 6 | 4 | 1 | 5 |
| 9 | 6 | 5 | 4 | 8 |
| 9 | 7 | 1 | 2 | 7 |
| 9 | 7 | 2 | 6 | 9 |

| | | | | |
|----|----|---|---|----|
| 9 | 7 | 3 | 4 | 8 |
| 9 | 7 | 4 | 6 | 5 |
| 9 | 7 | 5 | 7 | 8 |
| 9 | 8 | 1 | 3 | 9 |
| 9 | 8 | 2 | 7 | 7 |
| 9 | 8 | 3 | 4 | 7 |
| 9 | 8 | 4 | 5 | 9 |
| 9 | 8 | 5 | 1 | 7 |
| 9 | 9 | 1 | 7 | 9 |
| 9 | 9 | 2 | 1 | 5 |
| 9 | 9 | 3 | 7 | 10 |
| 9 | 9 | 4 | 2 | 10 |
| 9 | 9 | 5 | 3 | 8 |
| 9 | 10 | 1 | 6 | 8 |
| 9 | 10 | 2 | 3 | 6 |
| 9 | 10 | 3 | 7 | 9 |
| 9 | 10 | 4 | 2 | 6 |
| 9 | 10 | 5 | 2 | 8 |
| 10 | 1 | 1 | 6 | 5 |
| 10 | 1 | 2 | 3 | 10 |
| 10 | 1 | 3 | 2 | 6 |
| 10 | 1 | 4 | 5 | 5 |
| 10 | 1 | 5 | 6 | 6 |
| 10 | 2 | 1 | 2 | 10 |
| 10 | 2 | 2 | 1 | 7 |
| 10 | 2 | 3 | 5 | 7 |
| 10 | 2 | 4 | 2 | 10 |
| 10 | 2 | 5 | 5 | 8 |
| 10 | 3 | 1 | 7 | 9 |
| 10 | 3 | 2 | 1 | 10 |
| 10 | 3 | 3 | 6 | 10 |
| 10 | 3 | 4 | 1 | 5 |
| 10 | 3 | 5 | 3 | 8 |
| 10 | 4 | 1 | 7 | 5 |
| 10 | 4 | 2 | 4 | 7 |
| 10 | 4 | 3 | 6 | 5 |
| 10 | 4 | 4 | 6 | 9 |
| 10 | 4 | 5 | 1 | 7 |
| 10 | 5 | 1 | 4 | 6 |
| 10 | 5 | 2 | 3 | 10 |
| 10 | 5 | 3 | 4 | 7 |
| 10 | 5 | 4 | 3 | 7 |
| 10 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 10 | 6 | 1 | 3 | 10 |

| | | | | |
|----|----|---|---|----|
| 10 | 6 | 2 | 7 | 9 |
| 10 | 6 | 3 | 1 | 6 |
| 10 | 6 | 4 | 5 | 5 |
| 10 | 6 | 5 | 2 | 7 |
| 10 | 7 | 1 | 1 | 6 |
| 10 | 7 | 2 | 3 | 8 |
| 10 | 7 | 3 | 2 | 5 |
| 10 | 7 | 4 | 3 | 6 |
| 10 | 7 | 5 | 7 | 7 |
| 10 | 8 | 1 | 6 | 5 |
| 10 | 8 | 2 | 1 | 7 |
| 10 | 8 | 3 | 2 | 6 |
| 10 | 8 | 4 | 7 | 7 |
| 10 | 8 | 5 | 5 | 6 |
| 10 | 9 | 1 | 5 | 5 |
| 10 | 9 | 2 | 3 | 7 |
| 10 | 9 | 3 | 6 | 6 |
| 10 | 9 | 4 | 3 | 8 |
| 10 | 9 | 5 | 4 | 10 |
| 10 | 10 | 1 | 3 | 5 |
| 10 | 10 | 2 | 7 | 10 |
| 10 | 10 | 3 | 2 | 9 |
| 10 | 10 | 4 | 2 | 7 |
| 10 | 10 | 5 | 6 | 6 |

Tabela 33 - Parâmetro de demanda do teste simplificado

| | | D_{ijp} | |
|----------|----------|------------|------------|
| i | j | p=1 | p=2 |
| 1 | 1 | 9 | 8 |
| 1 | 2 | 2 | 0 |
| 1 | 3 | 0 | 0 |
| 1 | 4 | 0 | 0 |
| 1 | 5 | 0 | 0 |
| 1 | 6 | 0 | 0 |
| 1 | 7 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | 0 | 2 |
| 1 | 9 | 10 | 2 |
| 1 | 10 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 9 |
| 2 | 2 | 0 | 0 |
| 2 | 3 | 5 | 10 |
| 2 | 4 | 0 | 0 |
| 2 | 5 | 0 | 7 |

| | | | |
|---|----|----|----|
| 2 | 6 | 0 | 0 |
| 2 | 7 | 0 | 4 |
| 2 | 8 | 0 | 8 |
| 2 | 9 | 0 | 3 |
| 2 | 10 | 0 | 9 |
| 3 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 2 | 0 | 0 |
| 3 | 3 | 0 | 0 |
| 3 | 4 | 3 | 1 |
| 3 | 5 | 0 | 0 |
| 3 | 6 | 2 | 0 |
| 3 | 7 | 2 | 0 |
| 3 | 8 | 0 | 0 |
| 3 | 9 | 0 | 0 |
| 3 | 10 | 2 | 1 |
| 4 | 1 | 8 | 3 |
| 4 | 2 | 0 | 3 |
| 4 | 3 | 0 | 0 |
| 4 | 4 | 4 | 0 |
| 4 | 5 | 6 | 1 |
| 4 | 6 | 10 | 0 |
| 4 | 7 | 0 | 10 |
| 4 | 8 | 0 | 8 |
| 4 | 9 | 0 | 0 |
| 4 | 10 | 0 | 2 |
| 5 | 1 | 0 | 0 |
| 5 | 2 | 6 | 0 |
| 5 | 3 | 5 | 0 |
| 5 | 4 | 0 | 0 |
| 5 | 5 | 1 | 0 |
| 5 | 6 | 8 | 0 |
| 5 | 7 | 0 | 10 |
| 5 | 8 | 2 | 6 |
| 5 | 9 | 0 | 8 |
| 5 | 10 | 0 | 0 |
| 6 | 1 | 0 | 0 |
| 6 | 2 | 0 | 0 |
| 6 | 3 | 0 | 4 |
| 6 | 4 | 0 | 0 |
| 6 | 5 | 0 | 0 |
| 6 | 6 | 0 | 0 |
| 6 | 7 | 1 | 0 |
| 6 | 8 | 0 | 0 |
| 6 | 9 | 0 | 7 |

| | | | |
|----|----|----|----|
| 6 | 10 | 0 | 0 |
| 7 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | 2 | 0 | 0 |
| 7 | 3 | 9 | 2 |
| 7 | 4 | 0 | 0 |
| 7 | 5 | 8 | 0 |
| 7 | 6 | 0 | 4 |
| 7 | 7 | 1 | 0 |
| 7 | 8 | 2 | 0 |
| 7 | 9 | 7 | 10 |
| 7 | 10 | 0 | 3 |
| 8 | 1 | 2 | 0 |
| 8 | 2 | 3 | 3 |
| 8 | 3 | 0 | 5 |
| 8 | 4 | 0 | 0 |
| 8 | 5 | 0 | 0 |
| 8 | 6 | 0 | 3 |
| 8 | 7 | 0 | 0 |
| 8 | 8 | 0 | 3 |
| 8 | 9 | 10 | 0 |
| 8 | 10 | 0 | 0 |
| 9 | 1 | 0 | 0 |
| 9 | 2 | 0 | 10 |
| 9 | 3 | 0 | 0 |
| 9 | 4 | 0 | 0 |
| 9 | 5 | 0 | 0 |
| 9 | 6 | 5 | 0 |
| 9 | 7 | 1 | 0 |
| 9 | 8 | 0 | 2 |
| 9 | 9 | 0 | 9 |
| 9 | 10 | 0 | 1 |
| 10 | 1 | 0 | 2 |
| 10 | 2 | 0 | 0 |
| 10 | 3 | 1 | 0 |
| 10 | 4 | 8 | 0 |
| 10 | 5 | 0 | 0 |
| 10 | 6 | 0 | 5 |
| 10 | 7 | 0 | 0 |
| 10 | 8 | 0 | 0 |
| 10 | 9 | 0 | 0 |
| 10 | 10 | 4 | 0 |

Tabela 34 - Parâmetro de capacidade do teste simplificado

| K_{tp} | | |
|-----------------------|------------|------------|
| t | p=1 | p=2 |
| 1 | 70 | 90 |
| 2 | 70 | 90 |
| 3 | 70 | 90 |
| 4 | 70 | 90 |
| 5 | 70 | 90 |

Tabela 35 - Parâmetro Y do teste simplificado

| | | Y_{ijt} | | | | |
|----------|----------|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| i | j | t=1 | t=2 | t=3 | t=4 | t=5 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 5 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 9 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 3 | 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 8 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 10 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |

| | | | | | | |
|---|----|---|---|---|---|---|
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 4 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 9 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 5 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 6 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 7 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 5 | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 9 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 8 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 6 | 10 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 7 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 7 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 8 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 8 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 8 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| | | | | | | |
|----|----|---|---|---|---|---|
| 8 | 5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 8 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 8 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 8 | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 8 | 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 8 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 5 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 6 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 9 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 9 | 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 9 | 10 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 10 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 10 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 6 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 10 | 7 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 10 | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 9 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tabela 36 - Resultado de volume do teste simplificado

| i | j | t | p | V_{ijtp} |
|----|----|---|---|------------|
| 9 | 2 | 1 | 2 | 10 |
| 8 | 9 | 1 | 1 | 10 |
| 7 | 9 | 1 | 2 | 10 |
| 5 | 7 | 5 | 2 | 10 |
| 4 | 7 | 3 | 2 | 10 |
| 4 | 6 | 4 | 1 | 10 |
| 2 | 3 | 1 | 2 | 10 |
| 1 | 9 | 1 | 1 | 10 |
| 9 | 9 | 2 | 2 | 9 |
| 7 | 3 | 5 | 1 | 9 |
| 2 | 10 | 4 | 2 | 9 |
| 2 | 1 | 5 | 2 | 9 |
| 1 | 1 | 4 | 1 | 9 |
| 10 | 4 | 5 | 1 | 8 |

| | | | | |
|----|----|---|---|----------|
| 7 | 5 | 5 | 1 | 8 |
| 5 | 9 | 4 | 2 | 8 |
| 5 | 6 | 5 | 1 | 8 |
| 4 | 8 | 3 | 2 | 8 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 8 |
| 2 | 8 | 5 | 2 | 8 |
| 1 | 1 | 4 | 2 | 8 |
| 7 | 9 | 4 | 1 | 7 |
| 6 | 9 | 4 | 2 | 7 |
| 2 | 5 | 5 | 2 | 7 |
| 5 | 8 | 3 | 2 | 6 |
| 5 | 2 | 3 | 1 | 6 |
| 4 | 5 | 1 | 1 | 6 |
| 10 | 6 | 3 | 2 | 5 |
| 9 | 6 | 4 | 1 | 5 |
| 8 | 3 | 4 | 2 | 5 |
| 5 | 3 | 5 | 1 | 5 |
| 2 | 3 | 4 | 1 | 5 |
| 10 | 10 | 3 | 1 | 4 |
| 7 | 6 | 4 | 2 | 4 |
| 6 | 3 | 4 | 2 | 4 |
| 4 | 4 | 3 | 1 | 4 |
| 2 | 7 | 1 | 2 | 4 |
| 8 | 8 | 4 | 2 | 3 |
| 8 | 6 | 5 | 2 | 3 |
| 8 | 2 | 4 | 2 | 3 |
| 8 | 2 | 4 | 1 | 3 |
| 7 | 10 | 4 | 2 | 3 |
| 4 | 2 | 4 | 2 | 3 |
| 4 | 1 | 4 | 2 | 3 |
| 3 | 4 | 2 | 1 | 3 |
| 2 | 9 | 1 | 2 | 3 |
| 10 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 9 | 8 | 4 | 2 | 2 |
| 8 | 1 | 5 | 1 | 2 |
| 7 | 8 | 4 | 1 | 2 |
| 7 | 3 | 4 | 2 | 2 |
| 5 | 8 | 3 | 1 | 2 |
| 4 | 10 | 3 | 2 | 2 |
| 3 | 10 | 3 | 1 | 2 |
| 3 | 7 | 3 | 1 | 2 |
| 3 | 6 | 3 | 1 | 2 |
| 1 | 9 | 1 | 2 | 2 |
| 1 | 8 | 4 | 2 | 2 |

| | | | | |
|----|----|---|---|----------|
| 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 10 | 3 | 5 | 1 | 1 |
| 9 | 10 | 2 | 2 | 1 |
| 9 | 7 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 7 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 5 | 2 | 1 |
| 6 | 7 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 5 | 4 | 1 | 1 |
| 4 | 5 | 1 | 2 | 1 |
| 3 | 10 | 4 | 2 | 1 |
| 3 | 4 | 2 | 2 | 1 |

APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO NO CPLEX

```

*****  

* OPL 12.7.1.0 Model  

* Author: Rodrigo Redenschi  

* Creation Date: 19/05/2017 at 14:08:00  

*****  

//Problema de alocação de rotas à transportadoras terceirizadas de modo a  

atender a demanda, respeitando a capacidade de transporte  

//Objetivo é minimizar o custo de transporte total  

//intervalos de dados  

int i=...;           //origem  

int j=...;           //destino  

int t=...;           //transportadora  

int p=...;           //produto  

range origem=1..i;  

range destino=1..j;  

range transportadora=1..t;  

range produto=1..p;  

//parâmetros do modelo  

int      Min_transp=...;  

//Número mínimo de transportadoras  

float    C[origem][destino][transportadora][produto]=...;  

//custo do transporte do produto p pela transportadora t de i para j  

//(R$/m³)  

float    D[origem][destino][produto]=...;  

//demanda do produto p em j (m³)  

float    K[transportadora][produto]=...;  

//capacidade da transportadora t para o produto p (m³)  

int    Y[origem][destino][transportadora]=...;  

//se a transportadora t pode realizar a rota i->j (binário: 1 se sim  

//0 se não)  

float    Max_Transp_O[origem]=...;  

//número máximo de transportadoras que podem trabalhar com a origem i  

float    Max_Transp_D[destino]=...;  

//número máximo de transportadoras que podem trabalhar com o destino j

```

```

int          M = 10000000;
//BIG M

//variáveis de decisão

dvar float+    V[origem][destino][transportadora][produto];
//Volume transportado do produto p pela transportadora t de i para j
(m³)

dvar boolean    T[transportadora];
//Boolean, 1 se a transportadora t tem alguma rota, e 0 se não tem
nenhuma rota

dvar boolean    TR0[origem][transportadora];
//Boolean, 1 se a transportadora t realiza alguma rota i->N, 0 caso
contrário

dvar boolean    TRD[destino][transportadora];
//Boolean, 1 se a transportadora t realiza alguma rota N->j, 0 caso
contrário

//função objetivo - Minimização de custo de transporte (1)

minimize sum(i in origem, j in destino, t in transportadora, p in
produto) C[i][j][t][p] * V[i][j][t][p];

//restrições do modelo

subject to {

restricao2: //restrição de atingir a demanda
forall (i in origem, j in destino, p in produto)
    sum (t in transportadora) V[i][j][t][p] >= D[i][j][p];

restricao3: //restrição de capacidade
forall (t in transportadora, p in produto)
    sum (i in origem, j in destino) V[i][j][t][p] <= K[t][p];

restricao4: //restrição que relaciona V com y
forall (i in origem, j in destino, t in transportadora)
    sum (p in produto) V[i][j][t][p] <= Y[i][j][t] * M;

restricao5: //restrição que relaciona V com T
forall (t in transportadora)
    sum (i in origem, j in destino, p in produto) V[i][j][t][p] >=
T[t];

restricao6: //restrição que relaciona V com T
forall (t in transportadora)
    sum (i in origem, j in destino, p in produto) V[i][j][t][p] <=
T[t] * M;
}

```

```

restricao7: //restrição que define o número mínimo de transportadoras
    sum (t in transportadora) T[t] >= Min_transp;

restricao8: //restrição que relaciona TRO com V
forall (i in origem, t in transportadora)
    sum (j in destino, p in produto) V[i][j][t][p] >= TRO[i][t];

restricao9: //restrição que relaciona TRO com V
forall (i in origem, t in transportadora)
    sum (j in destino, p in produto) V[i][j][t][p] <= TRO[i][t]*M;

restricao10: //restrição que relaciona TRD com V
forall (j in destino, t in transportadora)
    sum (i in origem, p in produto) V[i][j][t][p] >= TRD[j][t];

restricao11: //restrição que relaciona TRD com V
forall (j in destino, t in transportadora)
    sum (i in origem, p in produto) V[i][j][t][p] <= TRD[j][t] * M;

restricao12: //restrição que limita o número máximo de
transportadoras em uma origem
forall (i in origem)
    sum (t in transportadora) TRO[i][t] <= Max_Transp_O[i];

restricao13: //restrição que limita o número máximo de
transportadoras em um destino
forall (j in destino)
    sum (t in transportadora) TRD[j][t] <= Max_Transp_D[j];

};

// FIM DO MODELO

```