ANDRÉ ALARCON DE ALMEIDA PRADO

**MODELAGEM DO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO/ROTEIRIZAÇÃO
PARA O TRANSPORTE DE CARGA FRACIONADA**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Ciências

São Paulo

2017

ANDRÉ ALARCON DE ALMEIDA PRADO

**MODELAGEM DO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO/ROTEIRIZAÇÃO
PARA O TRANSPORTE DE CARGA FRACIONADA**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Ciências

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Prof. Dr. Nicolau Dionísio Fares Gualda

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 23 de janeiro de 2017

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

FICHA CATALOGRÁFICA

PRADO, ANDRÉ ALARCON DE ALMEIDA
MODELAGEM DO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO/ROTEIRIZAÇÃO PARA
O TRANSPORTE DE CARGA FRACIONADA / A. A. D. A. PRADO -- versão
corr. -- São Paulo, 2017.
244 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Problema da Localização/Roteirização 2.Projeto de Redes 3.Transportes
de Carga Fracionada 4.Logística I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

Para meus amores, Catharina e João Vicente.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Sandra que mostrou através de atos que com amor, esforço pessoal, autoconfiança e dedicação tudo que realmente é relevante pode ser alcançado.

Ao meu pai Vicente, *in memoriam*, que me fez ter amor pelo estudo, compromisso e retidão de caráter.

Ao professor Gualda pelos seus ensinamentos, confiança e por ter me apoiado quando tanto precisava.

Aos professores Barbieri e Brinati por todos os ensinamentos durante meu período na USP e pela oportunidade dada em contribuir com esse trabalho.

A Atlas Transportes e Logística, e especialmente ao Fran e Lauro Neto, por acreditar na importância do aprimoramento acadêmico para o desenvolvimento deste país e por me proporcionarem totais condições para desenvolver este trabalho.

Ao Laboratório de Planejamento e Operação de Transporte (LPT) pelo convívio, discussões e aprendizado.

Ao Doutor Wagner Gomes pela programação no Gurobi e discussões e ao mestrando Leandro Meili, Rodolfo Farias e Rodrigo Pires pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho, principalmente, na programação do *Supply Chain Guru*.

A todos que participaram dos estudos de caso, ou que, direta e indiretamente colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

As localizações dos terminais e as rotas de entrega que partem desses terminais são decisões importantes que surgem na concepção de redes de transporte de carga fracionada. Nesses casos, dois problemas independentes precisam ser tratados: o problema da localização de instalações (LAP) e o problema da roteirização dos veículos (VRP). Este trabalho apresenta um modelo matemático para resolver o LAP e o VRP de forma integrada, ou seja, para a resolução do problema de Localização/Roteirização (Location Routing Problem – LRP). De acordo com a literatura, a abordagem integrada do LRP fornece melhores resultados do que a solução do LAP e do VRP separadamente. O modelo foi testado e aplicado em um caso real de *Many-to-Many* com Múltiplos elos LRP, respeitou as restrições e o nível de serviço exigido e propiciou melhoria nos resultados para a empresa de transporte no qual foi aplicado. Os resultados do modelo também foram melhores do que os resultados apresentados por um *software* líder de mercado.

Palavras-chave: Problema da Localização/Roteirização. Projeto de Redes. Transporte de Carga Fracionada. Logística.

ABSTRACT

In the Less Than Truck Load (LTL) operations both the location of facilities and the routing of vehicles are important decisions for the optimal design of the related logistics network. Two interdependent problems arise: the Location Allocation Problem (LAP) and the Vehicle Routing Problem (VRP). This paper presents a mathematical model to solve the LAP and the VRP simultaneously on an integrated way, such as the so-called Location-Routing Problem (LRP). According to the literature the LRP integrated approach provides better results than considering the LAP and the VRP separately. The model was tested and applied to a real case of Many-to-Many with Multi-Echelons LTL Location-Routing Problem respecting the constraints and the required service level standard and provided better results for the company in which it was tested. The model results also were better than the results presented by market-leading software.

Keywords: Location Routing Problem. Network Design. LTL Transport. Logistics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição da população absoluta do Brasil em 2010, IBGE	20
Figura 2 – Terminais de uma empresa de transporte de carga fracionada do Brasil, Atlas (2014)	21
Figura 3 – Esquema padrão de transporte de carga fracionada.....	26
Figura 4 – Evolução da complexidade operacional no transporte de carga fracionada.....	27
Figura 5 – Exemplo de rede de transporte de carga fracionada com transporte entre empresas.....	30
Figura 6 – Etapas do modelo operacional no exemplo de rede.....	30
Figura 7 – Exemplo de resultado de revisão de rede.	31
Figura 8 – Etapas do modelo operacional no exemplo de resultado de revisão de rede.	31
Figura 9 – Representação do equilíbrio descrito na restrição 13 em um terminal	97
Figura 10 – Exemplo de um arquivo LP do Gurobi.....	98
Figura 11 – Fluxograma do método de solução utilizado para interação com o Gurobi.....	99
Figura 12 – Conversão das Restrição 8 para o Formato LP.....	100
Figura 13 – Configuração da instância de teste.	106
Figura 14 – Configurações do computador utilizado na instância de teste.....	107
Figura 15 – Visão geral dos resultados obtidos pelo modelo aplicado na instância de teste.....	109
Figura 16 – Visão geral do fluxo de atendimento do Embarcador 1 aos seus destinatários.	110
Figura 17 – Visão geral do fluxo de atendimento do Embarcador 2 aos seus destinatários.	111
Figura 18 – Processo de Modelagem da Aplicação Prática.	121
Figura 19 – Transcrição das informações práticas em dados para as ferramentas de Otimização.	122
Figura 20 – Plano de trabalho dos terminais.	133
Figura 21 – Distâncias entre terminais e destinatários.	135

Figura 22 – Distâncias entre destinatários para formação de rotas.....	136
Figura 23 – Definição dos candidatos a <i>hub</i> em acordo com critérios pré- definidos.	137
Figura 24 – Plano de trabalho dos terminais para as entregas em Barueri.....	138
Figura 25 – Exemplo de progresso de busca através da metodologia <i>branch- and-cut</i>	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos sobre problemas Multi-elos LRP e <i>Many-to-Many</i> LRP	76
Tabela 2 – Atendimento às restrições de capacidade de processamento nos terminais.....	112
Tabela 3 – Atendimento às restrições dos conhecimentos de transporte emitidos.....	113
Tabela 4 – Validação dos custos	113
Tabela 5 – Resultados das instâncias devido as variações no número de produtos e veículos	115
Tabela 6 – Peso e Jurisdições dos principais municípios do Estado de São Paulo	123
Tabela 7 – Fluxos de Carga entre Terminais.....	130
Tabela 8 – Custos por atividade no <i>Supply Chain Guru</i>	131
Tabela 9 – Custos obtidos na Aplicação Prática.....	139
Tabela 10 – Custos operacionais vigentes por atividade.....	140
Tabela 11 – Analise comparativa de custos	141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B2B – *Business to Business (Negócios entre empresas)*

B2C – *Business to Client (Negócios entre empresas e consumidores finais)*

COURIER – *(Serviço de entrega expressa de pequenas encomendas)*

CROSS-DOCKING – *(Transferência de cargas recebidas em um terminal para a distribuição sem etapas de armazenagem)*

EDI - *Electronic Data Interchange (Troca Eletrônica de Dados)*

HUB – *Centro de Consolidação*

KPI - *Key Performance Indicator (Indicador de Performance)*

LAP – *Location Allocation Problem (Problema da Alocação dos Terminais)*

LP – *Linear Programming (Programação Linear)*

LRP – *Location Routing Problem (Problema da Localização/Roteirização)*

LTL - *Less than Truckload (Transporte de Carga Fracionada)*

NLP - *Network Loading Problem (Problema do Fluxo de Carga)*

OR - *Operational Research (Pesquisa Operacional)*

OTIF - *On Time In Full (Entregas Perfeitas no Prazo)*

PGR – *Programa de Gerenciamento de Risco*

POSTAL SERVICE - *(Serviço de entrega postal, normalmente, regulado pelo governo)*

SCG – *Supply Chain Guru (Software de revisão de rede)*

SPOKE – *Ponto de destino*

TCO - *Total Cost of Ownership (Custo Total de Apropriação)*

TL - *Truckload (Transporte Lotação)*

TS – *Tabu Search (Busca Tabú)*

VNS – *Variable Neighborhood Search (Busca em Vizinhança Variável)*

VRP - *Vehicle Routing Problem (Problema de Roteirização de Veículos)*

SUMÁRIO

	DEDICATÓRIA.....	3
	AGRADECIMENTOS	4
	RESUMO.....	5
	ABSTRACT.....	6
	LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	7
	LISTA DE TABELAS	9
	LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	10
	SUMÁRIO	11
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	RELEVÂNCIA DO TEMA.....	14
1.2	OBJETIVOS	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	18
2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	19
2.1	CONCLUSÃO DA CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	33
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
3.1	INTRODUÇÃO	34
3.2	LOCATION ROUTING PROBLEM (LRP)	35
3.3	TIPOS ESPECIAIS DE LRP	45
3.4	MODELOS LRP	56
3.4.5	<i>Modelos Heurísticos Hierárquicos.....</i>	<i>71</i>
3.5	CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	74
4	MODELAGEM.....	81
4.1	INTRODUÇÃO	81
4.2	PREMISSAS.....	85
4.3	MODELO PROPOSTO	87
4.3.1	<i>Conjuntos</i>	<i>87</i>
4.3.2	<i>Parâmetros.....</i>	<i>88</i>
4.3.3	<i>Variáveis de Decisão Binárias.....</i>	<i>88</i>

4.3.4	<i>Variáveis de Decisão Reais</i>	89
4.3.5	<i>Formulação Matemática</i>	89
4.4	MODELO NA LITERATURA E INOVAÇÕES	94
4.5	PROGRAMAÇÃO NO GUROBI	98
4.6	ÁREAS DE APLICAÇÃO	100
4.7	CONCLUSÃO DA METODOLOGIA	102
5	TESTES DO MODELO	104
5.1	INTRODUÇÃO	104
5.2	VALIDAÇÕES.....	106
5.2.1	<i>Resultados</i>	108
5.2.2	<i>Validação dos resultados – alocação de recursos e fluxos de carga</i>	109
5.2.3	<i>Validação dos resultados – atendimento as restrições</i>	111
5.2.4	<i>Validação dos resultados – custos</i>	113
5.3	INSTÂNCIAS COMPLEMENTARES	114
5.4	CONCLUSÃO DOS TESTES	116
6	APLICAÇÃO PRÁTICA	117
6.1	AMBIENTE DA APLICAÇÃO PRÁTICA	117
6.2	PROCESSO DE MODELAGEM	119
6.3	SUPPLY CHAIN GURU (SCG).....	127
6.3.1	<i>Aplicação do Supply Chain Guru</i>	128
6.3.2	<i>Resultados</i>	129
6.4	MODELO PROPOSTO	131
6.4.1	<i>Aplicação do Modelo Proposto</i>	131
6.4.2	<i>Resultados</i>	137
6.5	CUSTOS OPERACIONAIS VIGENTES	140
6.6	ANÁLISE COMPARATIVA	141
6.7	CONCLUSÃO DA APLICAÇÃO PRÁTICA	143
7	CONCLUSÃO E EXTENSÕES	144
7.1	INTRODUÇÃO	144
7.2	CONTRIBUIÇÕES.....	145
7.3	RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS ESTUDOS	147
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

APÊNDICE A	163
A.1 DESEMPENHO GUROBI	163
A.2 PARÂMETROS	167
A.3 RESULTADOS	206
A.4 VALIDAÇÃO DOS FLUXOS DE COLETA E ENTREGA	219
A.5 VALIDAÇÃO DOS FLUXOS DE TRANSFERÊNCIA.....	222
A.6 ROTAS DE ENTREGA	223
A.7 CONHECIMENTOS DE TRANSPORTE ENTREGUES EM MAIS DE UM VEÍCULO	229
APÊNDICE B	230
B.1 OPTIMIZATION OUTPUT INTER FACILITY	230
B.2 OPTIMIZATION OUTPUT FACILITY.....	232
B.3 OPTIMIZATION OUTPUT CUSTOMER FLOWS	234
B.4 OPTIMIZATION OUTPUT TRANSPORTATION	236
B.5 VALIDAÇÃO DOS ROTAS DE ENTREGA.....	238
APÊNDICE C	242

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

As relações entre as atividades dentro da cadeia logística devem garantir os níveis de serviço esperados, buscando sempre uma redução nos custos logísticos. Portanto, o desempenho de um sistema de transporte tem importância primordial nos resultados logísticos, bem como a localização dos terminais e a distribuição dos produtos (GUERRA ET AL., 2007).

Determinar onde localizar os terminais e de que forma será estruturada a distribuição dos produtos aos destinatários são decisões importantes que surgem na concepção de redes logísticas. Na prática, os produtos são distribuídos a partir dos terminais de duas maneiras principais (GUERRA ET AL., 2007):

- Cada veículo serve apenas um, ou muito poucos embarcadores ou destinatários entre origem e destino no fluxo normal ou na logística reversa. Este sistema é denominado como lotação ou *TL (truckload)* ou *FTL (full truckload)*;
- Embarcadores e/ou destinatários compartilham um mesmo veículo. Este sistema é denominado como transporte de carga fracionada ou *LTL (less than truckload)*.

O transporte de carga fracionada tem-se tornado uma importante alternativa para que as indústrias, comércios e serviços possam atingir os seus clientes. Através da consolidação de cargas originadas de diversos embarcadores presentes nestas indústrias, comércios e serviços, os prestadores de serviços logísticos e os embarcadores, desde que trabalhando de forma colaborativa, buscam estruturar seus sistemas de transporte de uma forma eficaz e eficiente.

Por consequência, para esses prestadores de serviços logísticos ou grupo de embarcadores, as decisões de onde localizar seus terminais e como distribuir os produtos a partir desses terminais são fundamentais na realização da eficiência e eficácia nos sistemas de transporte.

Para que essas decisões sejam tomadas, os custos de coleta, transferência e entrega dependem dos terminais envolvidos e das rotas percorridas pelos veículos. Nestes casos, a localização dos terminais e as rotas que partem destes terminais são interdependentes e devem ser otimizados em conjunto.

Essa referida otimização tem como objeto de análise um conjunto de rotas de entrega onde se pode considerar que a função objetivo deve minimizar o número de veículos utilizados e a distância total percorrida por cada veículo, desde o terminal de origem até o terminal de destino, buscando a solução ótima do referido problema (AKCA ET AL., 2009).

Para que seja possível revisar uma rede de transporte de carga fracionada, em nível de decisão estratégico, é necessário que as decisões de localização dos terminais e a alocação dos embarcadores e destinatários nesses terminais sejam corretamente tomadas no horizonte de longo prazo, pois os custos envolvidos são altos e diversos fatores são resultantes dessa decisão.

A gestão comercial dos envolvidos, a sincronização com a rede de fornecedores de serviços de apoio, as normas definidas nos programas de gerenciamento de risco (GR), a complexidade de se alterar um terminal e a quantidade e capacidade de seus veículos são alguns dos principais fatores estratégicos críticos nestas decisões e inviabilizam que alterações na rede sejam realizadas frequentemente.

Entretanto, as redes de transporte devem ser otimizadas em uma frequência viável, pois os custos associados ao transporte e demais itens da logística são muitas vezes mais de um quarto dos custos totais de uma empresa (KISPERSKA-MORON E KRZYZANIAK, 2009).

A Associação Brasileira da Logística estima que aproximadamente 13% da receita das empresas brasileiras está comprometida com o custo logístico e que esse custo seria equivalente a 12% do Produto Interno Bruto (ABRALOG, 2014).

Sendo assim, parece conclusivo que os custos de transporte devem ser considerados de forma significativa na gestão de um negócio, conforme Dima e Man (2013), principalmente em um país como o Brasil, que tem custos logísticos relevantes e uma operacionalização de transporte complexa, devido à sua extensão continental e à sua dispersão populacional.

A proposta de revisão de uma rede de transporte de carga fracionada tem como objetivo buscar os menores custos possíveis e níveis de serviço iguais ou superiores aos acordados. Sendo assim, para que essas decisões sejam executadas de forma racional, faz-se necessário resolver os seguintes problemas da classe NP-Hard presentes na literatura, a saber:

- *Location Allocation Problem* (LAP), que define a localização dos terminais;
- *Vehicle Routing Problem* (VRP), que define como serão criadas rotas a partir desses terminais.

Frente a essas decisões estratégicas fundamentais em uma operação de transporte de carga fracionada, este trabalho trata o desenvolvimento de um modelo matemático capaz de otimizar uma rede existente, ou de suportar a criação de uma nova rede, através da resolução dos problemas LAP e VRP de forma integrada. Esse tipo de solução é denominado na literatura por “*Location Routing Problem*”.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta tese de doutorado é modelar e resolver o problema da localização/roteirização (*Location Routing Problem* – LRP) de transporte de carga fracionada, possibilitando o tratamento conjunto dos problemas de localização de terminais e roteirização de veículos em revisões estratégicas de redes.

Sem prejuízo da aplicação do modelo em outras situações, serão consideradas principalmente as condições de operacionalização e restrições existentes no mercado brasileiro para empresas de transporte de carga fracionada de grande porte, com perfil de clientes com negócios entre empresas (*B2B*).

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Identificar na literatura especializada a utilização da abordagem LRP e seus modelos existentes;
- Discutir os tipos especiais de LRP que caracterizem o transporte de carga fracionada;
- Apresentar conceitualmente a abordagem adotada;
- Propor um processo de modelagem para o problema considerado;
- Desenvolver um modelo que descreva corretamente a estrutura do problema prático, pois, conforme Prodhon e Prins (2014), esse tipo de trabalho ainda não foi explorado a contento na literatura;
- Este modelo precisa se adaptar às características do problema analisado; sendo assim, deve contribuir com o estudo de problemas *Many-to-Many* com múltiplos elos LRP;
- A solução deve ser economicamente viável, ter fácil aplicação prática, melhorar a relação entre nível de serviço e custos frente às atuais soluções existentes e contribuir para o estado da arte na resolução deste tipo de problema;
- Discutir os resultados obtidos e possíveis ganhos por meio de análise comparativa com o modelo operacional atual e com os resultados obtidos através da aplicação de um *software* de mercado;

Este trabalho, portanto, tem como contribuição o desenvolvimento de um modelo para revisão estratégica de redes de transporte de carga fracionada, com foco em empresas de grande porte, visando à operação mais eficaz e eficiente de coletas, transferências e entregas, que propiciem uma melhor rentabilidade para essas empresas, respeitando as restrições operacionais existentes e os níveis de serviço acordados com seus clientes.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** discussão sobre o objeto de estudo, sua relevância e apresentação dos objetivos do trabalho;
- **Capítulo 2:** caracterização do problema abordado, explicitando seus aspectos fundamentais e as considerações gerais sobre o mercado onde está inserido;
- **Capítulo 3:** revisão bibliográfica da utilização da abordagem LRP e sua aplicação em problemas de transporte de carga fracionada. Inclui a evolução histórica do desenvolvimento científico sobre este assunto, os modelos existentes e sua amplitude de utilização;
- **Capítulo 4:** apresentação do modelo conceitual utilizado, incluindo premissas, aplicabilidade, benefícios e potencialidades da ferramenta frente às outras alternativas de modelagem;
- **Capítulo 5:** descrição do teste da viabilidade da aplicação do modelo ao problema existente;
- **Capítulo 6:** aplicação prática do modelo no problema, comparação dos resultados com um *software* de mercado e com os custos na empresa no momento em que o modelo foi aplicado;
- **Capítulo 7:** conclusão do estudo, suas principais contribuições, limitações, possibilidades de aplicações futuras e extensões.

2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Entre as opções utilizadas pelos embarcadores no mercado de transporte de carga, se houver uma consolidação de carga próxima à capacidade do veículo para um único destino ou destinos próximos, o modelo lotação (FTL) deve-se mostrar mais atrativo. Entretanto, existe também a opção pelo transporte de carga fracionada (LTL) quando não ocorre a consolidação de carga necessária para o modelo lotação em tempo hábil.

Normalmente, a opção pelo transporte fracionado é economicamente viável quanto maior for o fracionamento das cargas em termos de número de destinatários e quanto maior for a dispersão desses destinatários em termos de distâncias percorridas até a entrega, pois maior será a ociosidade do veículo de transporte por quilômetro percorrido em um transporte lotação e, conseqüentemente, maior o desperdício financeiro neste tipo de operação.

Outro aspecto a ser ponderado em uma análise econômica é o valor agregado do produto. Quanto maior o valor agregado do produto, geralmente, menor são os estoques reguladores nas etapas de distribuição. Essa redução no estoque regulador acontece porque os agentes buscam racionalizar seus custos de manutenção de estoque. Essa conseqüente redução de estoque nas etapas logísticas obriga que esses envios de carga se realizem em menores lotes, o que mais uma vez favorece o transporte de carga fracionada.

O transporte de carga fracionada é preponderante em alguns tipos de mercados, ou segmentos específicos destes mercados, dentre os quais se destacam: farmacêutico, peças de reposição, vestuário, informática, eletroeletrônicos, comércio eletrônico e demais segmentos que trabalham com produtos de alto valor agregado ou com a necessidade de um melhor nível de serviço em termos de prazos de entrega.

Para que o transporte de carga fracionada se justifique, devem existir diversas origens e destinos diferentes compartilhando o mesmo sistema de transporte porque, em caso contrário, apenas novas etapas de *cross-docking* seriam incluídas no processo. Sendo assim, este tipo de transporte é realizado na maioria das vezes por operadores logísticos ou processos de logística colaborativa entre diferentes embarcadores, conforme se observa no mercado de transporte nacional.

Esse compartilhamento do sistema de transporte mostra-se economicamente viável no atendimento de regiões com menor concentração populacional. Tal fato pode ser comprovado pelo número de empresas globais e nacionais que optam por esse tipo de serviço nas regiões com as características citadas.

No Brasil, as grandes dimensões geográficas e a dispersão populacional também contribuem pela escolha do transporte fracionado em detrimento ao transporte lotação. A Figura 1 mostra a distribuição da população brasileira e a Figura 2 mostra a localização dos terminais de distribuição de uma das maiores empresas de transporte rodoviário de carga fracionada do Brasil.

Figura 1 - Distribuição da população absoluta do Brasil em 2010, IBGE

Figura 2 – Terminais de uma empresa de transporte de carga fracionada do Brasil, Atlas (2014)

Evidencia-se a similaridade entre a localização dos terminais da empresa de transporte e a concentração populacional. Isso acontece, pois nos centros com maior densidade populacional existe um maior número de coletas e entregas e, consequentemente, a necessidade de que terminais sejam instalados nesses locais.

Entretanto, o percentual de escolha do transporte de carga fracionada por parte dos embarcadores é ainda maior nas regiões onde a concentração populacional não é grande, pois devem existir um menor volume e uma menor frequência de cargas para esses destinos, o que dificulta ainda mais a consolidação de embarques.

A Comissão do Comércio Interestadual dos Estados Unidos (ICC) define um limite de peso de 10.000 libras, ou 4.536 kg, para que um conhecimento de transporte seja definido como carga fracionada, conforme ICC (2014). Entretanto, em termos de mercado brasileiro, tal classificação pode ser considerada subjetiva.

Em rotas de transferência definidas neste trabalho como curtas, até 500 quilômetros, esse número faz bastante sentido, pois veículos de menor capacidade podem fazer o transporte lotação.

Entretanto, em rotas de transferência longas (acima de 1.500 quilômetros) as condições das vias no Brasil dificultam que o transporte seja realizado por veículos de menor capacidade, conduzindo o transporte para veículos de grande porte. Tal fato exige que exista uma maior consolidação de cargas, o que favorece o transporte fracionado pela referida restrição.

Para que seja possível a viabilização da referida consolidação de cargas é importante considerar que os veículos no transporte rodoviário de carga fracionada são, normalmente, limitados em quantidade por terminal e divididos pelas atividades realizadas, ou seja, existem veículos que coletam nos embarcadores, veículos que transferem as cargas entre os terminais e veículos que entregam as cargas diretamente para os destinatários, em rotas que estão contidas e limitadas à rede proposta. Existem restrições no carregamento destes veículos, que são geradas pelo perfil de carga dos embarcadores e pelas combinações dessas cargas durante as consolidações que ocorrem na operação. Sendo assim, os carregamentos são limitados por:

- **Peso:** O conjunto de transporte (cavalo mecânico e carreta) tem uma capacidade de carregamento em toneladas;
- **Volume:** O baú (carreta) tem uma capacidade volumétrica de carregamento em metros cúbicos;
- **Valor:** Devido às apólices de seguro e PGR's em vigor junto aos embarcadores, existe um limite de valor financeiro permitido para o carregamento do veículo.

O objetivo da consideração de cubagem no transporte é garantir que a ocupação volumétrica do espaço físico do veículo seja avaliada de forma conjunta com a sua capacidade em peso e valor.

A NTC&Logística (2014) sugere que as taxas básicas por tonelada sejam calculadas considerando cargas cuja densidade permita ao veículo preencher a sua capacidade em peso bruto concomitantemente com a capacidade volumétrica.

Baseado nessa premissa convencionou-se, como padrão de cubagem do baú do modal rodoviário no Brasil, os valores de 27.000 kg e 90 m³. Por consequência, os produtos que tenham densidade maior ou igual a 300 kg/m³ não necessitam da consideração de cubagem e produtos com densidade inferior a 300 kg/m³ precisam do cálculo do peso cubado, conforme:

$$\text{Peso Cubado (kg)} = \text{Volume da Carga (m}^3\text{)} \times 300 \text{ kg/m}^3 \quad (1)$$

Em 2013, conforme amplamente divulgado pela mídia, o Brasil foi o país com o maior número de ocorrências de roubos de carga no mundo. Sendo assim, as restrições nos valores embarcados têm sido, a cada dia, mais comuns e rígidas.

Desta forma, analogamente ao conceito de peso cubado, propõe-se que se um veículo padrão possui 27 toneladas, 90 m³ de capacidade volumétrica e transporta um valor equivalente a R\$ 1.500.000,00, seja também aplicada a seguinte fórmula de cálculo:

$$\text{Peso Cubado por Valor (kg)} = \text{Valor da Carga (R\$)} / 55,555 \text{ (R\$/kg)} \quad (2)$$

Portanto, caso o valor por quilograma do produto seja superior a R\$ 55,555, sugere-se aplicar o valor de cubagem proposto.

Concluindo, entende-se que a utilização como Peso no transporte rodoviário de carga fracionada deve ser o valor mais restritivo apresentado nas restrições, ou seja, o que for maior entre Peso Real, Peso Cubado e Peso Cubado por Valor.

$$\text{Peso} = \text{Maior (Peso Real, Peso Cubado e Peso Cubado por Valor)} \quad (3)$$

Não é apenas no peso definido como carga fracionada e na sua forma de controle que o Brasil tem diferenciação com os Estados Unidos e com a União Europeia. A distribuição por modal também é diferente no Brasil, onde o transporte rodoviário é relativamente mais preponderante.

Sendo assim, operações que globalmente são realizadas por outros modais, no Brasil também são realizadas pelo modal rodoviário. Um exemplo relevante são as operações fracionadas de distribuição que são realizadas pelo modal aéreo que, principalmente por custos e restrições operacionais, dividem embarques com o modal rodoviário.

Outro ponto relevante de análise é a sazonalidade. O Brasil tem uma característica histórica de comercialização muito peculiar, a concentração de vendas. Obviamente que essa concentração varia de segmento para segmento da economia, mas executivos globais se surpreendem com a característica de aquisição no Brasil que tem uma tendência forte de concentração dos pedidos em períodos específicos, normalmente, no fechamento do mês.

Se por um lado a concentração favorece o transporte lotação nos períodos de alta demanda, a mesma dificulta que os embarcadores estruturem seus próprios sistemas de transporte, pois existe falta de regularidade no volume transportado.

Portanto, enquanto nos períodos de alta demanda o transporte lotação pode ser a melhor alternativa, nos demais períodos do mês o transporte de carga fracionada acaba sendo a solução viável.

Outro fator restritivo, que neste caso afeta de forma relevante as empresas de transporte de carga fracionada no Brasil, são as diferenças nos fluxos de carga entre regiões. Enquanto as regiões Sudeste e Sul são grandes expedidores e receptores de produtos, as regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste têm uma característica consideravelmente mais receptora.

Essa falta de fluxo de cargas na ida e na volta sugere que as empresas de transporte tenham um pleno controle de custos de comercialização e uma especial atenção à relação entre o volume comercializado nos dois sentidos da carga, envio e retorno.

Por exemplo, se o volume transportado existente entre Recife e São Paulo for 50% menor do que o volume entre São Paulo e Recife, o sistema de custeio deveria considerar que o preço praticado entre São Paulo e Recife teria que absorver 50% dos custos de transferência existentes entre Recife e São Paulo. Tal premissa é verdadeira, porque normalmente é necessário que o veículo retorne à sua origem.

As referidas características do transporte de carga fracionada, quando não observadas, simplesmente inviabilizam esse tipo transporte no Brasil. Tal fato pode ser observado pelas repentinas mudanças no mercado de transporte, onde, das dez maiores empresas de transporte de carga fracionada do Brasil em 1995, apenas uma continuava entre as dez maiores vinte anos depois, pois as outras nove não existiam mais ou haviam sido adquiridas (NTC&LOGÍSTICA, 2014).

Nesta linha, existiram e existem casos de empresas globais com operações de transporte de carga fracionada rentáveis fora do Brasil e que não viabilizaram um sistema de transporte sustentável em suas operações domésticas, sendo que algumas delas também não operam mais em território nacional (HUERTAS, 2013).

Além das questões ligadas aos volumes e custos, existe outro fator preponderante na construção de uma rede de transporte de carga fracionada, que é o nível de serviço. Em diversos casos observa-se que sem a consideração do nível de serviço, seria possível aguardar uma consolidação de carga e produzir menores custos através do transporte lotação.

Entretanto, na maioria das vezes, os ciclos de entrega são curtos e precisa-se de comprometimento com os prazos firmados. Por consequência, devido aos prazos acordados entre embarcadores e destinatários, existe o foco dos gestores de transporte em antecipar o envio dos seus produtos para aumentar a confiabilidade no nível de serviço em questão.

Conforme resumidamente citado, pode-se detalhar que o modelo operacional do transporte de carga fracionada movimenta produtos de uma origem até o seu destino final através das seguintes etapas:

- Coletas nos embarcadores, partindo de um terminal de origem;
- *Cross-docking* no terminal de origem;
- Transferências de cargas entre dois ou mais terminais por veículos de grande porte dedicados (FTL);
- *Cross-docking* em centros de consolidação, quando aplicável;
- *Cross-docking* no terminal de destino;
- Entregas realizadas aos destinatários finais em rotas originadas no terminal de destino.

A Figura 3 mostra um esquema padrão de transporte de carga fracionada com um único embarcador, apenas dois terminais de *cross-docking* e um único destinatário.

Figura 3 – Esquema padrão de transporte de carga fracionada.

É possível observar que, quando comparado com o transporte dedicado, o transporte de carga fracionada possui um nível de complexidade maior, devido ao aumento de número de etapas logísticas e, principalmente, pela necessidade de consolidação de cargas entre diversos embarcadores.

A Figura 4 mostra esse aumento de complexidade quando se compara uma operação relativamente simples de uma manufatura atendendo a dois destinatários via distribuidor com a mesma operação sendo estruturada no transporte de carga fracionada. Nessa configuração genérica, a manufatura abastece o distribuidor e o distribuidor abastece os destinatários, utilizando o transporte de carga fracionada.

Figura 4 – Evolução da complexidade operacional no transporte de carga fracionada.

Entretanto, é importante notar que a manufatura e o distribuidor não têm seus processos logísticos alterados.

Por definição, os nós de uma rede de transporte de carga fracionada são representados e serão tratados por embarcadores (clientes da empresa de transporte), terminais (instalações ou filiais da empresa de transporte) e destinatários (clientes dos embarcadores).

Considerando a rede em questão, o estudo do *Location Allocation Problem* busca definir as localizações de um grupo de terminais viabilizando que o custo de transporte desses terminais para os destinatários seja minimizado e que um número ótimo de terminais seja alocado em uma área de interesse, desde que a demanda desses destinatários seja atendida. Este problema ocorre em muitos casos práticos onde esses terminais prestam serviços a terceiros, como armazéns, centros de distribuição e indústrias (AZARMAND E JAMI, 2009).

Um caso específico deste tipo de problema, *Hub-and-spoke Location Problem* pode ser genericamente definido como um *Location Allocation Problem*, que consiste em determinar o número de terminais de consolidação (*hub's*), suas localizações e a alocação dos destinatários (*spokes*) a estes terminais de consolidação, buscando minimizar o custo total, o qual é composto por custos fixos e variáveis (CUNHA E SILVA, 2007).

O *Hub-and-spoke Location Problem* é aderente a aplicações em problemas de transporte de carga fracionada, conforme observado pelos mesmos autores. Por ser um tipo específico do *Location Allocation Problem*, define corretamente parte dos objetivos deste trabalho, que busca determinar o número de terminais de consolidação a serem utilizados, suas localizações e os destinatários alocados a cada um dos terminais.

Outro problema a ser estudado concomitantemente neste trabalho é o *Vehicle Routing Problem*. Este problema consiste em encontrar um grupo de rotas de entrega simples de transporte, cada um correspondendo a um grupo de rotas de veículos com custo mínimo, definido como a soma dos custos destas rotas de entrega, onde segundo Eksioglu et al. (2009):

- Cada rota de entrega visita o terminal;
- Cada nó (embarcador ou destinatário) é visitado exatamente por uma única rota de entrega;

- As demandas dos nós (embarcadores ou destinatários) não podem exceder a capacidade dos veículos.

Desta forma, *Vehicle Routing Problem* consiste em encontrar um grupo de rotas de entrega para os veículos localizados em um terminal, garantindo que todos os nós são visitados e que os custos totais das rotas sejam minimizados (PILLAC ET AL., 2013). Essas rotas que foram definidas a partir de cada um dos terminais complementam os resultados a serem obtidos neste trabalho.

Objetivando detalhar quais devem ser esses resultados esperados com a aplicação de um modelo de revisão estratégica de rede, apresenta-se um exemplo fictício composto por uma estrutura de transporte de carga fracionada com três terminais.

O tipo de rede de transporte apresentado, Figura 5, trata do transporte de carga fracionada com coleta em grandes embarcadores, normalmente denominado pelo mercado como *B2B*, tendo como destinatários grandes empresas, distribuidores ou atacadistas. Normalmente, para esse perfil de carga, os veículos de coleta são dedicados e os veículos de entrega possuem alguns ou vários destinatários, ou seja, existe uma consolidação de cargas que posteriormente será entregue a diversos destinatários, através das rotas de entrega.

Define-se como grandes embarcadores aqueles que possuam demanda para coletas diárias e que essa coleta realizada se aproxime da capacidade de um veículo acordado para tal fim. Pequenos embarcadores seriam aqueles que não possuam constância na demanda por coletas ou que essa coleta a ser realizada possibilite o compartilhamento do veículo com outros embarcadores.

Na Figura 5, o Terminal 1 possui quatro embarcadores, o Terminal 2 possui três embarcadores e o Terminal 3 possui dois embarcadores. Esses embarcadores enviam cargas para 16 destinatários distintos e as etapas do modelo operacional de transporte de carga fracionada são mostradas na Figura 6.

Os nós dessa rede são todos os nove embarcadores dos Terminais 1, 2 e 3, os três respectivos Terminais e os 16 destinatários. Os fluxos (etapas de transporte) entre os nós são: coletas em vermelho, transferências em preto e rotas de entrega em verde, (Figura 5).

Figura 5 – Exemplo de rede de transporte de carga fracionada com transporte entre empresas.

Figura 6 – Etapas do modelo operacional no exemplo de rede.

Conforme discutido anteriormente, tem-se como resultado proposto do estudo do problema da localização/roteirização e, conseqüentemente, do *Location Allocation Problem* e do *Vehicle Routing Problem*, de forma conjunta:

- Determinação do número *hub's*;
- Determinação das localizações destes *hub's*;

- Determinação das rotas obtidas a partir de cada um dos terminais ou *hub's*, incluindo a alocação de cada um dos destinatários (*spokes*) nos terminais ou nos *hub's*.

A Figura 7 apresenta os resultados esperados. As etapas do modelo operacional revisado são mostradas na Figura 8.

Figura 7 – Exemplo de resultado de revisão de rede.

Figura 8 – Etapas do modelo operacional no exemplo de resultado de revisão de rede.

A rede proposta inicialmente possuía dois elos e três níveis (Embarcadores, Terminais e Destinatários); a rede revisada possui agora três elos e quatro níveis (Embarcadores, Terminais, *Hub's* e Destinatários). Foram abertos dois novos *hub's* e a localização para esses novos *hub's* foram os locais (C e E), dentre o grupo de seis avaliados (A, B, C, D, E e F).

O Terminal 1 passou a atender três destinatários diretamente, ao invés de sete anteriores, utilizando uma única rota de entrega, ao invés das três rotas anteriores. Esse Terminal transferiu parte dessas entregas para o *Hub C* e continuou transferindo cargas para os Terminais 2 e 3.

O Terminal 2 passou a atender dois destinatários diretamente, ao invés dos quatro anteriores, utilizando uma única rota de entrega, ao invés das duas rotas anteriores. Esse Terminal transferiu parte dessas entregas para o *Hub C* e continuou transferindo cargas para os Terminais 1 e 3.

O Terminal 3 não atendeu nenhum destinatário diretamente, dos cinco destinatários atendidos anteriormente, utilizando duas rotas de entrega. Esse Terminal transferiu parte das entregas a serem realizadas para os *Hub's C e E*, e continuou transferindo cargas para os Terminais 2 e 3.

O *Hub C* atendeu seis destinatários diretamente, através de duas rotas de entrega, com três entregas em cada uma das rotas. O *Hub E* atendeu cinco destinatários diretamente, através de uma única rota de entrega.

Sendo assim, foram utilizados mais dois *hub's*, além da configuração anterior dos terminais existentes, esses *hub's* foram devidamente localizados e o fluxo de carga desde os embarcadores até os dezesseis destinatários existentes foram definidos utilizando os terminais existentes e esses novos *hub's*.

2.1 CONCLUSÃO DA CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O estudo do Problema da Localização/Roteirização para o transporte de carga fracionada pode trazer uma contribuição relevante para a manutenção da competitividade em termos de custos e níveis de serviço.

Este aumento de competitividade pode ser obtido com uma revisão de rede que possibilite que requisitos mínimos de nível de serviço sejam atendidos ao mesmo tempo em que uma configuração ótima de terminais, *hub's* e rotas de entrega produza o menor custo total possível.

Entretanto, precisa ficar claro que uma revisão de rede utilizando a abordagem *Location Routing Problem* depende da resolução de dois conhecidos problemas NP-hard da literatura (LAP e VRP). Sendo assim, existe uma importante restrição ao tamanho da rede que pode ser analisada e a necessidade que o processo de modelagem utilize premissas e aproximações que sejam robustas em relação à realidade existente.

Observa-se, que as revisões de rede podem também ser realizadas em problemas similares, como redes de transporte de carga fracionada com entrega direta para os consumidores finais ou problemas de transportes de encomendas e postais.

Importante ressaltar que esta tese faz parte de uma linha de pesquisa de modelagem de problemas de localização de terminais e configurações de redes de transporte que vem sendo desenvolvida na Escola Politécnica da USP, da qual se podem citar os trabalhos de: Machado (1989), Tondo (1992), Gualda (1995), Hellmuth (2004), Mutarelli (2004), Vallim Filho (2004), Hamad (2004) e (2014), Alamo (2005), Cunha (2006), Pires (2006), Romero (2006), Silva (2010) e Caetano (2011).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INTRODUÇÃO

A revisão bibliográfica foi centralizada na utilização da abordagem *Location Routing Problem*, com ênfase na aplicação em problemas práticos e posteriormente na aplicação no transporte de carga fracionada. Pesquisando genericamente sobre o tema “*Location Routing Problem*” nos principais sites especializados (Emerald, Ingenta, MetaPress, ProQuest e ScienceDirect) foram identificadas algumas centenas de trabalhos publicados em periódicos científicos internacionais.

Quando a pesquisa foca na análise da aplicação da abordagem no transporte de carga fracionada, percebe-se que esse número de trabalhos reduz-se consideravelmente, limitando-se a um grupo bem menor de publicações, que serão aqui discutidas.

Na literatura estão presentes modelos matemáticos e técnicas de soluções utilizadas em problemas de localização, distribuição e alocação. O tema ainda é de extremo interesse por causa do aumento na complexidade e estrutura dos modelos, devido às restrições impostas pelos sistemas.

Para os prestadores de serviços logísticos, uma das mais importantes decisões estratégicas a serem tomadas durante um projeto diz respeito à localização dos terminais, sendo usualmente denominada por *Location Allocation Problem* ou apenas *Location Problem*. Outra fundamental decisão estratégica está ligada à gestão da frota, sendo normalmente denominada por *Vehicle Routing Problem* ou Problema da Roteirização de Veículos (GONZALEZ, 2008).

Nas decisões corporativas de logística, *Location Allocation Problem* (LAP) e *Vehicle Routing Problem* (VRP) possuem clara dependência entre si. Entretanto, na maior parte do tempo, eles são considerados separadamente, o que de forma clara não deve reduzir o custo total de uma empresa e muito provavelmente deve aumentar esse custo total (WAN E ZHANG, 2008).

Ainda segundo Wan e Zhang (2008), na maioria das vezes, quando os dois tipos de problemas (localização das instalações e roteirização de veículos) aparecem juntos em um determinado objeto de estudo, os mesmos são resolvidos separadamente. Portanto, criar rotas de veículos partindo de localizações que já foram fixadas conduz, em geral, a soluções de qualidade inferior ou não ótimas.

Este trabalho propõe, em alinhamento com diversas outras publicações contemporâneas que foram analisadas, que esses dois problemas sejam estudados de forma simultânea.

3.2 LOCATION ROUTING PROBLEM (LRP)

Na literatura, conforme apresentado, existem modelos matemáticos e métodos de solução eficazes aplicados em problemas de localização, alocação e de distribuição, o que também foi observado por Tuzun e Burke (1999). Esses modelos utilizam principalmente os conceitos de sistemas integrados de logística e têm como base a abordagem *Location Routing Problem* (LIN ET AL., 2006).

Location Routing Problem (LRP) ou *Location Routing Problem Modelling* (LRPM) são denominações para o tratamento simultâneo de localização dos terminais e da roteirização partindo desses terminais.

Como padronização de nomenclatura utiliza-se uma tradução desta abordagem como “Problema de Localização/Roteirização”. Para simplificar a sua referência, a partir de agora, o *Location Routing Problem* será tratado simplesmente por LRP.

Através de uma pesquisa na literatura, pode ser observado que o LRP tem atraído menos atenção se comparado com vários outros problemas de roteirização e localização. Existem algumas revisões bibliográficas dedicadas ao estudo do LRP na literatura, como: Balakrishnan et al. (1987), Laporte (1988), Laporte et al. (1989), Min et al. (1998), Nagy e Salhi (2007), Lopes et al. (2013), Prodhon e Prins (2014) e Drexler e Schneider (2013, 2014 e 2015).

Segundo Zarandi et al. (2011), dentre esses quatro primeiros estudos, Nagy e Salhi (2007) pode ser considerada a revisão mais recente e abrangente. Esta revisão apresenta um detalhado esquema de classificação, a fim de obter um entendimento mais detalhado da abordagem LRP, extensões e métodos de solução. Em alinhamento, Drexl e Schneider (2013) apresentam os trabalhos publicados após Nagy e Salhi (2007) e propõem outra classificação para as variações existentes.

Prodhon e Prins (2014) também atualizaram a pesquisa, revisando a literatura publicada a partir de 2007, ou seja, posteriormente a Nagy e Salhi (2007). Com uma pequena sobreposição com a referida revisão anterior, esse artigo recordou algumas referências históricas e introduziu alguns novos artigos publicados entre 2003 e 2006, que não haviam sido abordados.

Drexl e Schneider (2014) analisam e discutem a abordagem LRP padrão (*standard*), que é definida como: determinística, estática, discreta, com um único elo, tratando de problemas com um único objetivo, com cada vértice sendo visitado exatamente uma vez e onde não existem decisões de inventário relevantes.

Posteriormente, Drexl e Schneider (2015) apresentam variantes e extensões da abordagem LRP padrão que incluem problemas estocásticos e dados fuzzy, multiperíodos, localização contínua, múltiplos objetivos, problemas mais complexos, coletas e entregas simultâneas, rotas com transferências de cargas e inclusão de decisões de inventário.

3.1.1. *Definição*

A abordagem LRP é empregada como uma ferramenta para resolver de forma conjunta problemas de localização de instalação (LAP) e problema de roteirização de veículos (VRP).

Analisando a utilização da abordagem LRP percebe-se que esta abordagem visa a resolver a localização e o problema de programação de veículos através de uma otimização que inclui a fase de roteirização de veículos conjuntamente com o problema de localização de instalações (ZARANDI ET AL., 2011).

O objetivo de uma LRP é resolver um problema de localização de terminais, mas para isso será necessário que simultaneamente seja resolvido um problema de roteirização, definido por um subproblema. Isto implica dizer que se torna necessária uma abordagem integrada de solução, ou seja, que não se classifica nem como um problema de localização e nem como um problema de roteirização. Além disso, o LRP não resolve a inter-relação entre esses dois problemas (NAGY E SALHI, 2007).

Quando os resultados são comparados com os obtidos a partir de outros procedimentos comumente utilizados, percebe-se que este tipo de abordagem consegue, na grande maioria das vezes, resultar em soluções mais consistentes (GUERRA ET AL., 2007).

A abordagem LRP também pode ser analisada como um problema de roteirização de veículos (VRP), em que os veículos e a localização das instalações são determinados simultaneamente. Essa determinação inclui um número específico de veículos e rotas, através da minimização de uma função objetivo que normalmente é descrita pelos custos globais. Essa função objetivo pode ser denominada função de custo (BARRETO ET AL., 2007).

A abordagem LRP visa a minimizar o custo total, selecionando simultaneamente um conjunto de instalações e construindo um conjunto de rotas de entrega que satisfaçam certas restrições. Ao utilizar esta abordagem, o local da instalação otimizada produz uma construção simultânea de rotas partindo daquele terminal, o que conduz a uma minimização considerável dos custos totais frente aos modelos tradicionais que não levam em conta esses dois fatores de forma simultânea (TUZUN E BURKE, 1999).

Desta forma, havendo diversos outros autores que apresentam argumentações bem semelhantes, ressalta-se a importância do tratamento integrado dos problemas LAP e VRP, utilizando a abordagem LRP.

As definições existentes podem variar de acordo com o autor ou forma de utilização da abordagem LRP. Sendo assim, sugere-se como definição, que pode ser considerada como uma visão genérica: “LRP é uma abordagem de desenho de redes logísticas que trata dois complexos problemas: otimização da localização de terminais e otimização da roteirização dos veículos de distribuição que partem desses depósitos. Estes dois tipos de decisões foram resolvidos separadamente por um longo período de tempo, mas o progresso contínuo em técnicas de otimização tornou possível o desenvolvimento de abordagens integradas, que tratam de forma conjunta os dois problemas (PRODHON E PRINS 2014).”

3.1.2. *Métodos de soluções*

Guerra et al. (2007) sugerem que os métodos que produzem as soluções utilizadas em LRP devam ser classificados de acordo com a forma que correlacionam os problemas de localização (LAP) e de roteirização (VRP) descritos por Min (1989). Os principais métodos existentes podem ser classificados, segundo o trabalho de Nagy e Salhi (2007), como:

- I. Métodos Exatos: Para modelos mais generalistas de LRP, são utilizados métodos exatos baseados em programação matemática. Eles geralmente envolvem a relaxação e a introdução de restrições como: eliminação de sub-rotas, não conectividade entre terminais e variáveis inteiras;
- II. Métodos sequenciais: O problema de localização é resolvido inicialmente minimizando as distâncias entre as instalações e os consumidores (distância radial), então, o problema de roteirização é utilizado;

- III. Métodos de solução por clusters: Inicialmente os embarcadores são divididos e agrupados, então:
 - Para cada cluster, uma instalação é definida, e então o VRP é aplicado (TOTH E VIGO, 1999);
 - Um problema do caixeiro viajante (TSP) é resolvido para cada cluster e os resultados apontam onde localizar as instalações;
- IV. Heurística iterativa: O problema é dividido em dois subproblemas, um de localização e outro de roteirização, que são resolvidos de forma iterativa;
- V. Heurística hierárquica: Considera-se a localização como o problema principal e a roteirização como um problema secundário.

No contexto da abordagem LRP, os métodos de heurística iterativa e heurística hierárquica são usados principalmente na resolução dos problemas com maior foco na etapa de roteirização VRP (KLOSE E DREXL, 2005).

3.1.3. *Classificação das aplicações na literatura*

Com base na revisão bibliográfica realizada, principalmente em Nagy e Salhi (2007) e Drexel e Schneider (2015), classificam-se as aplicações encontradas de LRP na literatura por:

- a) Estrutura hierárquica: Estes consistem em terminais prestando serviços a um número de origens e destinos, que estão ligados ao seu depósito por meio de rotas de veículos. Alguns dos trabalhos existentes representam extensões bastante complexas para LRP's, como destinatários clusterizados em grupos, ou destinatários atendidos por mais de um veículo, ou ainda, destinatários que não sejam atendidos por nenhum veículo;
- b) Tipo de dados de entrada: Os dados de entrada podem ser determinísticos ou estocásticos. Há um conjunto muito maior na literatura sobre a utilização de dados determinísticos. No caso de aplicações estocásticas, percebe-se que elas estão focadas na utilização de apenas uma variável;

c) Período de planejamento: Pode ser em período único ou multiperíodo. Problemas com períodos únicos ou múltiplos são conhecidos, respectivamente, como estáticos ou dinâmicos. A grande maioria dos trabalhos de aplicações investigam casos estáticos;

d) Método de solução: As metodologias de resolução podem ser exatas ou heurísticas. Há mais trabalhos utilizando métodos heurísticos, entretanto, alguns métodos exatos são frequentes, devido aos ótimos resultados encontrados para casos especiais de LRP's. Em outros casos, as abordagens exatas e heurísticas são discutidas em conjunto.

Complementando a classificação anterior, baseada em Nagy e Salhy (2007), no contexto de métodos de solução heurísticos, destaca-se uma peculiaridade deste campo de pesquisa. A pesquisa é tão fragmentada que apenas quatro trabalhos apresentavam comparações computacionais até 1990, Srivastava e Benton (1990). Pode-se dizer que a análise comparativa de heurísticas acaba sendo mais frequentemente qualitativa do que quantitativa. Fica complexo descrever todas as combinações de trabalhos que são semelhantes, no que diz respeito a um ou outro tipo de modelo, pois isso criaria um número muito grande de grupos independentes, sendo que cada um iria conter um número muito restrito de trabalhos;

e) Função objetivo: O objetivo usual para LRP's é a minimização de custos. Os custos podem ser divididos em custos de terminais e custos de distribuição. Não foi localizado nenhum trabalho que possua uma formulação divergente desse conceito até o trabalho publicado por Chan et al. (2001).

Entretanto, Drexl e Schneider (2015) discutem alguns trabalhos posteriores com diversos objetivos inclusos nas funções objetivo, sendo a maioria destes, medidas qualitativas de nível de serviço consideradas com objetivos monetários;

f) Locais de instalações: A abordagem LRP padrão considera um número discreto de pontos como possíveis candidatos para os locais das instalações. No entanto, o *Continuous Location Routing Problem* (CLRP) pode ser entendido como uma extensão para o LRP padrão, pois permite alocar as instalações em qualquer ponto; sendo assim, pode-se considerar que o espaço de solução é contínuo;

g) Número de Elos: Conforme apresentado, a abordagem LRP padrão possui apenas um elo. Os problemas “Multi” ou “N” elos (*Multi* ou *N-Echelon Routing Problems*) são aqueles em que os destinatários não são servidos diretamente por um depósito central, mas via “N” elos de uma rede logística. Uma rede de “N” elos contém “N+1” níveis de localizações e para $n \in \{1, \dots, N\}$ existem etapas de transportes entre os níveis “n-1” e “n”. Para cada elo “n”, devem existir veículos dedicados que só podem visitar as instalações posteriores. Transferências de carga entre instalações são necessárias e observa-se que artigos sobre multi-elos em LRP têm aparecido nos últimos anos;

h) Tipos de coletas e entregas: As tarefas a serem executadas em LRP’s podem consistir na entrega de produtos aos destinatários finais de uma das várias potenciais instalações, coletar produtos em determinados pontos e entregar esses produtos em uma das várias potenciais instalações ou ambos. Neste último caso é possível que o produto seja coletado em um ponto e entregue em outro; esses problemas são chamados de LRP’s coleta-e-entrega ou *Pickup-and-delivery* LRP’s ou LRPPD.

Também é possível que um único ponto seja atendido por uma coleta e também por uma entrega e, ainda, que a coleta e entrega possam ser realizadas durante a mesma visita. Esta variação do problema anterior é denominada de LRP com coleta e entrega simultâneas (LRPSPD).

Outro tipo de LRP que trata de forma conjunta coletas e entregas são os problemas *Many-to-Many* LRP's. Nestes casos, os problemas têm como objetivo localizar *hub's* para o *cross-docking* de produtos. As coletas e entregas podem ser realizadas em rotas com múltiplas paradas, começando e terminando em um terminal. Neste tipo de LRP, necessariamente, existem transportes entre os terminais e esses transportes são geralmente diretos. Tais problemas surgem, por exemplo, em aplicações de distribuição dos correios ou de transporte de carga fracionada.

Além das características acima, LRP's podem ser diferentes no que diz respeito aos seguintes aspectos: direção da rede, capacidade das instalações e capacidade e heterogeneidade da frota. Drexler e Schneider (2015) avaliam que estes aspectos não alteram a natureza de um problema a ponto de constituir uma nova variante da abordagem LRP e devem ser considerados como variações dos problemas existentes.

3.1.4. Aplicações e limitações

Srivastava (1986) descreve que, normalmente, a abordagem LRP visa a minimizar o custo total, selecionando, simultaneamente, um conjunto de terminais candidatos e um conjunto de rotas de entrega que satisfaçam às seguintes condições:

- I. Demanda dos destinatários deve ser totalmente satisfeita, sem ultrapassar a capacidade dos veículos ou das instalações;
- II. Cada rota começa e termina na mesma instalação;
- III. Número de veículos, comprimentos de rotas e durações de rotas que não excedam os limites especificados. Alguns produtos necessitam que estas restrições atendam também o impacto no produto resultante da duração das rotas ou comprimento da rota; essas restrições podem ser de temperatura (farmacêuticos, alimentos, congelados e resfriados e afins), de validade dos produtos (jornais, vacinas e perecíveis em geral) e demais produtos com prazo de validade (*shelf life*) restrito. Além disso, problemas de entregas com tempo crítico (jornais, encomendas, postais e afins), como entrega expressas, têm restrições de prazo que limitam a duração ou o comprimento

de rotas. Muitas vezes, problemas de entrega de tempo crítico envolvem penalidades caso os produtos não cheguem ao destino no tempo e isso também pode ser integrado ao modelo.

Drexl e Schneider (2015) consideram que a abordagem LRP só deve ser aplicada nos problemas em que a seleção das instalações não está implicitamente determinada pelas decisões de roteirização, ou que os rotas de veículos não sejam determinados somente pelas localizações dos destinatários ou pelos fluxos de produtos. Portanto, torna-se necessário, segundo os autores:

- (i) Existirem custos fixos para abertura e/ou variáveis com o volume para se utilizar uma instalação; ou
- (ii) Um determinado número de instalações deve ser selecionado de um conjunto maior; ou
- (iii) As instalações contam com algum tipo de limitação da capacidade.

Outro ponto importante trata da capacidade computacional necessária. O LRP é um problema da classe NP-hard, uma vez que é constituído pela combinação de outros dois problemas da classe NP-hard. Por esta razão, os métodos de solução simultânea para a localização e roteirização são muitas vezes limitados a soluções que utilizam em sua composição algum tipo de heurística [CORNUEJOLS ET AL., 1977; LENSTRA E KAN, 1981 E LIN ET AL., 2006].

Conforme descrito nos trabalhos de Cornuejols et al. (1977), Lenstra e Kan (1981) e Lin et al. (2006) as soluções exatas não seriam as mais apropriadas para problemas maiores; entretanto, a evolução computacional e novos processos de modelagem podem produzir bons resultados para problemas específicos, conforme descrito em (NAGY E SALHY, 2007).

Desta forma, o tamanho do problema tem forte relação com o número de potenciais terminais e o número de destinatários, visto que o número de rotas e veículos dependem dos parâmetros anteriores e tal fato deve interferir na escolha do tipo de solução.

Mesmo que a maioria dos trabalhos se concentre na distribuição de bens de consumo ou encomendas, existem também algumas aplicações no setor de saúde, em funções militares e no ramo de comunicações (NAGY E SALHI, 2007).

Drexl e Schneider (2015) apresentam 14 trabalhos práticos que foram encontrados, sendo dez mais recentes que o trabalho de Nagy e Salhi (2007), incluindo os setores de extração vegetal, distribuição urbana, alimentos (varejo e perecível), peças de reposição, aeroespacial, encomendas e transporte de carga fracionada.

Nagy e Salhi (2007) observam que o objeto de estudo tem seu número de aplicações muito centralizada nos países ricos da Europa Ocidental e América do Norte, mas foram também localizadas aplicações de LRP em alguns países do Oriente, como China e Índia.

No Brasil, foi localizada uma publicação sobre o assunto, Carvalho et al. (2012), sendo que o referido trabalho possui uma abordagem exclusivamente computacional. Outro trabalho publicado por autores brasileiros, Camargo et al. (2013), é um trabalho focado no problema *Many-to-Many* LRP e sua resolução.

Nota-se que, até 2007, cerca de um quinto dos trabalhos encontrados na literatura tratavam de aplicações práticas. Em análises mais recentes existe grande encorajamento para o aumento do número de aplicações práticas nos trabalhos publicados, sendo que Drexl e Schneider (2015) apresentam 14 trabalhos práticos nos últimos nove anos.

3.3 TIPOS ESPECIAIS DE LRP

Conforme apresentado nesta Revisão Bibliográfica, existe um vasto campo de tipos e variações de LRP's, de acordo com a natureza dos problemas existentes. Sendo assim, para que seja possível um melhor entendimento do problema em estudo na literatura, apresentam-se os dois tipos especiais de LRP que melhor caracterizam o problema descrito no Capítulo 2.

A análise que será descrita tem como objetivo entender as características e complexidades desses dois tipos especiais de LRP e servirá de base comparativa para o objeto de estudo proposto neste trabalho; portanto, serão apresentados os trabalhos que envolvem o estudo de:

- Redes Multi-elos LRP: São redes que possuem mais de dois elos e características específicas devido à sua maior complexidade;
- Redes *Many-to-Many* LRP's: São redes que envolvem simultaneamente coletas e entregas com ênfase em transporte de carga fracionada e com características específicas oriundas do atendimento simultâneo.

3.2.1. *Multi-elos LRP*

Drexel e Schneider (2015) observam que LRP's com múltiplos elos têm atraído atenção apenas em um período muito recente da literatura e, pelo número de trabalhos publicados nos últimos anos, esses autores concluíram que essa é a mais importante extensão da abordagem LRP da última década.

Tal fato fica mais evidente na publicação de Nagy e Salhi (2007), onde apenas três trabalhos com dois ou mais elos foram encontrados. No que se refere as redes mais complexas, com mais de dois elos, pode-se considerar baixo o número de trabalhos localizados, devido à relevância prática e ao desafio científico de tais problemas (DREXL E SCHNEIDER, 2015).

Ambrosino e Scutellà (2005) é o primeiro trabalho encontrado com mais de dois elos e discute a necessidade do mercado global em ampliar a eficiência das suas operações logísticas. Essa eficiência foi considerada como uma ação de fundamental importância para o resultado de uma empresa. Para tanto, existem dois problemas principais a serem resolvidos:

- A otimização dos fluxos de produtos na rede logística;
- A melhoria da rede existente, identificando a melhor configuração de terminais que satisfaçam os padrões definidos e minimizem os custos totais envolvidos.

A resolução desses problemas principais depende da resposta a uma série de perguntas e no referido trabalho resolve-se um problema com três elos, onde existe uma planta, depósitos centrais, centros de distribuição e destinatários.

A planta envia um produto único aos depósitos centrais e esses depósitos abastecem os centros de distribuição e destinatários de grande porte e os centros de distribuição abastecem os demais destinatários. As perguntas a serem respondidas são:

- Qual a quantidade enviada da planta para os depósitos centrais?
- Quantos e quais depósitos centrais devem ser abertos?
- Quais depósitos centrais devem fornecer produtos para os centros de distribuição e destinatários de grande porte?
- Qual a quantidade enviada dos depósitos centrais para os centros de distribuição?
- Quais serão as rotas de atendimento aos centros de distribuição e destinatários de grande porte?
- Quantos e quais centros de distribuição devem ser abertos?
- Quais centros de distribuição devem fornecer produtos para os destinatários que não são atendidos pelos depósitos centrais?
- Quais serão as rotas de atendimento aos destinatários que não são atendidos pelos depósitos centrais?

Não existe nenhum tipo de transferência entre os terminais do mesmo nível de localização, ou seja, o único tipo de produto existente deve obrigatoriamente ser enviado para o próximo nível de localização.

A maior instância de teste apresentada possui quatro centros de distribuição, 23 pontos de *cross-docking*, 31 terminais regionais e 104 clientes. Entretanto, para obtenção desta solução foram necessários quase 11 dias de processamento e o gap estimado encontrado foi de 46,92%. Resultados também foram apresentados para outras 12 instâncias.

Posteriormente, uma revisão realizada por Gonzalez-Feliu (2009) destaca que as redes com múltiplos elos são uma das estratégias mais comuns na implantação de redes de distribuição e que este tipo de problema não foi revisado suficientemente na literatura. Até esse momento, para o referido autor, o trabalho de Ambrosino e Scutellà (2005) continuava sendo o único trabalho encontrado com mais de dois elos.

Segundo o autor, o número de elos existentes em problemas reais tem-se ampliado devido aos avanços tecnológicos que favorecem o desenvolvimento de novos mercados e novas necessidades dos consumidores. Modelos reais de distribuição são encontrados em diversas redes com múltiplos elos, devido às estratégias de *cross-docking*, que favorecem a redução de estoques. Dentre esses tipos de redes, alguns setores se destacam pela amplitude de utilização de sistemas com múltiplos elos:

- Sistemas de transporte de carga fracionada e postal;
- Distribuição de impressos;
- Peças de reposição da indústria automotiva;
- Distribuição urbana;
- Transporte multimodal;
- E-commerce.

O transporte de carga fracionada é de fato um sistema de múltiplos elos, com pontos intermediários de *cross-docking*. Esses sistemas têm aumentado, devido ao comércio internacional e às evoluções no comércio e tecnologia (GONZALEZ-FELIU, 2009).

Em continuidade ao estudo de aplicações em redes com múltiplos elos, Lee et al. (2010) apresentam uma proposta de configuração de redes com três elos que envolve fornecedores, manufaturas, centros de distribuição e destinatários. Busca-se a solução para as seguintes perguntas:

- Quais fornecedores abastecem cada manufatura?
- Quais serão as rotas de abastecimento?
- Quantas e quais manufaturas devem ser abertas?
- Quais manufaturas devem fornecer produtos para os centros de distribuição?
- Quais centros de distribuição devem ser abertos?
- Quais centros de distribuição devem fornecer produtos para os destinatários?
- Quais serão essas rotas de atendimento aos destinatários?

Da mesma forma que o trabalho de Ambrosino e Scutellà (2005), não foram permitidas transferências entre os terminais do mesmo nível de localização e apenas um produto foi considerado no modelo.

Uma heurística com relaxação das variáveis binárias foi aplicada para resolução de problemas de maior porte, pois segundo Lee et al (2010), com o aumento do número de variáveis de decisão, especialmente as binárias, aumenta muito o tempo na busca por uma solução final. Com base nos resultados apresentados, a solução que utilizou heurística necessitou, na média, aproximadamente 12 vezes menos tempo de processamento do que a solução exata.

Os resultados também foram comparados com pequenas instâncias aplicadas em Wu et al. (2002) e apresentaram uma melhora nesses resultados de 2 a 5%. Os autores também sugeriram que o modelo proposto fosse aplicado em problemas reais.

Os trabalhos desenvolvidos por Hamidi et al. (2012, 2014) tratam de um problema de três elos formado por plantas, depósitos centrais, depósitos regionais e destinatários. O problema envolve produtos distintos e as seguintes questões precisam ser esclarecidas, segundo os autores:

- Quais plantas abastecem cada depósito central?
- Quais serão essas rotas de abastecimento?
- Quais plantas abastecem cada depósito regional?
- Quais serão essas rotas de abastecimento?
- Quais plantas abastecem cada destinatário?
- Quais serão essas rotas de abastecimento?
- Quais as quantidades transferidas entre as plantas?
- Quantos e quais depósitos centrais devem ser abertos?
- Quais depósitos centrais abastecem cada depósito regional?
- Quais serão essas rotas de abastecimento?
- Quais depósitos centrais abastecem cada destinatário?
- Quais serão essas rotas de abastecimento?
- Quais as quantidades transferidas entre os depósitos centrais?
- Quantos e quais depósitos regionais devem ser abertos?
- Quais depósitos regionais abastecem cada destinatário?
- Quais serão essas rotas de abastecimento?
- Quais as quantidades transferidas entre os depósitos regionais?

Essas questões foram resolvidas por uma rede de duas plantas, dois centros de distribuição (CD's), dois centros de distribuição regional (RD's) e quatro destinatários, através de um modelo exato no trabalho publicado em 2012 e por uma heurística GRASP com redes de até três plantas, 30 CD's, 30 RD's e 380 destinatários publicada em 2014 (HAMIDI ET AL. 2012, 2014).

A função objetivo utilizada nos dois trabalhos não considerou os custos de movimentação no armazém. Para o modelo exato, como havia apenas quatro destinatários, a solução encontrada para apenas dois produtos foi bem simples e não se avaliou transferências entre o mesmo nível de localização.

Na aplicação que utilizou uma heurística GRASP, apresentada em Hamid et al. (2014), foram permitidas transferências entre plantas e entre os CD's. Cinco produtos foram considerados na maior aplicação do modelo.

Entretanto, a solução final foi obtida através de diferentes cenários que consideraram a capacidade de produção. Nesses cenários, os produtos e suas transferências foram resolvidos de forma individual e, posteriormente, denominado como *elite solution*, as cinco melhores soluções individuais de cada produto foram combinadas na solução final.

3.2.2. *Many-to-Many LRP's*

Quando uma empresa inicia ou decide expandir suas operações, um projeto eficiente de rede de transporte é um fator-chave para o sucesso. A fim de configurar uma rede de tal modo que todas as necessidades de transporte possam ser satisfeitas com o menor custo, empresas geralmente decidem realizar o seu transporte através de um sistema *hub-and-spoke* (RIECK ET AL., 2014).

Em uma linha muito similar, Çetiner et al (2010) destacam a pressão pela constante necessidade de melhoria no nível de serviço nos segmentos de transporte de carga fracionada e postal. Estruturas *hub-and-spoke* são configurações largamente conhecidas nesses segmentos e promovem economia de escala através das consolidações nos *hub's*, evitando a necessidade de entregas diretas.

Na última década, as estruturas *hub-and-spoke* têm atraído a atenção de muitos pesquisadores, devido ao seu sucesso em aplicações no segmento de transportes, sendo que o transporte de carga fracionada e postal são os tipos que concentram maior número de pesquisas. A aplicação das estruturas *hub-and-spoke* também tem alcançado excelentes resultados na redução do tempo de entrega, custos operacionais e custos com infraestrutura (CAMARGO ET AL., 2013).

Esses autores complementam que a aplicação em estruturas *hub-and-spoke* no transporte de carga fracionada produzem rotas para atender os nós que não sejam *hub's* e conecta essas rotas com os *hub's* de forma que as diversas origens possam se conectar com os diversos destinos a um mínimo custo. A coordenação de todas essas decisões é conhecida como *Many-to-Many Hub Location-Routing Problem* ou *Many-to-Many LRP's* ou MMHLRP.

Rieck et al. (2014) definem que um problema *Many-to-Many LRP* precisa responder a três tipos diferentes de perguntas:

- Quantos *hub's* são necessários e onde eles deveriam ser localizados?
- Quais as melhores rotas de coleta e entrega devem ser formadas com origem e destino em uma instalação?
- Quais as rotas entre as instalações devem ser estabelecidas?

Em relação às aplicações encontradas na literatura, assim como as redes Multi-elos LRP, o número de trabalhos encontrados é restrito e serão apresentadas as aplicações de *Many-to-Many LRP* existentes na Literatura.

Nagy e Salhy (1998) citaram que não existia até aquele momento, por ser um problema novo, nenhum modelo matemático para resolução exata de um *Many-to-Many LRP*. Entretanto, embora eles entendessem que essa deveria ser uma boa alternativa, a mesma não foi buscada, pois não se confiava que soluções de tamanhos maiores pudessem ser encontradas de forma eficiente devido ao grande número de variáveis existentes na formulação do problema, mesmo com um número pequeno de clientes.

Utilizando uma extensão do modelo apresentado em Laporte (1989), foi desenvolvido um modelo para resolução de um problema *Many-to-Many* LRP com apenas um elo, terminais e clientes. Foram consideradas as transferências entre esses terminais para atendimento dos clientes e cada cliente poderia ser visitado apenas uma vez. Problemas com apenas vinte clientes exigiram em sua solução a tratativa de 17 mil variáveis e 17 milhões de inequações.

Aproximações para os custos, através de distâncias estimadas de percurso, foram utilizadas para determinação das melhores rotas em um modelo baseado em heurística, denominado como *nested method*, onde o problema LAP é o principal e o VRP um subproblema. Embora exista definição de origem e destino dos fluxos, não foi observada diferenciação para os produtos existentes, ou seja, considerou-se apenas um produto.

O limite de aplicação apresentado atendeu 10 terminais e 249 destinatários. Limitou-se a duas horas de tempo de processamento para busca da solução e as diferenças estimadas para a solução ótima não foram apresentadas. A solução obtida, quando comparada com um método sequencial, mostrou-se ser mais eficiente e deixa-se claro no trabalho que mais testes devem ser realizados para evolução do estudo na área.

O trabalho de Wasner e Zapfel (2004), embora seja classificado como LRP por Nagy e Salhi (2007) e Drexler e Schneider (2015), não apresenta solução para as rotas dos veículos; entretanto, os custos estimados destas rotas são considerados na busca pela solução. Os autores classificam seu trabalho como um modelo de planejamento da localização de terminais que foi desenvolvido para evoluir na literatura e nas bases teóricas dos problemas de redes de transporte.

Ele foi aplicado em um problema prático de uma empresa de médio porte de carga fracionada que faz entregas diárias nas regiões de difícil acesso nos Alpes Austríacos. Considera-se no trabalho que as aproximações para as rotas dos veículos de entrega podem resultar em grandes distorções nos resultados. Por essa razão, foram consideradas aproximações nas distâncias das rotas e também no tempo de percurso de acordo com o perfil dos destinatários e horário de entrega.

A proposta foi a utilização de um modelo *Many-to-Many* LRP exato para resolver um problema de dois elos com 10 terminais e um *hub* que não considerou diferenciação entre produtos; entretanto, para encontrar uma solução para este problema foi necessária a utilização de uma heurística de busca local. Essa solução propôs o fechamento de três terminais existentes, resultando em uma redução de custos estimada de 14,7% em relação aos custos praticados pela empresa. Em paralelo, houve um aumento de 40% nas transferências entre terminais.

Çetiner et al (2010) desenvolveram um modelo baseado em heurística iterativa para resolver um problema *Many-to-Many* LRP. No primeiro estágio as localizações dos *hub*'s são obtidas e os destinatários são alocados nesses *hub*'s. No segundo estágio as rotas nas regiões de cada *hub* são definidas, o que altera as distâncias utilizadas nas rotas do primeiro estágio e recomeça-se o processo.

O modelo foi aplicado em um problema prático com dois elos, 17 terminais de coleta e entrega ou *hub*'s e 81 cidades sendo atendidas e também não foi considerada diferenciação entre produtos. Para cada par de cidades, um fluxo de cargas poderia ser construído em qualquer direção, ou seja, as cidades poderiam ser embarcadoras ou destinatárias. Neste caso houve uma aproximação para que todos os embarcadores e destinatários de uma cidade específica fossem considerados como a própria cidade.

Os pesos enviados foram considerados como as populações de cada uma dessas cidades, pois não existia informação sobre o fluxo de cargas existente. As transferências foram consideradas como sendo realizadas no modal aéreo e as entregas no modal rodoviário, onde cada cidade é atendida por apenas um veículo. Limites de distância para o veículo foram aplicados.

Poucas informações sobre o modelo são apresentadas, mas o cálculo dos custos nos terminais é realizado de forma bastante simplificada, com funções de desconto. Os parâmetros de variação desses custos (descontos) são modificados nos testes. Como não havia resultados reais dos custos, os custos foram comparados com os da primeira iteração do mesmo modelo que foi aplicado.

Posteriormente, Camargo et al. (2013) desenvolveram um modelo que considerou os custos fixos de instalação de um *hub* e os custos fixos de utilização dos veículos associados a esse *hub*. Existem também outros custos fixos para associação de um ponto de coleta e entrega a um *hub* específico, que buscam representar uma aproximação para os custos de manuseio, que são associados a uma restrição onde cada destinatário pode ser atendido por apenas um *hub*. Testes foram realizados para diferentes tamanhos de instâncias e comparados com uma resolução via CPLEX 12. Diferentes parâmetros de descontos nas aproximações das transferências também foram considerados.

A maior instância de aplicação testou 10 *hub*'s e 100 pontos de coleta e entrega e os resultados foram obtidos em menos de quatro minutos, entretanto, da mesma forma que Çetiner et al (2010), o trabalho de Camargo et al. (2013) assumiu aproximações muito representativas nas transferências. Além disso, observa-se que a ausência de restrições no modelo pode gerar impactos na qualidade da solução obtida.

Rieck et al. (2014) desenvolveram um modelo exato que foi testado e aplicado em um problema de dois elos com cinco pontos de coleta, três *hub*'s e quatro pontos de entrega. Posteriormente, um algoritmo genético e um procedimento "*fix-and-optimize*" foram aplicados em diversos problemas de maior porte, atingindo o limite de 40 pontos de coleta, seis *hub*'s e 100 pontos de entrega.

No modelo desenvolvido, as rotas foram divididas a partir dos níveis de localização. As primeiras rotas partem do primeiro nível de localização (denominado ponto de fornecimento) e são responsáveis pelas coletas. As rotas que partem do segundo nível de localização (denominado *hub*) são consideradas como transferência e as que partem do terceiro nível de localização são as rotas de entrega. O modelo considera que todas essas rotas devem ser pré-definidas.

Na função objetivo, funções de desconto também foram incluídas para estimar a redução dos custos oriunda da consolidação de cargas nos *hub's* e suas transferências. No modelo menor existiam três produtos diferentes, mas na aplicação maior os produtos foram reduzidos para apenas dois produtos diferentes.

Os resultados foram apresentados para uma grande quantidade de instâncias fictícias e divididos pelo modelo de solução e tamanho da instância. Houve comparação entre os modelos de solução em relação ao tempo de processamento e *gap*.

Por último, o trabalho de Rodríguez-Martín et al. (2014) avaliou uma rede com apenas dois níveis de localização, *hub's* e destinatários, havendo transferências entre os *hub's*. Neste trabalho foram discutidos os problemas *Many-to-Many* encontrados na literatura, que são os mesmos que foram apresentados neste capítulo. Da mesma forma que os trabalhos anteriores, funções de desconto foram utilizadas para estimar a redução de custos oriunda da consolidação de cargas nos *hub's* e suas transferências. Foi incluída também uma nova função de desconto, para estimar os ganhos da criação de rotas de entrega.

Um modelo exato foi testado em exemplos da literatura de *hub location*, *Aeronautics Board (CAB)* e *Australian Post (AP)*. O limite de aplicação chegou a 50 nós, ou seja, *hub's* mais destinatários. A capacidade de solução também foi influenciada pelo número máximo de *hub's* que poderiam ser selecionados, pois, segundo os autores, quanto maior o número de possíveis *hub's* selecionados, mais complexa seria a solução. As soluções apresentadas utilizaram até cinco *hub's*, não demonstraram os fluxos de transferência existentes e não consideraram diferenciação entre os produtos existentes.

3.4 MODELOS LRP

Serão apresentados e discutidos a seguir os principais tipos de modelos encontrados na literatura.

3.4.1. Modelos Exatos

Desde Wren e Holliday (1972) e Rand (1976) observa-se que a maioria dos modelos desenvolvidos não se adequam a uma realidade em que um veículo possa ser capaz de atender a vários destinatários. Tal fato pode ser justificado pelo aumento de complexidade inserido no modelo com essa implementação.

Laporte et al. (1983) pode ser considerado o primeiro modelo publicado onde a localização das instalações e o desenvolvimento das rotas de entrega são tratados de forma simultânea em um algoritmo exato.

Seja,

$G \rightarrow (N, E)$ uma matriz com N nós (cidades e destinatários) e um grupo E de rotas;

$N \rightarrow \{1, 2, \dots, n\}$;

$S \rightarrow N - S$, onde $S \subseteq N$;

$E \rightarrow \{ (i, j) : i, j \in N; i < j \}$;

$K \rightarrow$ Grupo de potenciais terminais ($K \subseteq N$ e $K \neq \emptyset$);

$C = (c_{ij}) = (c_{ji}) =$ Custo da rota i para j ou da rota j para i , para qualquer $(i, j) \in E$;

$m_k \rightarrow$ Número de veículos baseado no nó k ;

$f_k \rightarrow$ Custo fixo da instalação k ;

Demais parâmetros:

$x_{ij} \rightarrow$ O número de vezes que o arco ij é usado na solução ótima;

$c_{ij} \rightarrow$ Custo relativo à rota;

$y_k = 1$, se a instalação k é utilizada, e

$y_k = 0$, caso contrário.

Considera-se que:

- a) A partir da instalação, todo nó é visitado apenas uma vez;
- b) Todas as rotas começam e terminam na instalação;
- c) Nenhuma rota visita mais de uma instalação;
- d) Cada instalação é conectada com pelo menos um destinatário.

Esse modelo inicialmente considera que não existem custos fixos no depósito e também não existe restrição para o número de depósitos na solução ótima. Tem-se:

$$\text{Min } \sum_{i < j} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{(i,j) \in \sigma(k)} x_{ij} = 2 \quad (k \in N) \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{i < j \\ i, j \in S}} x_{ij} \leq |S| - 1, \text{ onde } (S \subseteq N; S \cap K = \emptyset) \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j \in N - K),$$

$$x_{ij} \in \{0, 1, 2\} \quad (i \text{ ou } j \in K), \quad (4)$$

As restrições existentes (2), (3) e (4) definem o fluxo da carga, eliminam a possibilidade de sub-rotas no modelo e garantem a integralidade das restrições, respectivamente.

Existem ainda mais duas variações deste modelo:

1. Considerando os custos fixos das instalações, sem restrição no número de instalações para a solução ótima;
2. Não considerando os custos fixos das instalações e limitando o número de instalações.

As duas variações possuem a seguinte formulação:

$$\text{Min } \sum_{i < j} c_{ij} x_{ij} + \sum_{k < K} f_k y_k \quad (5)$$

$$\sum_{(i,j) \in \sigma(k)} x_{ij} = 2 \quad (k \in N) \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{i < j \\ i, j \in S}} x_{ij} \leq |S| - 1 + \sum_{k \in S \cap K} y_k, \text{ onde } (S \subseteq N) \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} y_k \leq P \quad (8)$$

$$\begin{aligned} x_{ij} &\in \{0, 1\} \quad (i, j \in N - K), \\ x_{ij} &\in \{0, 1, 2\} \quad (i \text{ ou } j \in K), \\ y_k &\in \{0, 1\} \quad (k \in K), \end{aligned} \quad (9)$$

No caso 1, pode-se relaxar o modelo utilizando $P = K$ e, no caso 2, com $f_k = 0$, os custos fixos não são considerados. Obviamente, sem as premissas acima, os custos fixos e os limites de instalações serão considerados em conjunto no modelo proposto.

Outra variação proposta por Laporte et al. (1983) trata da utilização de mais de um veículo por rota, situação facilmente encontrada em casos práticos. Tem-se:

$$\text{Min } \sum_{i < j} c_{ij} x_{ij} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sum_{(i,j) \in \sigma(k)} x_{ij} &= 2 \quad (k \in N - K) \\ \sum_{(i,j) \in \sigma(k)} x_{ij} &= 2 + 2(m_k - 1) \cdot y_k \quad (k \in K) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\sum_{\substack{i < j \\ i, j \in S}} x_{ij} \leq |S| - 1 + \sum_{k \in S \cap K} (m_k \cdot y_k), \text{ onde } (S \subseteq N), \quad (12)$$

$$\sum_{\substack{t=1 \\ it, it+1 \in T}}^{T-1} x'_{i, i+1} \leq |T| - y_k - y_l,$$

Onde, $T \in N$; $T \cap K = \{k, l\}$ e,

$$x'_{ij} = x_{ij}; \text{ se } i < j$$

$$x'_{ij} = x_{ji}; \text{ se } i > j \quad (13)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j \in N - K),$$

$$y_k \in \{0, 1\} \quad (k \in K), \quad (14)$$

As restrições 12 são restrições de eliminação das sub-rotas e T é um subconjunto de N que possui dois elementos em K , “ k ” e “ l ”.

As restrições 13 são restrições *chain barring* descritas em Laporte et al. (1981). Essas restrições evitam a formação de sub-rotas entre as duas extremidades estipuladas para a referida rota (neste caso, k e l). Essas não seriam necessárias caso os veículos pudessem visitar qualquer instalação.

Outra versão do modelo trata dos problemas com permissão de múltiplas visitas ao mesmo embarcador ou destinatário. Neste caso, os modelos apresentados anteriormente são relaxados e esse desenvolvimento foi baseado no algoritmo proposto por Edmonds e Johnson (1973), ou seja:

$$\text{Min } \sum_{i < j} c_{ij} x_{ij} \quad (15)$$

$$\sum_{i < k} x_{ik} + \sum_{j > k} x_{jk} - 2 z_k = 2, \text{ onde } (k \in N) \quad (16)$$

$$\sum_{\substack{i < j \\ i \in S \text{ e } j \in \bar{S} \text{ ou} \\ j \in S \text{ e } i \in \bar{S}}} x_{ij} \geq 2, \text{ onde } (S \cap K \neq 0; S \subseteq N), \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
 x_{ij} &\in \{0, 1, 2\} \quad (i, j \in N), \\
 z_k &\geq 0 \text{ e inteiro } (k \in N)
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

A função objetivo já foi apresentada e em alinhamento com os demais modelos anteriores, as restrições (16) são restrições de fluxos, as restrições (17) eliminam as sub-rotas e as restrições (18) garantem a integralidade da solução.

Laporte et al. (1989) também desenvolveram mais dois modelos exatos que serviram de base para diversos outros trabalhos recorrentes. A estrutura destes modelos baseia-se em duas fases. A primeira fase trata das decisões de longo prazo: a localização das instalações e o design das rotas. Quando as coletas são realizadas, uma falha deve ocorrer, se em algum ponto da rota a capacidade do veículo for excedida. Nestes casos, os veículos retornam à instalação para o descarregamento da carga.

O modelo proposto minimiza a soma dos custos operacionais das instalações, custos fixos dos veículos e os custos relativos às rotas. A função objetivo é sujeita à seguinte restrição probabilística: a probabilidade de uma rota planejada falhar não pode exceder um valor estipulado α .

Seja $N \rightarrow \{1, 2, \dots, n\}$ os conjuntos de destinatários e instalações existentes e $K \in N$ o grupo de potenciais depósitos.

Demais parâmetros:

$x_{ijh} \rightarrow$ O número de vezes (0,1,2) que o arco ij é usado na solução ótima;

$c_{ij} \rightarrow$ Custo relativo à rota;

$m \rightarrow$ número de veículos utilizados;

$f \rightarrow$ Custo de utilização do veículo;

$g_k \rightarrow$ Custo operacional do depósito k no período;

$V_\alpha(S) \rightarrow$ Menor número de veículos necessários para atender $S \subseteq N - K$, sendo que a probabilidade de falhas de coleta em S não exceda α ;

$y_k = 1$, se a instalação k é utilizada, e

$y_k = 0$, caso contrário;

$$\text{Min } \sum_{i \leq j} c_{ij} x_{ij} + fm + \sum_{k \in K} g_k y_k \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} y_k = 1 \quad (2)$$

$$1 \leq m \leq \mathfrak{m} \quad (3)$$

$$\sum_{i < k} x_{ik} + \sum_{j > k} x_{kj} \leq 2\mathfrak{m}y_k \quad k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i < k} x_{ik} + \sum_{j > k} x_{kj} \leq 2m \quad k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i < k} x_{ik} + \sum_{j > k} x_{kj} \leq 2 \quad k \in N - K \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{i \in S, j \in S \\ \text{ou} \\ i \in S, j \in S}} x_{kih} \geq 2 V_\alpha(S), \text{ sendo } S \subseteq N - K; \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N - K,$$

$$x_{ij} \in \{0, 1, 2\} \quad \forall i \text{ ou } j \in K, \quad (8)$$

$$y_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, \quad (9)$$

A função objetivo é uma composição dos custos dos veículos e das instalações. Os custos dos veículos são compostos por custos fixos e variáveis. A restrição 2 assegura que esta solução contenha apenas uma instalação. A restrição 3 impõe limites mínimos e máximos dos veículos utilizados. As restrições 4 e 5 garantem que se y_k não existe, não haverá fluxo chegando ou saindo da instalação equivalente.

No caso em que m é fixo em $\mathfrak{m}$, a restrição 4 pode ser utilizada e as restrições 5 e 6 retiradas. A restrição 5 garante que cada instalação seja atendida por apenas um veículo e a restrição 6 que cada destinatário também. A restrição 7 é uma restrição de conectividade probabilística e define os limites dos veículos a serem utilizados. As restrições 8 e 9 definem os domínios das variáveis.

O segundo modelo também minimiza a soma dos custos operacionais das instalações, custos fixos dos veículos e custos relativos às rotas, nos quais se deve considerar que o fator de redução existente nas rotas (*penalty*) não exceda o valor β .

$$\text{Min } \sum_{i \leq j} c_{ij} x_{ij} + fm + \sum_{k \in K} g_k y_k \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} y_k = 1 \quad (11)$$

$$1 \leq m \leq \mathfrak{m} \quad (12)$$

$$\sum_{i < k} x_{kih} + \sum_{j > k} x_{kj} \leq 2\mathfrak{m}y_k \quad k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{i < k} x_{kih} + \sum_{j > k} x_{kj} \leq 2m \quad k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{i < k} x_{kih} + \sum_{j > k} x_{kj} \leq 2 \quad k \in N - K \quad (15)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \text{ onde } S \subseteq N - K \text{ e } |S| \geq 2 \quad (16)$$

$$\sum_{t=0}^T x_{i,i+1} \leq T \quad (17)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N - K,$$

$$x_{ij} \in \{0, 1, 2\} \quad \forall i \text{ ou } j \in K, \quad (18)$$

$$y_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, \quad (19)$$

As novas restrições que foram inclusas no modelo são a restrição 16, que é uma restrição clássica do problema do caixeiro viajante que elimina as sub-rotas, com base no trabalho de Dantzig et al. (1954), e a restrição 17, que diz respeito ao pênalti β por exceder o tempo, o que quer dizer que existe um limite de tempo para que os veículos possam percorrer a rota definida.

Na literatura de modelos exatos, também se discute o potencial de solução das formulações *set partitioning* e algoritmos *branch and price*. Tuzun e Burke (1999) é um dos trabalhos que propõe esse tipo de solução. “Quando o algoritmo de um determinado modelo progride, ele percebe, destaca e acrescenta restrições violadas e depois ramos, após identificar que nenhuma outra restrição foi violada.”

3.2.2. Modelos Heurísticos Sequenciais

Os métodos heurísticos para a resolução de LRP's podem ser classificados como sequenciais e iterativos. O primeiro tipo resolve sequencialmente os problemas de localização e a roteirização de veículos. O segundo tipo resolve os mesmos problemas de forma iterativa, enquanto é possível obter uma solução melhor. De acordo com Min (1996) e Balakrishnan et al. (1987), quando houver uma capacidade limitada de veículos e custo fixo significativo nos centros de distribuição, os métodos sequenciais são preferíveis do ponto de vista computacional.

Srivastava e Benton (1990) desenvolveram um modelo misto de programação inteira utilizando heurística sequencial. A função objetivo desta formulação minimiza a distância percorrida pelos veículos e os custos de depósito. O modelo permite que M depósitos sejam alocados a partir de um determinado conjunto finito de locais viáveis R ($M < R$). Cada um dos destinatários n é servido por uma ou mais rotas realizadas pelos veículos V , com origem em cada um dos M depósitos, de forma a gerar um custo mínimo total no sistema.

Considerando os parâmetros:

$G \rightarrow \{g_r \mid r = 1..,R\}$ é o grupo de localizações possíveis R para alocar as instalações M ;

$M \rightarrow$ Número de instalações, onde $M \leq R$;

$H \rightarrow \{h_i \mid i = R + 1..,R + N\}$ é o grupo de destinatários N que devem ser atendidos;

$S \rightarrow \{G\} \cup \{H\}$ é o grupo de todos os possíveis destinatários e instalações existentes;

$V \rightarrow \{v_k \mid k = 1..,K\}$ é o grupo de veículos disponíveis K para as rotas originárias nos depósitos;

$C_{ij} \rightarrow$ Média dos custos anuais de viagem do nó i para o nó $j, i \in S \text{ e } j \in S$;

$C_k \rightarrow$ Custo anual de aquisição do veículos $k (k = 1, \dots, K)$;

$F_r \rightarrow$ Custo anual da instalação que inclui manutenção e operacionalização, $r; (r = 1, \dots, R)$;

$q_j \rightarrow$ número médio de unidades demandada pelo destinatário $j, j \in H$;

$Q_k \rightarrow$ Capacidade do veículo $k (k = 1..,K)$;

$d_{ij} \rightarrow$ Distância do nó i para o nó $j, i \in S, j \in S$;

$D_k \rightarrow$ Máxima distância que pode ser viajada pelo veículo $k (k = 1, \dots, K)$;

$t_{ij} \rightarrow$ Tempo de viagem de i para $j, i \in S, j \in S$;

$u_i \rightarrow$ Tempo de entrega ou coleta no destinatário $i, i \in H, (u_i = 0, i \in G)$;

$T_k \rightarrow$ Tempo limite de utilização do veículo $k (k = 1..K)$.

As variáveis de decisão são definidas como:

$x_{ijk} = 1$, se o veículo k viaja do nó i para o nó $j, i \in S, j \in S, k \in V$ e

$x_{ijk} = 0$, em caso contrário;

$Z_r = 1$, se o terminal r for selecionado, $r \in G$, e

$Z_r = 0$, em caso contrário;

R_i são as variáveis contínuas usadas nas restrições de sub-rotas, $i \in H$.

$$\text{Min } \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} \sum_{k \in V} C_{ij} X_{ijk} + \sum_{k \in V} (C^k \sum_{r \in G} \sum_{j \in H} X_{rjk}) + \sum_{r \in G} F_r Z_r$$

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in S} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in H, \quad (1)$$

$$\sum_{j \in H} \sum_{i \in S} q_j X_{ijk} \leq Q_k \quad \forall k \in V \quad (2)$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{i \in S} d_{ij} X_{ijk} \leq D_k \quad \forall k \in V \quad (3)$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{i \in S} t_{ij} X_{ijk} + \sum_{j \in S} \sum_{i \in S} u_i X_{ijk} \leq T_k \quad \forall k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S} X_{ipk} - \sum_{j \in S} X_{pjk} = 0 \quad \forall k \in V \text{ e } \forall p \in S \quad (5)$$

$$\sum_{r \in G} \sum_{j \in H} X_{rjk} \leq 1 \quad \forall k \in V \quad (6)$$

$$\sum_{r \in G} Z_r = M \quad (7)$$

$$\sum_{k \in V} X_{rmk} + Z_r + Z_m \leq 2 \quad m = 1, \dots, R, r \in G \quad (8)$$

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in H} X_{rjk} - Z_r \geq 0 \quad \forall r \in G \quad (9)$$

$$\sum_{j \in H} X_{rjk} - Z_r \leq 0 \quad \forall k \in V \text{ e } r \in G \quad (10)$$

$$R_i - R_j + (R + N) \sum_{k \in V} X_{ijk} \leq R + N - 1 \quad \forall i, j \in H \text{ e } i \neq j \quad (11)$$

$$X_{ijk} = \{0, 1\} \quad \forall i, j \in S \text{ e } k \in V$$

$$Z_R = \{0, 1\} \quad \forall r \in G \quad (12)$$

A função objetivo minimiza os custos totais de roteirização, alocação de veículos e custos de instalação e manutenção dos depósitos de operação. O conjunto de restrições (1) assegura que cada destinatário é visitado por apenas um veículo.

O conjunto de restrições (2) é relativo à capacidade do veículo. O conjunto de restrições (3) assegura que o veículo não exceda a distância máxima definida para cada uma das rotas. O conjunto de restrições (4) limita o tempo máximo que um veículo pode estar alocado em cada uma das rotas. A restrição (5) garante a continuidade da rota. A restrição (6) permite que cada veículo seja utilizado a partir de apenas um depósito.

A restrição (7) fixa o número de instalações em M e o conjunto de restrições (8) garante que não há nenhuma ligação entre duas instalações. A restrição (9) é utilizada para exigir que apenas uma instalação aberta seja utilizada e a restrição (10) complementa a anterior, para assegurar que o veículo não comece uma rota a partir de uma instalação fechada.

O conjunto (11) de restrições são as restrições de eliminação de sub-rotas e que garantem uma instalação de origem. Os dois últimos conjuntos de restrições (12) são as condições de integralidade, para garantir que as variáveis de decisão são inteiras e iguais a zero ou um.

3.2.3. Modelos Heurísticos baseados em Clusters

A análise de agrupamento descrita por Anderberg (1973) estuda a divisão de entidades, como objetos ou indivíduos, em grupos, com base em uma ou várias de suas características. Em problemas de localização, Kuehn e Hamburger (1963) já haviam reconhecido os benefícios do agrupamento de destinatários próximos e provavelmente se trata da primeira referência explícita sobre o interesse desta abordagem para este tipo de problema.

Fukunaga e Short (1978) desenvolveram algoritmos de agrupamento para problemas de localização com base no algoritmo de Clarke-Wright (1964) e obtiveram excelentes resultados. Posteriormente, Srivastava (1993) considera uma heurística LRP com base em procedimentos de agrupamento e Bruns e Klose (1995) fazem referência explícita à integração da análise de cluster em um modelo heurístico para a LRP.

Srivastava e Benton (1990) concluíram que o erro associado às soluções obtidas é aceitável e Min (1996) desenvolveu um método sequencial para um LRP com limite de capacidade que começa agrupando destinatários através de um método hierárquico.

Barreto et al. (2007) apresentam uma estrutura de modelo de análise de cluster baseado em heurística sequencial que será apresentado a seguir, pela qualidade dos resultados obtidos. Considerando os seguintes dados de entrada:

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ o conjunto de destinatários com demanda e_i , onde $i \in N$.

$P = \{n + 1, n + 2, \dots, n + p\}$ o conjunto de potenciais instalações com capacidade u_k e custo da instalação f_k , onde $k \in P$.

w = capacidade do veículo.

Define-se as rotas de veículos com base nas potenciais instalações, através dos seguintes passos:

- Passo 1: Construção de grupos de destinatários com limite de capacidade;
- Passo 2: Determinação de rota de distribuição em cada grupo de destinatários;
- Passo 3: Melhorar as rotas;
- Passo 4: Alocação das instalações e atribuição das rotas para cada uma dessas instalações.

Para implementar o passo 1, quatro métodos de agrupamento podem ser utilizados:

1. Método hierárquico monofásico;
2. Método hierárquico de duas fases;
3. Método não hierárquico de direta atribuição;
4. Método não hierárquico de atribuição sequencial.

No passo 2 do modelo proposto, sempre que o grupo tenha um número de 40 destinatários ou menos, as rotas são determinadas por um algoritmo exato, que resolve o relaxamento das restrições ou subciclos com mais de três destinatários. Estas restrições são introduzidas mais tarde, se elas forem violadas nesta etapa. Se a rota possui mais de 40 destinatários, uma heurística é aplicada.

Na primeira etapa desta fase, uma solução viável é obtida, utilizando um critério de escolha do tipo de análise de distância e um critério de inserção do tipo econômico. Na segunda fase, a solução é melhorada através de um processo de busca local.

No passo 3 um procedimento de busca local também é usado, como o proposto por Branco e Coelho (1990) para o problema da p -mediana hamiltoniano. No passo 4, conforme já apresentado, cada rota é alocada a um destinatário com um método de análise de custos de atribuição. Então, o problema de localização é resolvido, levando a uma solução viável do LRP.

3.2.4. Modelos Heurísticos Iterativos

Salhi e Nagy (2007) propõem um modelo de solução de localização baseado nas distâncias radiais dos destinatários, utilizando dados sobre as rotas dos veículos utilizados. O modelo, conforme apresentado abaixo, propõe um procedimento heurístico que considera os pontos finais das rotas para melhorar a posição atual de cada instalação. Desta forma, a resolução dos problemas foca em um subconjunto menor de nós, ou seja, os referidos pontos finais das rotas.

Seja:

$J \rightarrow$ Conjunto de destinatários existentes ($j = 1, \dots, n$);

$I \rightarrow$ Conjunto de instalações disponíveis ($i = n + 1, \dots, n + p$);

$K \rightarrow$ Conjunto de veículos;

Parâmetros:

x_j, y_j – As coordenadas dos destinatários j ($j \in J$);

$q_j \rightarrow$ Demanda do destinatário j ($j \in J$);

$p \rightarrow$ Número de instalações;

$Q \rightarrow$ Máxima capacidade dos veículos;

$\delta \rightarrow$ Tempo de carregamento e descarregamento (tempos gasto nos destinatários convertido em distância);

$D \rightarrow$ Máximo tempo permitido nos veículos (em unidade de distâncias incluindo o tempo de carregamento e descarregamento - δ);

Variáveis de decisão:

x_i, y_i As coordenadas do depósito i ($i \in I$) ($x_i, y_i \in R^2$);

$t_{ijk} = 1$ se a instalação j segue a instalação i na rota k , onde: $i, j \in I \cup J, k \in K$;

$t_{ijk} = 0$ em caso contrário;

$$\text{Min } \sum_{k \in K} \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} t_{ijk} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in J} q_j \sum_{j \in I \cup J} t_{ijk} \leq Q \quad \text{onde } (k \in K), \quad (1)$$

$$\sum_{j \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} t_{ijk} (\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} + \delta) \leq D + \delta \quad \text{onde } (k \in K), \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in I \cup J} t_{ijk} = 1 \quad \text{onde } (j \in J) \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in S} \sum_{j \in ((I \cup J)/S)} t_{ijk} \geq 1 \quad \text{onde } (S \subseteq J) \quad (4)$$

$$\sum_{j \in I \cup J} t_{ijk} = \sum_{j \in I \cup J} t_{jik} \quad \text{onde } (k \in K, i \in I \cup J) \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in I \cup J} t_{ijk} \leq 1 \quad \text{onde } (k \in K) \quad (6)$$

$$t_{ijk} = (0,1) \text{ onde } (i \in I \cup J, j \in I \cup J, k \in K) \quad (7)$$

$$(x_i, y_i) \in R^2 \text{ onde } (i \in I) \quad (8)$$

As restrições (1) e (2) expressam a máxima capacidade e os limites máximos de distância. A restrição (3) determina que cada destinatário deve pertencer a exatamente uma rota. A restrição (4) garante que cada destinatário está em uma rota conectada ao conjunto de instalações.

A restrição (5) garante que cada local receba a entrada e a saída do mesmo veículo. A restrição (6) determina que um veículo pode ser originado apenas uma vez e a partir de um único depósito. Finalmente, as restrições (7) e (8) estabelecem que t_{ijk} é uma variável binária e x_i, y_i são variáveis reais.

Este é um problema não linear inteiro misto, sendo pouco provável ser encontrada solução ótima para problemas de tamanho médio ($n \geq 50$). Sendo assim, Salhi e Nagy (2007) propõe uma heurística iterativa simples para resolver este problema da classe NP-hard.

A heurística “end-point” é formada pelos seguintes passos:

1. Resolver o problema de localização e alocação para encontrar o número de instalações necessárias, seus locais e seus respectivos destinatários alocados;
2. Resolver o problema de roteirização de veículos para cada uma das instalações resultantes;
3. Para cada depósito i ($i \in I$), tomar os dois últimos destinatários de cada rota para formar um conjunto de nós E_i . (onde, $E_i = \{j \mid j \in J, \sum_{k \in K} (t_{ijk} + t_{jik}) \geq 1\}$.)

4. Para cada depósito i ($i \in I$), aplicar o procedimento *Weiszfeld* no conjunto E_i para encontrar um novo local para o depósito i . Este procedimento é realizado para minimizar a soma das distâncias radiais, o que consequentemente reduz o comprimento total da rota. A pesquisa começa com a localização do depósito atual e termina quando:
 - a. O número de iterações atinge um número prescrito;
 - b. A redução no custo total medida entre a soma das distâncias entre os pontos de extremidade em E_i e o depósito i de uma iteração para a próxima é insignificante;
 - c. A distância entre as duas localizações sucessivas pode ser desconsiderada.
5. Se nenhum dos locais de depósito mudou, parar a iteração. Caso contrário, vá para 2.

3.4.5 Modelos Heurísticos Hierárquicos

Dentre os modelos heurísticos hierárquicos destaca-se o algoritmo proposto por Melechovský et al. (2005), pela sua potencialidade de aplicação. Este modelo começa com a construção de uma solução viável inicial e procura por outras soluções melhores, com uma metaheurística híbrida de VNS (*variable neighborhood search*) e busca tabu (TS).

O VNS é uma abordagem simples, mas muito eficaz, que altera a rota cada vez que o algoritmo atinge um ótimo local (MLADENOVIC E HANSEN, 1997). Por outro lado, a busca tabu é uma metaheurística bem conhecida, sendo associada frequentemente a outras metodologias para obter um algoritmo eficiente. Assim, tal como descrito em Lapierre et al. (2004), esse algoritmo torna-se uma busca tabu com maior capacidade de resolução.

Seja:

$J \rightarrow$ Conjunto de destinatários existentes ($j = 1, \dots, n$);

$V \rightarrow$ Conjunto de instalações disponíveis ($v = n + 1, \dots, n + p$);

$K \rightarrow$ Conjunto de veículos;

$Q \rightarrow$ Capacidade dos veículos;

$W \rightarrow$ Máxima capacidade dos depósitos;

$q_i \rightarrow$ Demanda de cada destinatário ou instalação i ;

$f \rightarrow$ Custo por transporte de uma unidade da demanda i ;

$c_e \rightarrow$ Custo de passagem em cada ponto e ($e \in E$);

$\alpha \rightarrow$ Custo fixo de abertura do depósito;

$\beta \rightarrow$ Custo fixo por cada veículo utilizado;

Parâmetros:

$y_{ik} = 1$ se os destinatários ou terminais são visitados pelo veículo k ,

$y_{ik} = 0$ em caso contrário;

$z_j = 1$ se o depósito é utilizado;

$z_j = 0$ em caso contrário;

$v_{ij} = 1$ se o destinatário i é alocado no depósito j ;

$v_{ij} = 0$ em caso contrário;

$u_k = 1$ se o veículo k for utilizado;

$u_k = 0$ em caso contrário;

$x_{ek} =$ Número de vezes que os destinatários ou terminais são visitados pelo veículo k ;

$x_{ek} = \{0, 1, 2\}$

$$\text{Min } \sum_{j \in J} \alpha \cdot z_j + \sum_{j \in J} f \left(\sum_{i \in I \cup J} q_i \cdot v_{ij} \right) + \sum_{k \in K} \beta \cdot u_k + \sum_{e \in E} c_e \sum_{k \in K} x_{ek} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = 1 \quad \text{onde } (i \in V - J) \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} q_j y_{ik} \leq Q u_k \quad \text{onde } (k \in K), \quad (3)$$

$$\sum_{e \in \mathbb{Y}(i)} x_{ek} = 2 y_{ik} \quad \text{onde } (i \in V) \text{ e } (k \in K) \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V/J} q_i v_{ij} \leq W z_j \quad \text{onde } (j \in J), \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} y_{jk} = u_k \quad \text{onde } (k \in K) \quad (6)$$

$$y_{jk} \leq z_j \quad \text{onde } (k \in K) \text{ e } (j \in J) \quad (7)$$

$$y_{ik} + y_{jk} \leq 1 + v_{ij} \quad \text{onde } (i \in V/J), (k \in K) \text{ e } (j \in J) \quad (8)$$

$$\sum_{e \in \mathbb{Y}(S)} x_{ek} \geq 2 y_{ik} \quad \text{onde } (i \in S), (S \subseteq V/J) \text{ e } (k \in K) \quad (9)$$

$$y_{ik} = (0,1) \quad \text{onde } (i \in V), (k \in K) \quad (10)$$

$$x_{ek} = (0,1,2) \quad \text{onde } (e \in \mathbb{Y}(J)), (k \in K) \quad (11)$$

$$x_{ek} = (0,1) \quad \text{onde } (e \notin \mathbb{Y}(J)), (k \in K) \quad (12)$$

$$z_j = (0,1) \quad \text{onde } (j \in J) \quad (13)$$

$$v_{ij} = (0,1) \quad \text{onde } (i \in V/J), (i \in J) \quad (14)$$

$$u_k = (0,1) \quad \text{onde } (k \in K) \quad (15)$$

A função objetivo (1) reúne os diferentes custos existentes no modelo. Cada destinatário é atendido por um único depósito, devido às restrições (2). As capacidades dos veículos não podem ser ultrapassadas, devido às restrições (3); essas restrições também devem garantir que nenhum destinatário é atribuído a um veículo não utilizado.

As restrições (4) significam que para um nó i , destinatário ou depósito, ser visitado por um veículo k , se faz necessário que o nó de origem e o nó de seu destino também sejam visitados pelo veículo k . As capacidades dos depósitos são respeitadas com as restrições (5). Nas restrições (6), cada veículo é atribuído a um depósito. As restrições (7) garantem que nenhum veículo é atribuído a um depósito que não foi atribuído.

As restrições (8) garantem que se o destinatário i é servido pelo veículo k e se k é atribuído ao depósito j , então i também é atribuído à instalação j . As restrições (9) impedem as sub-rotas.

3.5 CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura sobre a abordagem LRP tem-se desenvolvido de forma crescente nos últimos anos e o aumento e a diversidade nos trabalhos publicados evidenciam que o tema tem-se tornado mais relevante nos últimos dez anos.

A proposta de utilização da abordagem LRP em substituição ao *Location Allocation Problems* (LAP) e ao *Vehicle Routing Problems* (VRP) resolvidos separadamente mostra-se viável em termos de implementação e com um vasto histórico de obtenção de melhores resultados, como descrito em Tuzun e Burke (1999), Akca et al. (2009), Prodhon e Prins (2014), entre outros autores.

A grande maioria das aplicações da abordagem LRP é realizada em nível estratégico e algumas ações táticas são observadas.

A revisão de Nagy e Salhy (2007) exclui os problemas de transporte de carga fracionada das estruturas hierárquicas a serem aplicadas neste tipo de abordagem devido às transferências entre terminais. Entretanto, provavelmente pelo aumento na diversidade dos trabalhos publicados, Drexl e Schneider (2015) mostram que é possível a utilização do LRP também em problemas de transporte de carga fracionada e de encomendas.

Esse tipo de problema pôde ser estudado a partir do momento que a abordagem LRP começou a tratar as transferências entre terminais, como nos problemas *Many-to-Many* LRP, ou em cadeias mais complexas.

Vários autores citam, principalmente nas revisões bibliográficas apresentadas, a concomitante existência de trabalhos que utilizam modelos exatos ou heurísticas. Se por um lado os modelos baseados em heurísticas ou metaheurísticas podem ser aplicados em instâncias maiores, os modelos exatos poderiam ser aplicados de uma forma mais simples, compreensível e adaptável para um maior número de variações existentes, baseando-se na avaliação de Drexl e Schneider (2013).

Nagy e Salhi (2007) destacam a aplicabilidade dos métodos exatos devido a bons resultados encontrados para casos específicos de LRP. Drexl e Schneider (2015) sugerem os melhores casos para a utilização de uma solução exata: “Os métodos exatos devem ser explorados em soluções ótimas de uma LRP através da minimização, para todos os subconjuntos de um conjunto de instalações, dos custos de abertura das instalações destes subconjuntos e dos custos de uma solução ótima para uma VRP com múltiplos depósitos. Estes múltiplos depósitos devem corresponder exatamente às instalações do subconjunto citado e devem ser capacitados”.

Com base no trabalho de Drexl e Schneider (2015), pode-se concluir que a solução para o tipo de problema em estudo se adequa à sugestão de aplicação de uma solução exata. Neste contexto, surge a motivação para o desenvolvimento e aplicação de uma modelagem baseada em Programação Linear Inteira Mista.

Na seção 3.3, apresenta-se que os estudos individuais da abordagem LRP com Multi-elos e *Many-to-Many* ainda são restritos. De forma complementar, deve-se notar nos trabalhos apresentados que a aplicação de um modelo exato para resolução de um problema *Many-to-Many* com múltiplos elos LRP ainda não foi localizada na literatura. Desta forma, o estudo simultâneo destes dois tipos de problemas é, até o momento, inédito e focado em uma área de estudo relevante para problemas de transporte de carga fracionada.

A Tabela 1 apresenta os trabalhos encontrados na literatura que possuem correlação com Multi-elos LRP e *Many-to-Many* LRP. A Tabela ainda apresenta as características de cada um desses trabalhos e o tamanho da maior aplicação realizada.

Tabela 1 – Estudos sobre problemas Multi-elos LRP e *Many-to-Many* LRP

Estudo	Ano	Veículos e Terminais Capacitados	Número de Veículos	Vários Produtos	Número de Elos	Many-to-Many	LRP	Tipo de Solução	Problema Prático	Tamanho da maior Aplicação
Nagy e Salhi	1998	Sim	Não Fixos	Não	2	Sim	Sim	Programação Linear Inteira Mista e Heurística	Não	10 Terminais e 249 Clientes
Wasner e Zapfel	2004	Sim	Não Fixos	Não	2	Sim	Não	Programação Linear Inteira Mista e Heurística	Sim	10 Terminais e 1 Hub
Ambrosino e Scutellà	2005	Sim	Não Fixos	Não	3	Não	Sim	Programação Linear Inteira Mista	Sim	1 planta, 5 CD's, 23 TP's e 145 clientes (GAP de 46,92%)
Lee et al.	2010	Sim	Não Fixos	Não	3	Não	Sim	Programação Linear Inteira Mista e Heurística	Não	30 embarcadores, 10 manufaturas, 10 terminais e 30 clientes
Çetiner et al.	2010	Não	Não Fixos	Não	2	Sim	Sim	Heurística	Sim	17 hub's e 81 clientes
Hamidi et al.	2012	Sim	Fixos	Sim	3	Não	Sim	Programação Linear Inteira Mista	Não	2 plantas, 2 DC's, 2 RD's e 4 clientes
Camargo et al.	2013	Não	Não Fixos	Não	2	Sim	Sim	Programação Linear Inteira Mista e Benders Decomposition	Não	10 hub's e 100 pontos de coleta e entrega
Hamidi et al.	2014	Sim	Fixos	Sim	3	Não	Sim	Heurística	Não	3 plantas, 30 DC's, 30 RC's e 380 clientes
Rieck et al.	2014	Sim	Fixo e igual para cada um dos hub's	Sim	2	Sim	Sim	Programação Linear Inteira Mista e Heurística	Não	40 embarcadores, 6 filiais e 100 destinos
Rodriguez-Martín et al.	2014	Sim	Um por hub	Não	2	Sim	Sim	Programação Linear Inteira Mista, Branch-and-cut	Não	50 hub's interagindo como pontos de coleta e entrega

Analisando os referidos trabalhos percebe-se que uma modelagem exata para este tipo de problema pode viabilizar a obtenção de soluções para revisão de rede em transporte de carga fracionada ou postal, possibilitando que estruturas reais com características mais complexas (LRP com múltiplos elos) sejam estudadas e que no cálculo destas soluções sejam avaliados os benefícios da criação de novos *hub's* de consolidação de cargas.

Conforme Drexler e Schneider (2015), as redes Multi-elos LRP são a mais importante extensão da abordagem LRP da última década e, em conjunto com Nagy e Salhi (2007), concluem que o pequeno número de trabalho encontrados, quatro, não retratam a importância deste tipo de estrutura.

Corroborando com essa afirmação, Gonzalez-Feliu (2009) define as redes com múltiplos elos como uma das estratégias mais comuns na implantação de redes de distribuição e conclui que o número de elos existentes em problemas reais tem-se ampliado devido às estratégias de *cross-docking* que viabilizam a redução de estoques. O transporte de carga fracionada, segundo o autor, é um dos principais exemplos deste tipo de rede.

Entretanto, os trabalhos de redes Multi-elos LRP existentes na literatura até o momento não foram capazes de tratar problemas de transporte fracionado, ou de forma mais ampla, redes *hub-and-spoke*. Conforme já apresentado neste trabalho, este tipo de rede demanda a resolução de problemas mais complexos, que podem envolver um maior número de produtos e que exigem a resolução dos fluxos de transferência entre terminais.

Os trabalhos de Ambrosino e Scutellà (2005) e Gonzalez-Feliu (2009) trataram de problemas com um produto único e não permitiram transferências nos mesmo nível de localização.

Os trabalhos de Hamidi et al. (2012, 2014) envolveram um problema que permitia a transferência entre terminais para o mesmo nível de localização; entretanto, o modelo exato do trabalho de 2012 foi testado em um pequeno problema (duas plantas, dois CD's, dois RD's e quatro destinatários), considerando apenas dois produtos e não foi possível avaliar nesta solução transferências entre o mesmo nível de localização.

Por outro lado, o modelo heurístico do trabalho de 2014 foi testado em um problema relevante; entretanto, considerou a existência de apenas cinco produtos diferentes e a solução final foi obtida através da resolução individual do problema para cada um dos produtos. Desta forma, entende-se que não seria possível a obtenção de uma solução ótima, porque não foram consideradas todas as oportunidades de redução de custos originadas do compartilhamento dos terminais e dos veículos pelos produtos existentes e seus respectivos fluxos de carga.

As outras redes analisadas foram as *Many-to-Many* LRP's, que conforme Camargo et al. (2013), também têm sido muito relevantes na última década pelo seu sucesso em aplicações no segmento de transportes, principalmente de carga fracionada e postal. A resolução dessas redes também é capaz de viabilizar a redução do tempo de entrega, custos operacionais e custos com infraestrutura, pois esses resultados são obtidos através das conexões dos *hub's* (transferências) para atendimento dos nós existentes na rede.

Dos seis trabalhos *Many-to-Many* LRP's analisados, cinco contam com apenas dois níveis de localização. Nagy e Salhy (1998), terminais e destinatários; Wasner e Zapfel (2004), *hub* e terminais de entrega; Çetiner et al (2010), terminais e cidades destinatárias; Camargo et al. (2013), *hub's* e pontos de coleta e entrega e Rodríguez-Martín et al. (2014), *hub's* e destinatários.

Nestes casos, não houve necessidade de tratamento individual por produto, provavelmente porque após o primeiro nível de transporte entre os nós, já se encontrava o ponto de início da rota de entrega ou o próprio ponto de entrega.

O único trabalho que analisou uma rede mais complexa foi Rieck et al. (2014), com pontos de coleta, *hub's* e pontos de entrega. Neste caso o número de produtos considerados foram três para a menor aplicação do modelo e apenas dois para a maior aplicação do modelo realizada. Neste trabalho também houve uma importante simplificação, que exigiu que todas as rotas existentes fossem pré-definidas. Entende-se que tal aproximação deve limitar consideravelmente a aplicação em problemas maiores, pois mesmo nos modelos menores que foram apresentados, não foram testadas todas as alternativas possíveis.

Em termos de simplificações, Nagy e Salhy (1998) utilizaram uma aproximação para os custos estimando as distâncias dos percursos, mas foi considerado por Wasner e Zapfel (2004) que essa aproximação pode resultar em grandes distorções nos resultados. Entretanto, Wasner e Zapfel (2004) não apresentaram resultados para as rotas dos veículos, o que pode restringir a classificação de seu trabalho como um LRP, visto que os próprios autores não classificam claramente seu modelo como um LRP.

Em Çetiner et al (2010), o cálculo dos custos nos terminais é realizado de forma simplificada, através de funções de desconto e, além disso, a solução ocorre de forma individual para cada um dos *hub's*.

Conforme observado por Camargo et al. (2013), sobre o trabalho de Çetiner et al (2010), como a solução no segundo estágio ocorre de forma individual para cada um dos *hub's* e as coletas e entregas são realizadas de forma simultânea, o modelo produz soluções onde as cidades são visitas mais de uma vez, sem que isso fosse realmente necessário.

A solução final também precisaria ser testada na prática, pois resultou em percursos com até cinco etapas operacionais, totalizando 55 horas de percurso, o que provavelmente não seria viável ou de simples implantação. O *gap* estimado para a solução ótima foi de 46,92%.

No trabalho de Camargo et al. (2013), da mesma forma que o trabalho de Çetiner et al (2010), funções de desconto com grandes variações são utilizadas para tratar as transferências entre terminais. Restrições de capacidade e diferenciação entre os produtos são desconsideradas, exceto sobre o tempo de trabalho dos veículos.

Concluindo a análise sobre os modelos existentes, Rodríguez-Martín et al. (2014) utilizam funções de desconto para estimar a consolidação de cargas nos *hub*'s, para suas transferências e também para os custos de distribuição.

Desta forma, para todos os trabalhos *Many-to-Many* apresentados, foram utilizadas simplificações que produzem distorções importantes entre o modelo proposto e a realidade operacional. Tal fato pode ter influído para que apenas três dos 10 trabalhos apresentados sejam práticos; entretanto, esses três trabalhos práticos também tiveram importantes aproximações em relação aos modelos operacionais existentes, conforme foi descrito nesta Revisão Bibliográfica.

Outro ponto relevante é que a análise dos trabalhos apresentados propicia a conclusão de que o estudo dos *Many-to-Many* LRP's e Multi-elos LRP demandam um maior desenvolvimento acadêmico e uma significativa parte dos autores analisados sugerem que outros trabalhos proponham modelos exatos ou heurísticas para resolução deste tipo de problema.

Sendo assim, uma proposta inédita de tratamento conjunto desses dois tipos de problemas LRP possibilitará o cálculo e a obtenção de uma solução mais alinhada com as demandas existentes no mercado de transporte de carga fracionada, possibilitando que aplicações reais possam ser realizadas e implementadas.

Além disso, conforme foi apresentado nesta conclusão, este trabalho também pode contribuir apresentando diversos avanços aos estudos individuais dos *Many-to-Many* LRP's e Multi-elos LRP, justamente por ter que lidar com a complexidade prática existente no transporte fracionado e por tratar ambos os problemas de forma simultânea.

4 MODELAGEM

4.1 INTRODUÇÃO

O modelo proposto para revisão de rede de transporte deve lidar com a resolução de uma classe de problemas que congrega a decisão sobre a quantidade e a localização de novos terminais de consolidação no transporte de carga fracionada, denominados como *hub's* e com a atribuição das rotas desde a origem até o destino final de um conjunto de cargas coletadas nos embarcadores. Essas rotas serão criadas a partir dos veículos disponíveis nos respectivos terminais capacitados de coleta, nas transferências entre esses terminais, ou entre esses terminais e os novos *hub's*; e nos terminais e *hub's* capacitados de entrega.

Durante o desenvolvimento do modelo, houve uma especial atenção para que o mesmo favorecesse aplicações práticas em empresas que utilizam redes de transporte de carga fracionada ou similares. Para tanto, foi considerada a utilização de informações comumente disponíveis nas empresas de transporte fracionado, sendo que os dados relativos aos embarques já estão contidos nos conhecimentos de transporte e os demais dados são associados aos custos, características dos ativos e produtividades operacionais que devem ser de conhecimento da equipe de gestão dessas empresas.

Sendo assim, considerando que estejam disponíveis os dados necessários para a busca de uma solução, o cálculo do custo total de uma operação de transporte de carga fracionada inicia-se com o custo de transporte em uma rota de coleta, associado aos custos de descarregamento, de *cross-docking* e de carregamento em um terminal capacitado de origem, de possíveis custos de transporte em rotas de transferência, de possíveis custos de descarregamento, de *cross-docking* e de carregamento nos terminais capacitados de destino ou *hub's*, finalizando com os custos de transporte das rotas de entrega aos seus respectivos destinos.

O nível de complexidade deste problema tem relacionamento com a quantidade de produtos envolvidos na operação e com as possibilidades de fluxos de carga que podem existir entre os diversos terminais de coleta e entrega. A quantidade de produtos existentes normalmente é grande, pois cada par entre embarcador e destinatário (conhecimento de transporte) precisa ser tratado de forma individual no percurso considerado, ou seja, é um produto diferente. Quanto aos fluxos de carga, todos os terminais coletam, transferem e entregam cargas aos demais terminais e *hub's*.

Essas duas características combinadas aumentam consideravelmente o número de possibilidades de fluxos na rede e exigem um controle individualizado dos conhecimentos de transporte, dificultando a obtenção da solução.

Conforme classificação proposta por Nagy e Salhy (2007), o tipo de dados de entrada utilizado no desenvolvimento deste modelo é o determinístico, devido à utilização de uma base de dados histórica obtida através das emissões dos conhecimentos de transporte eletrônico, Ct-es.

O período de planejamento é único; entretanto, esse período deve considerar um espaço de tempo composto pelos dias que compreendem o período entre a coleta e a entrega de todos os conhecimentos de transporte coletados, o que será detalhado no capítulo 5.

Os conhecimentos de transporte possuem um prazo de entrega acordado com os embarcadores; desta forma, toma-se como definição a obrigatoriedade do cumprimento da totalidade destes prazos de entrega acordados.

Os possíveis locais para implantação dos *hub's* no problema em estudo são pré-definidos, pois são os locais em que existe viabilidade para abertura de um *hub* com base nos volumes existentes. Esse grupo não pode ser considerado mercadologicamente como um grupo extenso e mostra o alinhamento com o modelo de classificação proposto por Nagy e Salhy (2007).

A modelagem proposta busca responder as seguintes questões:

- Quantos e quais *hub's* devem ser abertos?
- Quais as quantidades movimentadas nos terminais de coletas, entregas e *hub's*?
- Quais as quantidades transferidas entre os terminais de coleta e entrega?
- Quantos e quais veículos serão utilizados nessas transferências?
- Quais serão as rotas de atendimento das transferências entre terminais de coleta e entrega, incluindo o retorno dos veículos às suas origens?
- Quais as quantidades transferidas entre os terminais de coleta e os *hub's*?
- Quantos e quais veículos serão utilizados nessas transferências?
- Quais serão as rotas de atendimento das transferências entre terminais de coleta e *hub's*, incluindo o retorno dos veículos às suas origens?
- Quais as quantidades transferidas entre *hub's* e terminais de entrega?
- Quantos e quais veículos serão utilizados nessas transferências?
- Quais serão as rotas de atendimento das transferências entre *hub's* e terminais de entrega, incluindo o retorno dos veículos às suas origens?
- Quais terminais de coleta, *hub's* e terminais de entrega devem entregar conhecimentos de transporte diretamente aos destinatários?
- Quais as quantidades de entrega via terminais de coleta, *hub's* e terminais de entrega aos destinatários?
- Quantos e quais veículos serão utilizados nessas entregas?
- Quais serão as rotas de atendimento dos terminais de coleta, *hub's* e terminais de entrega aos destinatários?

A Figura 8, no Capítulo 2, mostra as etapas do modelo operacional de uma revisão de rede com diversos elos (Multi-elos LRP) e que trate de forma conjunta operações de coletas e entregas (*Many-to-Many* LRP).

No Capítulo 3 foi observado que, para Drexl e Schneider (2015), as redes com múltiplos elos têm atraído atenção da literatura apenas recentemente e acabam sendo a mais importante extensão da abordagem LRP na última década. Por outro lado, o problema apresentado no Capítulo 2, necessita de uma rede mínima de três elos e quatro níveis de localizações (embarcador, terminais, *hub's* e destinatários) para ser modelado.

Essa constatação já havia sido adiantada por Ambrosino e Scutellà (2005), através de suas afirmações de que o número de elos em modelos reais de revisão de rede tem aumentado, devido às estratégias de redução de estoques e consolidação de cargas, o que posteriormente foi confirmado por Gonzalez-Feliu (2009).

Outro fator fundamental para a modelagem de um problema real de revisão de rede de transporte de carga fracionada é a consideração de um sistema *hub-and-spoke* para a obtenção de sua solução (RIECK ET AL., 2014). O problema proposto nesta tese claramente tem as características que foram descritas por Rodríguez-Martín et al. (2014), pois diversas origens enviam cargas para diversos destinos, funcionando concomitantemente como terminais de coleta e entrega.

Essa natureza operacional, discutida por esses e outros autores já citados, indica que, para desenvolver a modelagem proposta, um tipo específico de problema denominado *Many-to-Many LRP* deve ser considerado. Esta análise fica ainda mais clara no trabalho de Camargo et al. (2013).

Frente ao que foi apresentado, que trata diretamente dos dois problemas estudados na seção 3.3, pode-se concluir que, para o estudo de redes de transporte de carga fracionada, uma modelagem que contemple esses dois tipos problemas de forma conjunta parece ser a mais adequada e convergente com o nível de evolução técnica atual sobre o assunto.

O que poderia ser considerado surpreendente é o fato de não ter sido localizado nenhum estudo com essas características até o momento.

Mas, conforme vem sendo apresentado neste trabalho, a evolução histórica do estudo, as restrições computacionais para solução de um problema formado por outros dois problemas da classe NP-hard, a provável necessidade de experiência de campo para desenvolvimento de uma adequada aplicação prática do modelo e, por último, a complexidade da rede e de suas restrições para obtenção de dados reais confiáveis podem ter sido os fatores limitantes para que houvesse essa lacuna no estudo do referido problema.

4.2 PREMISSAS

Antes da apresentação do modelo, faz-se necessário detalhar as premissas que foram definidas para os terminais e veículos e que embasam o seu desenvolvimento:

- Os pesos enviados pelos embarcadores são conhecidos e os terminais que atendem essas coletas também;
- Devido ao perfil de carga em estudo, os veículos que atendem esses embarcadores nas coletas foram considerados dedicados e diários;
- Um conhecimento de transporte é um conjunto de cargas coletada em um embarcador específico para um destinatário também específico. Esse controle padrão realizado pelas empresas de transporte está focado nos conhecimentos de transporte eletrônicos emitidos (Ct-e);
- O peso máximo de atendimento diário aos embarcadores está limitado à capacidade dos veículos fixos nas coletas. Normalmente, este tipo de veículo é acordado entre as partes e pode variar em períodos de alta e baixa demanda;
- Os custos dos veículos que atendem as coletas são compostos por uma parte fixa e uma parte variável com a quilometragem percorrida;

- Os terminais de coleta e entrega são capacitados em peso movimentado para carregamento e descarregamento. Foi definido que este valor de capacidade será igual, pois um terminal de *cross-docking* deve receber e expedir a carga que lhe for atribuída, não gerando estoque. De qualquer forma, nada impede que existam capacidades customizadas por atividade e por terminal;
- A frota de distribuição é considerada homogênea;
- A quantidade de veículos de transferência é considerada infinita, visto que pode ser considerado que existe viabilidade de contratação, na quase totalidade do mercado nacional, caso a capacidade dos veículos de transferência existente seja ultrapassada. Esses veículos adicionais são denominados particulares;
- Os veículos de transferência sempre retornam ao seu terminal de origem, em alinhamento com a operação atual;
- O custo de transferência entre os terminais é fixo e conhecido para os veículos de transferência e para os veículos particulares;
- As demandas de cada destinatário devem ser satisfeitas em sua totalidade, pois trata-se das aquisições dos destinatários junto aos embarcadores da empresa de transporte;
- Permite-se que um conhecimento de transporte seja dividido em dois ou mais veículos de entrega, na busca por um melhor aproveitamento dos veículos e, conseqüentemente, por uma melhor solução;
- A demanda total de um destinatário será atendida por um ou mais veículos de entrega, de acordo com o total de sua demanda. Esse pode ser considerado mais um fator de inovação no processo de modelagem, pois a grande maioria dos modelos analisados restringe o atendimento dos destinatários a apenas um veículo, o que não é observado, na prática, no mercado de grandes empresas de transporte;
- Cada rota de coleta ou entrega começa e termina no mesmo terminal, pois cada um dos veículos está alocado ao seu respectivo terminal;

- Os veículos de coleta e entrega são limitados a apenas uma rota, devido ao nível de comprometimento temporal nas grandes metrópoles e, principalmente, ao fluxo de um terminal de *cross-docking*, onde normalmente os veículos partem pela manhã, com uma rota completa de coleta ou entrega;
- A distância máxima permitida entre destinatários é de 100 km;
- O tempo total de trabalho de um veículo não é maior do que o limite de tempo de trabalho do motorista. Essa restrição é feita através da distância total percorrida (600 km), com uma equivalência com a velocidade média de trajeto;
- Os custos dos veículos que atendem as entregas são compostos por uma parte fixa e uma parte variável com a quilometragem percorrida.

4.3 MODELO PROPOSTO

4.3.1 Conjuntos

C : conjunto dos embarcadores da empresa de transporte;

C_o : subconjunto de embarcadores coletados pelo terminal o ($C_o \subseteq C$);

D : conjunto de destinatários;

D_o : subconjunto de destinatários entregues pelo terminal o ($D_o \subseteq D$);

O : conjunto das instalações candidatas a suportar a operação, ou seja, os terminais atuais da empresa e os possíveis novos *hub's*;

O_d : subconjunto de terminais candidatos à entrega para o destinatário d ($O_d \subseteq O$);

H : conjunto de veículos;

H_c : subconjunto de veículos utilizados para coleta no embarcador $c \in C$, ($H_c \subseteq H$);

H_t : subconjunto de veículos utilizados para transferência entre os terminais $(a, b) \in (O, O)$ e ($H_t \subseteq H$);

H_o : subconjunto de veículos utilizados para entregas pelo terminal $o \in O$ nos destinatários $d \in D$, ($H_o \subseteq H$);

N : conjunto de nós, indexado por $n \in C \cup D \cup O$;

A : conjunto de arcos, indexado por $(i, j) \in (C, O) \cup (O, O) \cup (O, D) \cup (D, D)$;

B : conjunto de arcos de transferência, indexado por $(a, b) \in (O, O)$ e $(B \subseteq A)$.

4.3.2 Parâmetros

c_o : custo fixo de abertura e manutenção do terminal o ;

cc_o : custo de carregamento do terminal o por unidade de peso;

cd_o : custo de descarregamento do terminal o por unidade de peso;

cf_h : custo fixo do veículo h , incluindo o custo do motorista;

cv_h : custo variável do veículo h por unidade de distância em viagem;

P_c : peso total enviado pelo embarcador c ;

$P_{c,d}$: peso enviado pelo embarcador c para o destinatário d ;

P_d : peso total enviado para o destinatário d ;

$l_{i,j}$: distância entre os nós i e j ;

l_{max} : distância máxima de viagem permitida para os veículos, com base na legislação para o motorista;

Q_o : capacidade de processamento do terminal o em peso movimentado;

Q_h : capacidade do veículo h em peso transportado;

$\bar{Q}H_o$: capacidade em peso transportado dos veículos de entrega do terminal o .

4.3.3 Variáveis de Decisão Binárias

$x_{i,j}^h$: 1 se o veículo h viaja no arco (i, j) e zero, caso contrário;

t_o : 1 se o terminal o for utilizado e zero, caso contrário;

v_h : 1 se o veículo h for utilizado e zero, caso contrário;

$x_{a,b}^{c,d,ht}$: 1 se o veículo de transferência ht viaja no arco (a, b) com peso enviado do embarcador c para o destinatário d e zero, caso contrário.

4.3.4 Variáveis de Decisão Reais

$y_{i,j}^h$: fluxo de carga no arco (i,j) transportado pelo veículo h ;

$y_{a,b}^{c,d,ht}$: fluxo de carga no arco (a,b) transportado pelo veículo de transferência ht do embarcador c para o destinatário d .

4.3.5 Formulação Matemática

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{o \in O} c_o t_o + \sum_{h \in H_c \cup H_o} c f_h v_h + \sum_{h \in H} \sum_{(i,j) \in A} c v_h l_{i,j} x_{i,j}^h \\ & + \sum_{i \in O} \sum_{h \in H} \sum_{j \in N} c c_o y_{i,j}^h + \sum_{j \in O} \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} c d_o y_{i,j}^h \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{h \in H_o} x_{i,j}^h \leq \left\lceil \frac{P_j}{\bar{Q} H_o} \right\rceil \quad \forall i \in O, \forall j \in D \text{ e } |H_o| > 1, \quad (2)$$

$$\sum_{h \in H_o} x_{i,j}^h \leq \left\lceil \frac{P_j}{\bar{Q} H_o} \right\rceil \quad \forall i \in D, \forall j \in O \text{ e } |H_o| > 1, \quad (3)$$

$$\sum_{h \in H_o} \sum_{j \in D \cup O} x_{i,j}^h = \left\lceil \frac{P_j}{\bar{Q} H_o} \right\rceil \quad \forall i \in D, \quad (4)$$

$$\sum_{h \in H_o} \sum_{i \in D \cup O} x_{i,j}^h = \left\lceil \frac{P_j}{\bar{Q} H_o} \right\rceil \quad \forall j \in D, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in D \cup O} x_{i,j}^h - \sum_{j \in D \cup O} x_{j,i}^h = 0 \quad \forall i \in D \cup O, \forall h \in H_o \text{ e } \forall (i,j) \notin (O,O), \quad (6)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{i \in N} y_{i,j}^h + \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} y_{j,i}^h \leq Q_o t_o \quad \forall j \in O, \quad (7)$$

$$y_{i,j}^h \leq Q_h v_h \quad \forall i \in C_o, \forall j \in O \text{ e } \forall h \in H_c, \quad (8)$$

$$y_{i,j}^h \leq Q_h v_h \quad \forall i \in O, \forall j \in O \text{ e } \forall h \in H_t, \quad (9)$$

$$\sum_{j \in D_o} y_{i,j}^h \leq Q_h v_h \quad \forall i \in O \text{ e } \forall h \in H_o, \quad (10)$$

$$x_{a,b}^h - x_{b,a}^h = 0 \quad \forall h \in H_t \text{ e } \forall (a,b) \in (O,O), \quad (11)$$

$$y_{i,j}^h - P_c = 0 \quad \forall i \in C_o, \forall j \in O \text{ e } \forall h \in H_c, \quad (12)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{j \in N} y_{i,j}^h - \sum_{h \in H} \sum_{j \in N} y_{j,i}^h = 0 \quad \forall i \in O, \quad (13)$$

$$\sum_{h \in H_o} \sum_{j \in D \cup O} y_{i,j}^h - \sum_{h \in H_o} \sum_{j \in D \cup O} y_{j,i}^h + \sum_{c \in C} P_{c,i} = 0 \quad \forall i \in D_o, \quad (14)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} l_{i,j} x_{i,j}^h \leq l_{\max} v_h \quad \forall h \in H_o, \quad (15)$$

$$\sum_{b \in O} \sum_{h \in H_t} x_{a,b}^{c,d,h} = 1 \quad \forall a \in O \text{ e } \forall (c \in C_a, d \in D_b), \quad (16)$$

$$y_{a,b}^{c,d,h} - P_{c,d} x_{a,b}^{c,d,h} = 0 \quad \forall (c \in C_a, d \in D_b) \text{ e } \forall h \in H_t, \quad (17)$$

$$\sum_{c \in C_a} \sum_{d \in D_b} y_{a,b}^{c,d,h} - y_{a,b}^h = 0 \quad \forall (a,b) \in (O,O) \text{ e } \forall h \in H_t, \quad (18)$$

$$\sum_{h \in H_b} x_{b,d}^h - \sum_{h \in H_t} x_{a,b}^{c,d,h} \geq 0 \quad \forall b \in O_d \text{ e } \forall (c \in C_a, d \in D_b), \quad (19)$$

$$y_{i,j}^h - Q_h x_{i,j}^h \leq 0 \quad \forall (i,j) \in A \text{ e } \forall h \in H, \quad (20)$$

$$x_{i,j}^h \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A \text{ e } \forall h \in H, \quad (21)$$

$$x_{i,j}^{c,d,h} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in B \text{ e } \forall h \in H_t, \quad (22)$$

$$t_o \in \{0,1\} \quad \forall o \in O, \quad (23)$$

$$v_h \in \{0,1\} \quad \forall h \in H, \quad (24)$$

$$y_{i,j}^h \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A \text{ e } \forall h \in H, \quad (25)$$

$$y_{i,j}^{c,d,h} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A \text{ e } \forall h \in H, \quad (26)$$

A função objetivo foi descrita através da fórmula (1), cujo objetivo da otimização é minimizar a referida função. Os custos a serem minimizados incluem o custo fixo dos terminais que forem selecionados e são conhecidos (c_o), os custos fixos dos veículos que forem selecionados e são conhecidos (cf_h) e os custos variáveis dos veículos por quilômetro (cv_h). Considerando que as distâncias percorridas nos arcos contidos no conjunto A são conhecidas e também os custos por distância percorrida de todos os veículos, calculam-se $cv_h l_{ij}$.

A função objetivo também inclui os custos de *cross-docking*, representados pelos custos de carregamento (cc_o) dos fluxos expedidos dos terminais e descarregamento (cd_o) dos fluxos recebidos nos terminais. A metodologia de obtenção desses custos será detalhada na aplicação prática da metodologia.

As restrições 2 e 3 especificam que nos arcos “x”, entre terminais (ou *hub's*) e destinatários, apenas o número de veículos compatível com a demanda do destino deve percorrer essa rota. O par de restrições também é relaxado para a inexistência de um arco com origem ou destino em um terminal, pois esse terminal pode não existir, o que obviamente poderia ser proibido, dada a natureza operacional existente, obrigando o funcionamento de todos os terminais existentes.

As restrições 4 e 5 indicam que para cada nó, exceto terminais, existam as adequadas quantidades de arcos saindo e chegando, formando assim as rotas e garantindo o correto atendimento dos destinatários.

A restrição 6 exige que um veículo específico entre e saia de um nó, garantindo a continuidade da rota. Esse veículo também precisa fazer parte do conjunto H_o de veículos pertencentes ao referido terminal. Desta forma, para os nós de terminais e destinatários, as restrições 2 a 6 asseguram que, se um veículo entra em um nó, ele precisa deixar esse nó. Além disso, deve atender a premissa de que cada destinatário seja atendido com a quantidade de veículos necessária.

A restrição 7 assegura que o total de fluxos recebidos (*inbound*) somados aos expedidos (*outbound*) de cada terminal não excedam a sua capacidade de processamento (*throughput*). A restrição 7 também assegura a existência conjunta de $y_{i,j}^h$, ou $y_{j,i}^h$, e t_j .

As restrições 8, 9 e 10 são as restrições de capacidade dos veículos e definem que em cada veículo a quantidade de peso embarcado não pode ser superior à sua capacidade. Essa relação entre a variável binária v_h e a variável de fluxo y_{ij}^h também obriga que exista um veículo para que exista fluxo de carga, sendo adaptadas as operações de coletas nos embarcadores, transferências entre terminais e entregas nos destinatários.

Nos casos dos veículos de coleta, a restrição 8 contempla o fluxo recebido no terminal e nos veículos de transferência, restrição 9, o fluxo expedido entre terminais. A restrição 10 também contempla a soma dos fluxos expedidos pelo terminal para os veículos de entrega, ou seja, o que foi embarcado. A restrição 11 obriga que os veículos de transferência retornem a base conforme já foi explicado.

As restrições 12, 13 e 14 são específicas para o equilíbrio dos embarcadores (12), terminais (13) e destinatários (14) em relação aos fluxos de carga. Elas asseguram que toda a carga coletada e transferida para um terminal seja encaminhada para a entrega ou transferida para outro terminal e, conseqüentemente, atenda todos os destinatários previstos para esse referido conjunto de cargas.

Esse fluxo, individualmente, será menor ou igual à capacidade máxima de atendimento dos veículos disponíveis para coleta, transferência ou entrega, devido às restrições 8, 9 e 10.

O peso do embarcador é atribuído ao fluxo entre o embarcador e o terminal responsável por essa coleta y_{ij}^h (restrição 12). A segunda restrição fundamental é que exista um equilíbrio nos terminais, para gerar o fluxo correto da carga pelos arcos, garantindo que todas as cargas recebidas sejam encaminhadas para as entregas ou transferências (restrição 13).

A restrição 14 exige o equilíbrio do fluxo em cada nó dos destinatários. Elas existem para garantir que sejam atendidos os fluxos de entrega existentes, desde que esses sejam iguais ou menores que a capacidade máxima de atendimento dos veículos disponíveis para o referido ponto de entrega. Essas restrições também garantem que os fluxos originários em qualquer origem sejam recebidos por seus destinatários específicos.

Além disso, elas equilibram o fluxo no referido nó, de forma que, após o abastecimento daquele destino, o fluxo de continuidade na rota, quando existente, seja a diferença entre o fluxo anterior no veículo e o fluxo entregue ao destino em questão.

As restrições 12, 13 e 14, combinadas com as restrições 2, 3, 4, 5 e 6, garantem que os fluxos de coleta e de entrega sejam atendidos dentro de uma rota contínua, viável e que respeite as restrições dos veículos alocados em cada rota.

A restrição 15 limita o percurso total de uma rota com base em um limite de tempo definido por lei para o tempo de trabalho do motorista. Essa conversão é feita com base nos quilômetros rodados realizados em uma velocidade média pré-definida, assunto que será detalhado na aplicação do modelo.

O conjunto de restrições 16, 17, 18 e 19 trata das transferências de cargas entre os terminais. As variáveis $x_{a,b}^{c,d,h}$ e $y_{a,b}^{c,d,h}$ foram concebidas para possibilitar o tratamento das cargas transferidas entre os terminais e associar cada embarcador com seu destinatário, ou seja, representar um conhecimento de transporte ou um grupo de conhecimentos.

A restrição 16 avalia, para cada conhecimento de transporte, a necessidade de transferência entre os terminais de origem e destino. Nos casos em que a variável $x_{a,b}^{c,d,h}$ tem $a = b$ (coleta no embarcador c e a entrega no destinatário d são realizadas pelo mesmo terminal), significa que a transferência não precisa ser realizada.

Nos demais casos, quando $a \neq b$ em uma variável $x_{a,b}^{c,d,h}$ (coleta no embarcador c é realizada pelo terminal a e a entrega no destinatário d é realizada pelo terminal b), o modelo exige a transferência entre os terminais a e b , utilizando os custos de carregamento, descarregamento e transferência entre os terminais na função objetivo.

A restrição 17 relaciona as variáveis $x_{a,b}^{c,d,h}$ e $y_{a,b}^{c,d,h}$, ou seja, o fluxo de carga $y_{a,b}^{c,d,h}$ só existe se a variável $x_{a,b}^{c,d,h}$ for igual a 1. Além disso, ela iguala o fluxo de transferência ao peso a ser enviado do embarcador c para o destinatário d . A restrição 18 relaciona as variáveis $y_{a,b}^{c,d,h}$ e $y_{a,b}^h$, transferindo o fluxo da variável auxiliar para a variável $y_{a,b}^h$, que também é considerada na função objetivo (1).

A restrição 19 relaciona as variáveis $x_{a,b}^{c,d,h}$ e $x_{b,d}^h$, assegurando que a carga coletada do embarcador c pelo terminal a e que foi transferida através dos terminais a e b seja entregue pelo terminal b para o referido destinatário d .

A restrição 20 garante que para que exista fluxo em um arco é necessária a existência deste respectivo arco, ou seja, obriga a existência, ou inexistência, conjunta de $x_{i,j}^h$ e $y_{i,j}^h$ entre dois nós.

As restrições 21 a 24 levam em conta a integralidade das variáveis e as restrições 25 e 26 limitam os fluxos a valores não negativos.

4.4 MODELO NA LITERATURA E INOVAÇÕES

A busca pela otimização de uma rede de transporte de carga fracionada deve ser obtida através da minimização do custo total formado pela soma de um conjunto de custos inerentes à operação em análise, composta pelos custos de terminais, *cross-docking* e veículos.

Conforme Prodhon e Prins (2014), em todos os trabalhos pesquisados, a função objetivo era de minimização dos custos fixos de abertura dos terminais e dos custos com as rotas. Lee et al. (2010) utilizou um formato de cálculo do custo multiplicando o custo por milha, pela distância em milhas e pela existência do referido arco. Tal solução é muito similar à proposta neste trabalho.

Melechovský et al. (2005) incluíram, nos custos dos terminais, os custos de *cross-docking* das cargas movimentadas. Em complemento, localizou-se apenas Tavakkoli-Moghaddam et al (2010) que consideraram uma variação desses custos, tratando o *cross-docking* de forma independente por terminal.

A inovação proposta na função objetivo deste trabalho considera a inclusão desses custos de *cross-docking* de forma independente por terminal e também de forma independente para as funções de carregamento e descarregamento, pois não foi localizado nenhum trabalho que considerou esses custos por atividade.

Tal fato pode ser considerado um ganho qualitativo, pois na prática os custos de *cross-docking* podem ser diferentes por terminal e por atividade de carregamento ou descarregamento. Essa proposta de função objetivo deve resultar em um modelo de custeio mais alinhado com a complexidade existente em operações de transporte de carga fracionada.

As restrições 2 a 3 referem-se às rotas entre terminais ou *hub's* e destinatários e têm origem no clássico problema VRP, onde apenas um arco chega e apenas um arco deve partir do respectivo nó. Esse arco deve estar associado a um destinatário específico e o número de veículos que parte do terminal deve ser igual ao número de veículos que retorna.

O sinal de menor ou igual é utilizado, pois existe relaxação para a inexistência do respectivo terminal, o que já havia sido utilizado por Salhi e Nagy (2007) e outros autores.

Não foi localizado nenhum trabalho similar que permita o atendimento de um destinatário por mais de um veículo, que é uma necessidade do problema tratado neste trabalho. Sendo assim, para flexibilizar a utilização de mais de um veículo atendendo aos destinatários, utilizou-se o arredondamento para o número inteiro imediatamente superior ao termo $\frac{Pj}{\bar{Q}_{H_o}}$ para compatibilizar o número de veículos a serem analisados com a demanda existente para um destinatário específico.

As restrições 4 e 5 têm origem e função similar às restrições anteriores e foram utilizadas por Ambrosino e Scutella (2005). Elas restringem os arcos que chegam e saem de um destinatário, garantindo a continuidade dos veículos que o atendem.

A restrição 6 foi apresentada por Bodin et al. (1983) e posteriormente utilizada por Ambrosino e Scutella (2005), Salhi e Nagy (2007), Akca et al. (2009) e Hamidi et al. (2012) e garantem a continuidade das rotas de entrega.

A restrição 7 também não foi localizada na literatura e restringe a capacidade do terminal pelo volume recebido e expedido. Lee et al. (2010) havia utilizado uma restrição similar que restringia a capacidade que saia de um terminal, entretanto, conforme já explicado essa restrição também foi utilizada para garantir a existência conjunta dos fluxos de entrada e saída nos terminais e a abertura do terminal.

As restrições 8, 9 e 10 têm similaridade com as restrições utilizadas por Nagy e Salhi (1998), mas são utilizadas de forma individual, de acordo com a capacidade dos veículos de coleta, transferência e entrega. Outra implementação realizada foi inserir o controle dos fluxos nos terminais, pois trata-se do ponto onde existe maior confiabilidade nos dados devido as conferências e emissões de conhecimentos.

A restrição 11 não foi localizada na literatura e exige o retorno dos veículos de transferência em alinhamento com o problema em estudo.

Embora o equilíbrio da quantidade de arcos que chegam e saem nos terminais e destinatários (nós) seja comum nos trabalhos de uma série de autores já citados, o equilíbrio dos fluxos de carga nos terminais, funcionando como uma restrição complementar, não foi localizado.

Portanto, a restrição 12 garante a transferência da demanda do embarcador para o terminal responsável pela coleta e a restrição 13 garante que toda a carga que foi coletada ou recebida de transferência seja expedida em transferência ou inclusa em rotas de entrega para atendimento dos destinatários através deste terminal específico.

Esse modelo de utilização das restrições de fluxo também não foi localizado na literatura e a Figura 9 mostra a representação do equilíbrio descrito na restrição 13.

Figura 9 – Representação do equilíbrio descrito na restrição 13 em um terminal

A restrição 14 é observada no trabalho de Nambiar et al. (1981) e posteriormente foi utilizada por Akca et al. (2009). Ela garante o fluxo de carga nas rotas de entrega, fornecendo a demanda correta dos destinatários e prevenindo a formação de sub-rotas. A restrição 15 é comum ao trabalho de Srivastava e Benton (1990), que limita a distância percorrida pelos veículos de entrega.

As restrições 16 a 19 não foram localizadas na literatura e foram desenvolvidas com o objetivo de garantir o fluxo de transferência entre os terminais existentes. Variáveis auxiliares com cinco índices foram criadas e depois atribuídas aos respectivos arcos e fluxos correspondentes.

A restrição 16 garante que exista apenas um arco entre um par de terminais, a restrição 17 atribui um par contendo um arco (x) e fluxo de carga (y) para cada um dos conhecimentos de transporte emitidos, a restrição 18 atribui o fluxo da variável auxiliar para o fluxo entre os terminais e a restrição 19 garante que o fluxo transferido seja entregue. As demais restrições são comuns em outros trabalhos, pois associam variáveis existentes obrigando a sua existência conjunta ou limitam variáveis.

4.5 PROGRAMAÇÃO NO GUROBI

A programação para otimização de um modelo matemático pelo *software* Gurobi pode ser executada por linha de comando. Para tanto, é requerido um arquivo de entrada no formato LP.

O formato LP captura um modelo de otimização de uma forma mais simples para os seres humanos compreenderem do que outros formatos e geralmente é mais natural para produzir (GUROBI OPTIMIZATION, 2016). A Figura 10 mostra um exemplo de um arquivo LP do Gurobi.

Minimize / Maximize	Função-Objetivo
obj: $c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$	
Subject To	Restrições
c1: $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$ (ou $\geq$, ou $=$)	
c2: $a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$ (ou $\geq$, ou $=$)	
...	
cm: $a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$ (ou $\geq$, ou $=$)	
General / Binary	Integralidade das Variáveis
$x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n$	
End	Instrução Final

Figura 10 – Exemplo de um arquivo LP do Gurobi.

A conversão dos dados de entrada do problema e do modelo matemático proposto, em um arquivo no formato LP foi implementada em linguagem C e compilada no Microsoft Visual Studio 2015 (EXPRESS). O Fluxograma do método de solução utilizado para interação com o Gurobi está descrito na Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma do método de solução utilizado para interação com o Gurobi

Iterativamente, para cada conjunto de restrições do modelo descrito na seção 4.4.5, o algoritmo de conversão varre os respectivos conjuntos de entrada, representados pelos arquivos de dados descritos no Apêndice A (parâmetros, embarcadores, destinatários, veículos, terminais, conhecimentos de transporte e distâncias).

Por exemplo, na restrição 8, a capacidade dos veículos de coleta é descrita pela carga coletada em cada embarcador $i \in C_o$ que foi transportada para cada terminal $j \in O$ através do veículo $h \in H_c$. Essa carga coletada para os terminais j não podem exceder a capacidade do veículo $h \in H_c$, definida por Q_h .

No pseudocódigo da Figura 12 é possível observar que cada restrição possui um cabeçalho, as variáveis de decisão e uma restrição. A função “Escrever_Arquivo_LP()” é utilizada para gerar o arquivo de entrada do Gurobi no formato LP.

A Figura 12 apresenta a conversão da restrição 8 da seção 4.3.5 em Formato LP do Gurobi.


```

Início Conjunto de Restrições (8)
1.  $m \leftarrow 0$ ;
2. Para (cada embarcador  $i \in C_o$ ) faça
3.   Para (cada veículo  $h \in H_c$ ) faça
4.     Escrever_Arquivo_LP (cm:); [cabeçalho da restrição]
5.      $m \leftarrow m + 1$ ;
6.     Para (cada terminal  $j \in O$ ) faça
7.       Escrever_Arquivo_LP ( $+ y_{j,i}^h$ ); [variável de decisão – somatório]
8.     Fim-para
9.     Escrever_Arquivo_LP ( $\leq Q_h v_h$ ); [Restrição]
10.  Fim-para
11. Fim-para
Fim Conjunto de Restrições (8)

```

Figura 12 – Conversão das Restrição 8 para o Formato LP.

O pseudocódigo das demais restrições não foi exemplificado, pois entende-se que a conversão das restrições no formato LP do Gurobi segue rigorosamente o modelo matemático já descrito na seção 4.4.5.

4.6 ÁREAS DE APLICAÇÃO

Este modelo matemático pode ser aplicado em operações de transporte de carga fracionada ou em operações de distribuição, desde que, se necessário, algumas adaptações sejam realizadas em acordo com o modelo operacional existente.

No primeiro tipo de aplicação, transporte de carga fracionada, caso o modelo seja aplicado em operações que envolvam entregas diretas aos consumidores finais ou entregas de encomenda ou postal, o modelo deve ser adaptado para que seja possível a formação de rotas de coleta (*LRPPD*) ou rotas combinadas de coletas e entregas simultâneas (*LRPSPD*), conforme detalhado na seção 3.2.

O segundo tipo de aplicação, distribuição, pode ser entendido como uma modelagem simplificada de transporte de carga fracionada, mas que não envolve a etapa de coleta. Este problema tem o mesmo objetivo de instalação de novos *hub's* que visam a minimizar o custo de atendimento dos destinatários.

Entretanto, neste trabalho, o modelo que será apresentado está alinhado com operações de transporte de carga fracionada com perfil de coleta em grandes embarcadores, transporte entre empresas (*B2B*) e disponibilidade ilimitada de veículos de transferência.

Caso existam situações em que o problema de localização de um terminal não tenha correlação direta com sua roteirização, pode-se concluir que o modelo apresentado não é indicado. Um exemplo são terminais que sejam atendidos por rotas “*milk run*” de diversos fornecedores, através de rotas geradas nestes referidos fornecedores.

Porém, na maioria dos casos de transporte de carga fracionada, distribuição e operações similares existentes, as entregas podem ser realizadas por diversos terminais. Nestes casos, o problema de roteirização e localização dos terminais deveriam ser considerados simultaneamente. Sendo assim, essas são as aplicações que se adequam ao modelo apresentado.

Uma suposição feita na usual modelagem de localização de terminais (LAP) é que as entregas são feitas em uma rota única, que atenda um único destinatário. Partindo deste pressuposto, o custo de entrega não depende de outras entregas que sejam feitas em uma mesma rota.

Entretanto, sabe-se que, na prática, grande parte das entregas é realizada ao longo de múltiplas paradas, através de uma única rota que conduz a dois ou mais destinatários. Portanto, o custo de entrega depende dos diversos destinatários localizados nessa rota específica e da forma como são realizadas essas entregas dentro da rota.

Sendo assim, resolver um problema prático com o modelo proposto pode levar a um resultado mais preciso com a consideração de várias paradas nas rotas e com o tratamento conjunto da localização dos terminais. Tal solução deve produzir impactos positivos em termos de custos, devido ao já citado maior alinhamento da solução com os problemas práticos existentes.

4.7 CONCLUSÃO DA METODOLOGIA

Neste capítulo foi apresentada a metodologia proposta para resolver o problema de revisão estratégica de rede de transporte de carga fracionada, com foco em empresas de grande porte. Neste modelo operacional, onde um terminal pode ao mesmo tempo ser responsável por operações de coleta, transferências e rotas de entrega, é avaliada a implantação de novos *hub's*, como alternativa para a otimização da rede de transporte de carga fracionada estudada.

Com base na revisão bibliográfica realizada, pôde-se concluir que tal característica operacional aumenta a complexidade do modelo porque, além de atender as rotas de entrega com múltiplos destinos, trata as transferências entre terminais (*hub-and-spoke*), o que faz com que diversos terminais, que coletam e entregam, possam interagir entre si.

Em alinhamento com Barreto et al. (2007) e Tuzun e Burke (1999), que sugerem a utilização da abordagem LRP para problemas com múltiplas paradas em uma rota, percebe-se que o problema a ser estudado, definido no Capítulo 2, claramente possui essa característica.

As premissas, notações, parâmetros e variáveis que compõem o referido modelo são apresentados e discutidos em conjunto com o modelo matemático e suas restrições. São apresentadas também as áreas de aplicação para as quais entende-se que o modelo seja aplicável.

São apresentadas também, as inovações observadas em relação às publicações analisadas no Capítulo 3: custos de *cross-docking* independentes por terminal e por atividade, atendimento aos destinatários com mais de um veículo, restrições de movimentação controladas pelos volumes recebidos e expedidos, gestão e equilíbrio das transferências entre terminais, retorno dos veículos de transferência e equilíbrio do fluxo de carga nos terminais.

O estudo de problemas onde empresas de transporte prestam serviços a seus clientes (embarcadores), entregando os produtos (conhecimentos de transporte) destes embarcadores aos seus clientes (destinatários), não foi encontrado na literatura.

Um fator relevante em relação ao referido desenvolvimento, é que o modelo foi concebido para atender um problema prático existente no mercado de transporte rodoviário de carga fracionada brasileiro e teve que se adaptar aos dados e restrições presentes neste mercado.

Desta forma, não se trata de um modelo que foi desenvolvido e posteriormente buscou-se uma aplicação adequada à sua formulação. Pelo contrário, foi um modelo desenvolvido para resolver um problema específico, que é fundamental neste importante segmento da economia, visando à busca pela redução nos custos e à melhora no nível de serviço no transporte rodoviário de carga.

Nesta linha, conforme ressaltado por Prodhon e Prins (2014), existe na literatura carência de trabalhos que descrevam em detalhe a estrutura e as características do problema real modelado, que é o objetivo deste trabalho.

5 TESTES DO MODELO

5.1 INTRODUÇÃO

Para que fosse possível testar a adaptabilidade do modelo ao problema e à rede propostos, diversos testes foram realizados. Os testes iniciaram-se com a modelagem no programa Lindo®, (LINDO SYSTEM INC., 2014), no qual foram testados dois problemas, um com 2 embarcadores, 2 terminais de coleta e entrega, 4 destinatários e 4 produtos (conhecimentos de transporte) e outro com 2 embarcadores, 3 terminais de coleta, entrega e *hub*'s, 6 destinatários e 7 produtos.

Entretanto, quando se tentou transcrever a aplicação prática, o programa Lindo® não compilou, provavelmente pelo tamanho do problema. Posteriormente, os mesmos dois problemas de testes foram resolvidos com o IBM ILOG® versão demo, (IBM, 2015), mas a referida versão também não permitiu maiores avanços, devido ao número máximo de variáveis permitidas.

Por último e de forma definitiva, a validação do modelo foi realizada no pacote de otimização Gurobi Optimizer 5.6.0, (GUROBI, 2015). Nesta ferramenta foram testados os dois problemas anteriores e mais dois novos problemas, um com 12 embarcadores, 10 terminais de coleta, entrega e *hub*'s, 21 destinatários e até 252 produtos diferentes e a aplicação prática com 48 embarcadores, 15 terminais de coleta, entrega e *hub*'s, 40 destinatários e 98 produtos diferentes.

Na aplicação prática, conforme proposto no objetivo deste trabalho, o modelo foi utilizado para resolução de um caso real. Esta aplicação foi comparada com um software líder de mercado, Supply Chain Guru (LLAMASOFT, 2014), tendo como objetivo a revisão da rede de transporte rodoviário de carga fracionada do Estado de São Paulo de uma das três maiores empresas de transporte desse segmento no Brasil.

Em alinhamento com o Capítulo 2, principalmente com as Figuras 5 e 6, o objetivo desta aplicação prática foi demonstrar a realização de uma revisão estratégica de rede na empresa de transporte para o Estado de São Paulo. Esta otimização verificou as possibilidades de melhoria na rede atual através da abertura de novos *hub's* e de um sistema de roteirização que utilize veículos próprios partindo dos terminais atuais e dos novos, conforme apresentado nas Figuras 7 e 8.

Importante deixar claro que diversos outros testes foram realizados, mas não estão sendo apresentados. Por exemplo, foram testados modelos que continham um maior número de recursos disponíveis, com maiores custos, que conduziram para a mesma solução. Desta forma, também foi possível concluir que o modelo está sendo capaz de utilizar apenas os terminais e os veículos necessários para a obtenção da solução ótima.

Apresentam-se, a partir de agora, os detalhes sobre a modelagem e os resultados obtidos com a aplicação do modelo nas instâncias de teste e na aplicação prática.

Os modelos operacionais, dados e custos, foram obtidos através da realidade operacional existente, o que será detalhado na aplicação. Por questões de confidencialidade, algumas vezes os modelos operacionais foram adaptados a uma realidade aproximada e os dados apresentados foram arredondados para números superiores ou inferiores, de forma a não explicitar uma base de dados estratégica.

É importante ressaltar que tal “opção estratégica de confidencialidade” não alterou a proporcionalidade das comparações realizadas e nem originou resultados desalinhados com a realidade prática, pois as mudanças foram pouco representativas frente a um mercado com tanta variação de modelos operacionais, base de dados e custos.

Desta forma, entende-se que, para a instância de teste e para a aplicação prática, existiam os subsídios necessários para o correto desenvolvimento deste trabalho.

5.2 VALIDAÇÕES

Para que fosse realizado o teste inicial, conforme Figura 13, foram utilizados dados adaptados de uma microrregião interna ao Estado de Santa Catarina. Essa microrregião possuía dois terminais (Florianópolis e Joinville) e avaliou-se a oportunidade de instalar um *hub* em Blumenau para realizar entregas na região.

Essa instância de teste do modelo apresentado no capítulo 4 foi obtida com base em dados fictícios de um modelo operacional de uma empresa de transporte de carga fracionada. O modelo operacional avaliado está descrito na Figura 13.

Figura 13– Configuração da instância de teste.

Dentre os vários existentes, serão analisados os seis principais destinatários da empresa de transporte em estudo, na região próxima a Blumenau, que poderiam ser atendidos por qualquer um desses dois terminais ou pelo novo *hub*. Para abastecer esses seis destinatários, foram escolhidos dois embarcadores, um de cada terminal, onde ambos possuem um perfil de carga baseado no histórico de conhecimentos de transporte emitidos para os respectivos destinatários.

Portanto, para este problema teste, deve-se definir se o *hub* em Blumenau será aberto e quais terminais serão responsáveis por atender a cada um dos destinatários. Entende-se que tal aplicação possibilita uma validação da aplicabilidade da ferramenta, dos resultados obtidos e se as restrições existentes estão sendo atendidas pelo modelo.

Os veículos de coleta “HC1” e “HC2” são compostos por um conjunto de cavalo mecânico e carreta bitrem e os veículos de transferência e entregas são compostos por um conjunto de cavalo mecânico e carreta. As restrições de capacidade de processamento asseguram que o total de fluxos recebidos e expedidos não exceda a capacidade do terminal.

Conforme já adiantado, o problema foi transcrito para três ferramentas de otimização, mas, a partir de agora, apenas os resultados obtidos com o Gurobi Optimizer 5.6.0 serão apresentados (GUROBI, 2015). Tal aplicação possibilitou que o problema fosse resolvido de forma exata, por programação linear inteira mista. As configurações do computador em que o modelo foi testado estão descritas na Figura 14.

Figura 14 – Configurações do computador utilizado na instância de teste.

Apenas como efeito comparativo, o Lindo® necessitou de um pouco mais de 30 segundos para apresentar o resultado dessa instância de testes; o IBM ILOG®, um pouco mais de dois segundos e o Gurobi®, menos de um segundo, considerando que a modelagem utilizada e os resultados foram praticamente idênticos nos testes realizados.

5.2.1 Resultados

Para uma visão geral dos resultados do modelo considera-se que as variáveis iniciadas com “X” indicam que naquele específico arco existe fluxo de carga alocado ao veículo descrito. Para exemplificar, “XAD1HA1” igual a um indica que entre o terminal A e o destinatário D1 existe fluxo de carga na rota para o veículo “HA1”.

Analogamente, as variáveis iniciadas com “Y” indicam qual o fluxo de carga em quilogramas para aquele específico arco existente, ou seja, “YD5D6HE2” igual a 10.000 indica que entre os destinatários D5 e D6 existe um fluxo de carga na rota para o veículo “HE2” de 10 toneladas.

Observa-se que, em um arco específico, conjuntamente com um veículo também específico, obrigatoriamente, se as variáveis que se iniciam com “X” forem iguais a zero, os seus fluxos também devem ser zero, conforme pode ser observado no par “XAD1HA2” e “YAD1HA2”, pois não existe fluxo neste nó. A Figura 15 mostra os resultados obtidos pelo modelo.

As cargas foram coletadas em cada um dos embarcadores (1 e 2) e entregues aos destinatários (1, 2, 3, 4, 5 e 6). A solução obtida para realização da operação em um ciclo único de coleta, transferência e entrega foi de R\$ 33.180,15. Este custo inclui o custo total de manutenção dos terminais e de todos os veículos, pois os custos fixos e variáveis foram considerados no modelo.

O próximo passo proposto foca na validação dos resultados obtidos. Com essa validação será possível, através da instância de teste inicial realizada, concluir se o modelo se adapta ao problema para o qual foi desenvolvido e se as restrições e cálculos estão sendo executados de forma correta.

Figura 15 – Visão geral dos resultados obtidos pelo modelo aplicado na instância de teste.

5.2.2 Validação dos resultados – alocação de recursos e fluxos de carga

Analisando-se os resultados obtidos, a solução foi desmembrada por embarcador para que seja possível observar se o modelo está atendendo as demandas existentes concomitantemente com as restrições que foram impostas, a Figura 16 representa o fluxo de atendimento do embarcador 1 aos seus destinatários e a Figura 17 o fluxo de atendimento do embarcador 2 aos seus destinatários.

Figura 16 – Visão geral do fluxo de atendimento do Embarcador 1 aos seus destinatários.

Acompanhando o fluxo da carga, observa-se que a carga do embarcador 1 foi coletada corretamente pelo veículo “HC1”, que trouxe a carga para o terminal A. Racionalmente, o terminal A atendeu o destinatário 1 com o veículo “HA1” disponível neste terminal, evitando os custos de transferência.

Para atender os destinatários 2, 3 e 6, o exato fluxo para esses destinos foi transferido pelo veículo “HT” para o Terminal C. No caso do fluxo com origem no embarcador 1, foram criadas duas rotas de entrega.

O destinatário 6 foi atendido pelo veículo “HE2” posteriormente ao destinatário 5 e os destinatários 3 e 2 foram atendidos, respectivamente, pelo veículo “HE1”.

Figura 17 – Visão geral do fluxo de atendimento do Embarcador 2 aos seus destinatários.

Para o outro embarcador, observa-se que a carga foi coletada corretamente pelo veículo “HC2”, que trouxe a mesma para o terminal B. O terminal B atendeu o destinatário 4 com o veículo “HB1”.

Para atender os destinatários 2 e 5, o exato fluxo destes destinos foi transferido pelo veículo “HT” para o terminal C. No caso do fluxo com origem no embarcador 2, por consolidação de carga com o embarcador 1, foram utilizadas as rotas de entrega citadas do veículo “HE1” para atender o destinatário 2 e do veículo “HE2” para atender o destinatário 5.

5.2.3 Validação dos resultados – atendimento as restrições

As restrições 2 a 6 foram atendidas, pois as rotas dos veículos foram corretamente formadas nas coletas e entregas. Houve total equidade nos fluxos de entrada e saída de terminais e destinatários, atendendo as restrições 12 a 14.

As restrições 7 a 10, que tratam da capacidade dos terminais e dos veículos foram atendidas, os veículos retornaram à base conforme a restrição 11 e houve equilíbrio nos fluxos de transferência, restrições 16 a 19. A Tabela 2 descreve os testes de equilíbrio realizados nos terminais.

Tabela 2– Atendimento às restrições de capacidade de processamento nos terminais.

TERMINAL A		TERMINAL B		TERMINAL C	
Descarregamento		Descarregamento		Descarregamento	
Embarcador 1	30.000	Embarcador 2	35.000	Terminal A	22.000
Descarregamento	30.000	Descarregamento	35.000	Terminal B	23.000
Carregamento		Carregamento		Carregamento	
Destinatário 1	8.000	Destinatário 4	12.000	Destinatário 2	13.000
Terminal C	22.000	Terminal C	23.000	Destinatário 3	7.000
Carregamento	30.000	Carregamento	35.000	Destinatário 5	15.000
Total	60.000	Total	70.000	Destinatário 6	10.000
Movimentado		Movimentado		Carregamento	45.000
Capacidade de		Capacidade de		Total	90.000
Processamento	105.000	Processamento	105.000	Movimentado	
				Capacidade de	
				Processamento	105.000

Repara-se que o fluxo total movimentado também pôde ser validado. Considerando que o peso dos embarcadores deve ser recebido e expedido nos terminais e que as transferências também devem ser recebidas e expedidas, tem-se:

$$2 \times (30.000 + 35.000) + 2 \times (22.000 + 23.000) = 220.000.$$

Esse valor é idêntico à soma dos fluxos movimentados: $60.000 + 70.000 + 90.000 = 220.000$.

Em relação às restrições em volumetria e valor, essas foram validadas através dos cálculos de cubagem, conforme descrito na seção 5.2. A Tabela 3 mostra os referidos cálculos e o Peso que foi utilizado, com base no perfil de carga embarcada.

Tabela 3 – Atendimento às restrições dos conhecimentos de transporte emitidos.

EMBARCADOR 1						
	Peso Real (kg)	Volume (m3)	Peso Cubado (Kg)	Valor (R\$)	Peso Cubado Valor (Kg)	Peso (kg)
Destinatário 1	8.000	21,40	6.420	420.000	7.560	8.000
Destinatário 2	5.000	16,40	4.920	170.500	3.069	5.000
Destinatário 3	6.600	23,10	6.930	388.850	7.000	7.000
Destinatário 6	9.500	33,33	10.000	240.000	4.320	10.000

EMBARCADOR 2						
	Peso Real (kg)	Volume (m3)	Peso Cubado (Kg)	Valor (R\$)	Peso Cubado Valor (Kg)	Peso (kg)
Destinatário 1	8.000	26,40	7.920	412.300	7.421	8.000
Destinatário 2	12.000	36,50	10.950	345.789	6.224	12.000
Destinatário 3	15.000	45,20	13.560	620.545	11.170	15.000

5.2.4 Validação dos resultados – custos

Os custos da solução apresentados na seção 5.3.1 foram também calculados em planilha eletrônica, para validação dos resultados obtidos no Gurobi®. A Tabela 4 apresenta os resultados de forma resumida, que levam à validação do modelo de cálculo.

Tabela 4 – Validação dos custos

Custo Fixo	
Filiais	17.575,74
Veículos de Coleta	886,36
Veículos de Entrega	1.181,80
Veículos de Transferência	-
Total - Custo Fixo	19.643,90
Custo Variável	
Veículos de Coleta	74,25
Veículos de Entrega	1.837,00
Veículos de Transferência	6.710,00
Carregamento nas Filiais - Entregas	924,00
Descarregamento nas Filiais - Coletas	2.265,00
Movimentação (Des/Carregamento) nas Filiais - Transferências	1.726,00
Total - Custo Variável	13.536,25
Custo Total	
Custo Total (Fixo + Variável)	33.180,15

5.3 INSTÂNCIAS COMPLEMENTARES

Conforme apresentado na seção 3.3 e discutido ao longo deste trabalho, as Redes Multi-elos LRP e as Redes *Many-to-Many* LRP's não foram tratadas de forma conjunta na literatura e mesmo quando tratadas de forma individual, diversas aproximações foram consideradas na busca por uma solução satisfatória.

Considerando esse cenário, entende-se que entre os pontos citados em que houve uma evolução em relação às demais aplicações na literatura, dois merecem atenção especial devido à sua relevância na busca pela solução de uma revisão de rede de transporte: o tratamento das transferências entre terminais e a quantidade de produtos transportados.

Em relação às transferências, conforme apresentado, nenhum dos trabalhos analisados tratou as movimentações entre filiais no que tange a veículos de transferência. Entretanto, nas instâncias de testes e na aplicação prática, as rotas de transferência foram consideradas e são apresentadas.

Em relação à quantidade de produtos, a maioria dos trabalhos considerou um produto único e os trabalhos que utilizaram mais de um produto se restringiram a um número muito restrito de produtos.

Desta forma, testes foram realizados para avaliar o impacto do aumento do número de produtos (neste caso, conhecimentos de transporte) no tempo e na qualidade das soluções encontradas. Para essas aplicações foi utilizada a instância com 12 embarcadores, 10 terminais de coleta, entrega e *hub's* e 21 destinatários que têm origem em uma rede real.

Foram analisados os resultados em cinco aplicações diferentes, com, respectivamente, 12, 32, 72, 152 e 252 produtos diferentes. O número de veículos também variou para que fosse possível atender o aumento do fluxo de carga originado pelo aumento no número de embarques. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados das instâncias devido as variações no número de produtos e veículos

Instância (Embarcadores ; Filiais e Hub's ; Destinatários)	Número de Veículos	Número de Produtos Conhecimentos de Transporte	Solução R\$	Gap (Objetivo Gurobi)	Tempo de processamento em minutos para uma precisão de:		
					95%	99%	100%
(12 ; 10 ; 21)	28	12	184.654,30	-	0,08	0,33	0,60
(12 ; 10 ; 21)	32	32	191.026,30	0,08%	0,02	0,42	-
(12 ; 10 ; 21)	58	72	196.226,30	0,18%	0,63	0,80	-
(12 ; 10 ; 21)	103	152	205.226,30	0,30%	13,08	260,32	-
(12 ; 10 ; 21)	193	252	223.226,30	0,12%	40,33	40,33	-

Além do valor do custo encontrado para a melhor solução, são informados o *gap* para o melhor objetivo encontrado pelo Gurobi e os tempos de processamento para que a solução tenha uma precisão de 95%, 99% e 100% em relação ao referido objetivo. O tempo de processamento foi limitado a 24 horas.

Percebe-se que, mesmo com pouco tempo de processamento, boas soluções são encontradas. Entretanto, a solução ótima demanda muito mais tempo, provavelmente pelo número de variáveis e equações que precisam ser testadas para garantir que essa realmente seja a melhor solução.

Os valores encontrados de *gap* em relação ao objetivo do Gurobi para cada uma das instâncias, com 24 horas de processamento como limite, foram muito pequenos e indicam que os resultados obtidos estão muito próximos da solução ótima. Também fica claro que o aumento no número de produtos impacta diretamente no aumento da complexidade na busca pela solução ótima, o que não inviabilizou que o modelo apresentado nesse trabalho encontre a solução para esse tamanho de instância.

5.4 CONCLUSÃO DOS TESTES

Neste capítulo foram discutidos os testes realizados, incluindo a validação dos custos obtidos, restrições e dados utilizados para resolução do problema. As validações dos resultados foram realizadas sobre três óticas:

- Alocação de recursos e fluxo: avalia de que forma os ativos foram alocados na solução do problema e a coerência do fluxo de carga desde sua origem até o destino final;
- Atendimento às restrições: verifica o nível de atendimento do modelo às restrições, provendo um resultado alinhado com o fluxo operacional e a realidade existente;
- Custos: avalia a consistência dos resultados em termos de custos.

Os resultados obtidos atenderam rigorosamente os objetivos esperados para os referidos testes. A solução encontrada abriu o terminal de Blumenau e considerando seus custos mais atrativos de distribuição pela menor distância, concentrou o atendimento dos destinatários dessa região formando rotas de entrega racionais com os dois veículos disponíveis.

Repara-se que os destinatários 1 e 4 também não foram atendidos por Blumenau, pois poderia ser uma alternativa, porque as capacidades dos dois veículos disponíveis neste terminal não atenderiam tal demanda.

O modelo também foi aplicado em mais cinco instâncias para que fosse possível avaliar qual o impacto do aumento no número de produtos, que ainda não foi explorado na literatura, na busca pela solução ótima.

Sendo assim, considerando os referidos testes e os demais realizados que não foram apresentados, entende-se que existem as condições necessárias para a aplicação prática pretendida.

6 APLICAÇÃO PRÁTICA

6.1 AMBIENTE DA APLICAÇÃO PRÁTICA

Com quase 64 anos de atuação exclusiva no mercado brasileiro, a Atlas Transportes & Logística é resultante da agregação de novos serviços em uma empresa de transporte. Desde sua fundação a empresa teve como objetivo atuar nacionalmente, o que pôde ser observado com a abertura, em Aracaju (SE), do primeiro terminal da empresa fora do eixo Rio-São Paulo, em 1956 (DBA, 2004).

A divisão de transportes (Atlas Transportes), no desenvolvimento deste trabalho, possuía uma rede formada por 45 terminais exclusivos de transporte rodoviário de carga fracionada. Em 2014 foram transportados aproximadamente dois milhões de toneladas coletadas em 2.700 clientes ativos, utilizando mais de 2.000 veículos dedicados, que percorreram juntos 88,8 milhões de quilômetros para entregar aos destinatários mais de dois milhões e duzentos mil conhecimentos de transporte (ATLAS, 2014). Em termos financeiros, essa operação de transporte rodoviário de carga fracionada movimentou em 2014 quase 30 bilhões em valor de produtos transportados, ou 0,54% do PIB nacional.

Avaliando a dimensão geográfica da rede, pode-se dizer que cobre todo o território nacional, pois tem um nível de atendimento próximo a 98% dos 5.565 municípios brasileiros. Para conseguir essa amplitude de atendimento com um custo competitivo, a empresa conta com parceiros locais em cada um de seus terminais, que são responsáveis por aproximadamente 3% do peso entregue aos destinatários. A rede de terminais da empresa foi apresentada na Figura 2.

A rede apresentada foi sendo desenvolvida de acordo com as demandas geradas pelos embarcadores da empresa de transporte. Historicamente, terminais foram abertos e fechados por dois fatores preponderantes:

- Relação entre os indicadores de rentabilidade dos embarcadores (clientes) conquistados em um terminal, abatido dos custos deste mesmo terminal;

- Capilaridade da rede de entrega do terminal para atender os embarcadores deste terminal e os destinatários deste e dos demais terminais da empresa em sua região geográfica.

Em 2012, havia sido criada nesta empresa uma área de projetos estratégicos, que ficava na hierarquia de responsabilidade da diretoria operacional, com o objetivo de melhorar os processos internos, melhorar o nível de serviço e reduzir custos. Entre os diversos projetos desta área, iniciado fevereiro de 2013, destacava-se o projeto de revisão estratégica de rede.

O desenvolvimento deste trabalho está alinhado com o referido projeto em termos de dados de entrada e resultados esperados; sendo assim, torna-se possível comparar os resultados desta aplicação prática com os resultados do projeto realizado na empresa, que utilizou um *software* de mercado. Devido ao tamanho da malha existente e à quantidade de dados envolvidos, que passam de um bilhão de inserções no *software* citado, (*Supply Chain Guru*) o projeto de revisão de rede também foi realizado por estado.

Os dados fornecidos pela empresa para aplicação do modelo proposto nesta tese, para a devida comparação, foram do estado de São Paulo. A escolha desta região foi motivada pelo entendimento comum de que esta seria a rede estadual de distribuição mais complexa, devido a:

- Maior número de conhecimentos de transporte movimentados;
- Maior número de toneladas coletadas e entregues;
- Maior número de municípios com coletas e entregas regulares;
- Maior número de embarcadores e destinatários de grande porte, respectivamente, com coletas e entregas regulares;
- Maior número de terminais existentes, empatado com Minas Gerais e Bahia;
- Maior número de restrições operacionais (tráfego, circulação de veículos, pedágios, retenção na coleta e entrega e afins).

6.2 PROCESSO DE MODELAGEM

A aplicação prática visa à revisão estratégica de rede de transporte de carga fracionada para os conhecimentos de transporte coletados e entregues dentro do Estado de São Paulo na Atlas Transportes, possibilitando o tratamento conjunto dos problemas de localização de instalações e roteirização de veículos.

A empresa tem quatro terminais de transporte de carga fracionada no Estado, sendo que um deles (Guarulhos) é um *hub* de consolidação que não faz parte deste estudo, pois movimenta cargas originadas nas regiões Sul, Centro-Oeste, Nordeste e Norte, destinadas a outra dessas mesmas regiões.

Os terminais dentro do Estado que estão inclusos no objeto de estudo são: São Paulo, Campinas e Ribeirão Preto, que são responsáveis pelas operações de coleta, transferência e entrega.

As áreas de atendimento existentes durante a aplicação eram fixas e estavam relacionadas com os aspectos explicitados na seção 6.1, ou seja, São Paulo, Campinas e Ribeirão Preto dividiam os municípios a serem atendidos dentro do Estado de São Paulo e cada um desses terminais era responsável por todas as coletas e entregas realizadas nessas jurisdições.

Sendo assim, quando um conhecimento de transporte destinado a um município que esteja na jurisdição de Ribeirão Preto é coletado por Campinas, o mesmo será transferido entre os terminais, para que possa ser viabilizada essa entrega.

Em alinhamento com as Figuras 7 e 8 do Capítulo 2, o objetivo desta revisão estratégica de rede é verificar a viabilidade de implantação de um ou mais *hub's* para consolidação de carga, definir as melhores localizações para esses *hub's* e as rotas de coleta, transferência e entrega a serem realizadas pelos veículos disponíveis em cada um dos terminais (atuais e *hub's*), que atendam a todos os embarcadores e destinatários.

Conforme discutido, o processo de modelagem realizado foi alinhado com o projeto desenvolvido na empresa e dividido em quatro etapas. A primeira etapa da modelagem trata do entendimento detalhado da operação, suas jurisdições, restrições e níveis de serviços esperados.

Essa etapa foi realizada com base nos dados gerados por um grupo de trabalho multifuncional que era composto por uma equipe de consultoria externa que havia sido contratada para a implantação do *software* e por funcionários da empresa. As informações necessárias estavam disponíveis para levantamento e foram retiradas diretamente do banco de dados da empresa ou em medições de campo.

A segunda etapa, tratamento de dados, foi responsável pela conversão de dados práticos em uma base de dados otimizável, em alinhamento com os dados de entrada do *software Supply Chain Guru*. Essa conversão, utilizando outros *softwares* de tratamento de dados, também converteu dados operacionais de um ano em períodos menores, considerando as sazonalidades diárias, semanais e mensais do negócio. Estes mesmos dados foram cedidos para o desenvolvimento deste trabalho.

A terceira etapa foi responsável por otimizar os dados obtidos na etapa anterior. Essa etapa utilizou o *software Supply Chain Guru* e o modelo proposto neste trabalho para resolução do problema prático. Os mesmos dados tratados foram introduzidos em ambas as ferramentas de otimização, na busca por um resultado ótimo, ou o mais próximo disso possível.

A quarta etapa é responsável por avaliar se os resultados obtidos através da otimização são válidos e principalmente exequíveis. Posteriormente, essa etapa também será a responsável por colocar em prática a nova rede proposta e medir os resultados dos ganhos efetivados e das possíveis perdas existentes.

De qualquer forma, esse processo é dinâmico e todas as suas etapas devem interagir entre si. Sempre que necessário, deve-se voltar à primeira etapa para validar alterações ou novas implementações e o processo deve-se iniciar novamente, até que a quarta etapa seja finalizada com sucesso. A Figura 18 apresenta o processo de modelagem utilizado neste trabalho, apresentado de forma resumida.

Figura 18 – Processo de Modelagem da Aplicação Prática.

Conforme já adiantado, devido à realização do projeto de revisão estratégica de rede pela Atlas Transportes utilizando a ferramenta *Supply Chain Guru*, a primeira etapa de entendimento da rede existente foi desenvolvida com um longo trabalho de entrevistas, análise dos dados existentes, cronoanálise e observações práticas.

As restrições de capacidade dos terminais foram calculadas com base no tamanho do terminal e da capacidade de processamento (*throughput*) do terminal, que é determinada pela produtividade de suas equipes operacionais.

Existiam ainda outras restrições avaliadas que podem limitar a capacidade de processamento de um terminal, como por exemplo: número de docas, número máximo de conhecimentos de transporte emitidos, áreas de recebimento e expedição, entre outros. Essas características foram consideradas através de um trabalho de cronoanálise que analisou todos esses aspectos.

A Figura 19 apresenta o fluxograma de transcrição das informações práticas para um conjunto de dados que pudessem ser utilizados nas ferramentas de otimização. Esta segunda etapa foi realizada em praticamente todas as áreas da empresa.

Figura 19 – Transcrição das informações práticas em dados para as ferramentas de Otimização.

Um dos resultados desta segunda etapa foram os pesos obtidos através do tratamento de dados da base histórica. Esse tratamento de dados levou em consideração as variações diárias dos dados existentes, tomando como referência o peso descrito na equação (3) do Capítulo 2, que é calculado automaticamente por um sistema da empresa de transporte.

O tratamento realizado para obtenção desses pesos diários utiliza a metodologia de interpolação espacial de dados denominado método de interpolação cúbica “*spline*”, que está descrito no Apêndice C.

O resultado final do tratamento de dados reduziu a base de um ano para uma semana. Apresenta-se na Tabela 6 os dados que foram fornecidos através de um novo tratamento de dados que reduziu esses cinco dias da referida semana útil em um único dia. Esses dados foram utilizados nas aplicações.

Tabela 6 – Peso e Jurisdições dos principais municípios do Estado de São Paulo

DESTINO		Pontos Entrega	ORIGEM			
			SP	CP	RP	TOTAL
São Paulo	SP	7,1	127.847	2.350	464	130.661
Barueri	S1	1,8	38.657	3.185	441	42.283
Cajamar	S2	0,6	2.479			2.479
Cotia	S3	0,7	1.732		229	1.961
Diadema	S4	1,7	28.243	49	1	28.293
Embu	S5	0,8	6.117			6.117
Guarulhos	S6	1,2	21.575	297	40	21.912
Itapeerica da Serra	S7	0,5	605			605
Itapevi	S8	0,8	10.294	7		10.301
Mogi das Cruzes	S9	0,5	9.376	38		9.414
Osasco	S10	0,6	4.737			4.737
Santo André	S11	0,6	7.759	145		7.904
São Bernardo	S12	0,8	8.227			8.227
São Caetano	S13	0,6	2.209		464	2.673
Suzano	S14	0,7	1.101			1.101
		19	270.958	6.071	1.639	278.668
Campinas	CP	3,2	19.073	4.458	567	24.098
Americana	C1	0,7	980			980
Atibaia	C2	0,5	948			948
Bragança	C3	0,5	2.050	132	126	2.308
Hortolândia	C5	0,6	1.270	219		1.489
Indaiatuba	C6	0,6	1.123			1.123
Itu	C7	0,7	1.489		351	1.840
Itupeva	C8	0,6	1.208			1.208
Jundiaí	C9	0,8	6.869	148	22	7.039
Limeira	C10	0,7	1.459	3.013	16	4.488
Louveira	C11	0,6	10.741			10.741
Mogi-Guaçu	C12	0,5	3.660	16		3.676
Mogi-Mirim	C13	0,6	2.575			2.575
Piracicaba	C14	2,1	28.542	163		28.705
Rio Claro	C15	0,5	1.677	891		2.568
Salto	C16	0,6	2.399			2.399
Santa Barbara do Oeste	C17	0,7	1.677			1.677
São Carlos	C18	0,5	1.598			1.598
Sorocaba	C19	1,4	7.597	12.454	16	20.067
Sumaré	C20	0,8	12.975	955		13.930
		17	109.910	22.449	1.098	133.457
Ribeirão Preto	RP	2,7	20.472	2.064		22.536
Araraquara	R1	0,7	2.160	631		2.791
Batatais	R2	0,5	1.229		28	1.257
Franca	R3	0,5	4.861	91		4.952
Jau	R4	0,6	651			651
		5	29.373	2.786	28	32.187

Importante ressaltar que o processo de modelagem, tanto para essa aplicação prática quanto para a aplicação do *Supply Chain Guru*, exigiu a definição de um dia de operação típico que represente a sazonalidade existente na rede em que o modelagem foi aplicada.

Entretanto, no fundo o que se busca é chegar a configuração ótima da rede logística levando em conta a roteirização dos veículos, para o que necessita-se dessa definição do dia típico de operação a partir do qual se possa considerar os impactos da roteirização requerida na localização das instalações.

Outra análise importante é sobre os prazos de entregas firmados, pois percebe-se que não existia a possibilidade de que os conhecimentos de transporte aguardassem para serem embarcados em outro dia, ou seja, não existia a possibilidade de existência de estoque, pois o *cross-docking* precisava ser realizado de forma imediata.

Casos em que exista a possibilidade de decisão sobre o embarque da carga, ou seja, que a carga possa ficar estocada para embarcar em um período futuro seriam melhor representados através de uma otimização multiperíodo. Nesses casos, a solução ótima deve considerar, além dos aspectos descritos neste trabalho, as decisões sobre os períodos de consolidação de carga nos terminais e *hub*'s para embarque.

Importante ressaltar que os trabalhos multiperíodo em LRP foram muito poucos explorados na literatura devido ao aumento de complexidade neste tipo de tratamento, segundo Drexler e Schneider (2015).

Em relação aos embarcadores, foram utilizados todos os 48 clientes da empresa de transporte com emissões constantes de conhecimentos de transporte que, obrigatoriamente, tinham origem e destino localizados na região em estudo, conforme a concepção da rede anteriormente descrita.

Para os destinatários foi utilizada a simplificação sugerida pela *Llamasoft* na modelagem do *Supply Chain Guru*. Esta simplificação considera que o conjunto de destinatários existentes em cada um dos municípios é representado por um cliente único. Para esses destinatários foram atribuídos pesos equivalentes à soma dos pesos do grupo de destinatários existentes naquele município e também foi definido que esses destinatários estariam localizados no marco zero de cada um dos municípios.

A Tabela 6 também apresenta o número médio de destinatários atendidos (pontos de entrega) em cada um dos municípios e constata-se que, na região em estudo, apenas 20% dos municípios possuíam mais de um destinatário sendo atendido por dia.

A simplificação utilizada tem alinhamento com a proposta de desenvolvimento do modelo que permitiu que os conhecimentos de transporte pudessem ser divididos, pois mais de um destinatário, nestes casos específicos, foram representados por um ponto de entrega único.

Portanto, ainda restam dois pontos de atenção que necessitam de um melhor esclarecimento. O primeiro faz referência ao referido impacto da simplificação adotada na modelagem, em que as rotas são avaliadas por pontos de entrega equivalentes que representam mais de um ponto de entrega diária ou até mesmo um ponto que pode não ter sido visitado em um dia específico.

Por tratar-se de uma revisão estratégica de rede, que tem como objetivo descobrir a melhor configuração de terminais, *hub's* e dos transportes de transferência e entrega que os envolvam, a rede proposta deve considerar as diversas variações que ocorrem diariamente de pesos e, principalmente, dos destinatários envolvidos.

A alternativa a essa rede proposta seria uma otimização multiperíodo onde as variações diárias da rede fossem consideradas dia a dia. Entretanto, mesmo os proprietários de uma robusta ferramenta de mercado como o *Supply Chain Guru*, não optaram por essa concepção técnica e utilizaram a simplificação descrita devido ao volume de informações envolvidas e o tempo demandado na busca de tal solução.

Segundo a experiência prática dos mesmos, o aumento da complexidade no levantamento dos dados e na otimização não seria justificado por um aumento na precisão dos resultados obtidos, justamente pela variabilidade dos dados futuros.

O segundo ponto de atenção trata da relação entre o resultado da aplicação do modelo e a implementação operacional.

A divisão dos conhecimentos de transporte, em uma parte relevante dos casos, não está alinhada com os modelos operacionais de entrega porque a documentação vigente no Brasil não permite que um conhecimento de transporte seja entregue de forma separada, a não ser que os veículos sejam transportados em comboio. Outro ponto de restrição são os destinatários que na maioria das vezes não aceitariam receber os conhecimentos de transporte em mais de uma entrega.

O *Supply Chain Guru* não trata o planejamento por conhecimento de transporte. Em alinhamento com o processo de modelagem, que será detalhado na seção 6.3, o SCG trabalha com os volumes totais movimentados. Para esta ferramenta, as tratativas em nível de conhecimento de transporte devem ser utilizadas no planejamento diário da operação em outra ferramenta de otimização denominada *Transportation Guru*.

Em complemento, deve-se considerar que a própria solução ótima busca consolidação de carga e evita que um veículo tenha que ir mais de uma vez ao mesmo destinatário. Os resultados indicam a coerência desta análise, pois houve apenas seis divisões de conhecimentos de transporte. O Apêndice A mostra as divisões de conhecimentos encontradas na solução.

Entretanto, é importante ressaltar que, em ambos os pontos de atenção, o modelo e a metodologia poderiam ser alterados, seja para considerar todos os pontos de destino e suas reais localizações, seja para não permitir a divisibilidade dos conhecimentos de transporte. A opção pelas considerações aqui descritas ocorreu para permitir a comparação com o *Supply Chain Guru* e com os resultados do trabalho que estava sendo realizado.

6.3 SUPPLY CHAIN GURU (SCG)

Essa aplicação detalha a terceira etapa do processo de modelagem que foi realizada com o *software Supply Chain Guru*. De forma a evidenciar a aderência do *Supply Chain Guru* a aplicações para este tipo de problema são apresentadas algumas referências encontradas sobre o *software* e sua utilização.

O *Supply Chain Guru* (SCG) define-se como um *software* de mercado que permite aos usuários modelar, otimizar e simular suas operações em redes logísticas. Ele deve ser utilizado como alternativa em projetos e explora os níveis de serviço, desempenho, custos e riscos associados com as propostas de alteração da rede, inserida em uma única plataforma de *software* integrado (LLAMASOFT, 2014).

Manataki et al. (2014) define o SCG como um *software* que combina técnicas de otimização e simulação. Seus elementos básicos são: terminais, produtos, demanda, políticas de abastecimento, políticas de transporte, custos, fluxos de transporte e políticas de inventário.

Polak (2014) trata o SCG como um *software* integrado de otimização que é aplicado em revisão de rede e estoques. Para esse autor existem três componentes que são atrativos para modelagens de *supply chain* em empresas que utilizam o *software*:

- Tem uma interface intuitiva com dados de entrada e saída podendo ser manipulados em planilha ou banco de dados;
- O *software* tem uma larga base de dados de inteligência, incluindo: dados históricos, geoposicionamento, mapas e custos de *cross-docking*;
- O pacote de solução contém múltiplos “*solvers*” que possuem algoritmos que utilizam a abordagem de programação dinâmica.

Segundo Chou (2014), entre os programas de mercado, evidências ainda não comprovadas cientificamente sugerem que o SCG é uma ferramenta de otimização em *supply chain* de mais fácil utilização e provavelmente mais robusta que outras alternativas de mercado como os *softwares* Cast ou iLog.

Estes e outros autores evidenciam a aplicabilidade do *software* para problemas de revisão de rede e seu potencial na busca por melhores soluções operacionais.

6.3.1 *Aplicação do Supply Chain Guru*

Embora não seja o escopo principal deste trabalho, serão descritos de forma geral os parâmetros de aplicação do SCG para que seja possível a realização de estudos complementares futuros por aqueles que possam se interessar pelo tema.

Conforme descrito por Manataki et al. (2014), foram utilizadas as tabelas de entradas de dados disponíveis, exceto os parâmetros relativos à política de inventário, que não estão relacionadas com operações de *cross-docking*. São elas:

- Terminais: Os terminais envolvidos foram classificados como terminais (FL_), os embarcadores como fábricas (*factory*) geradoras de demanda (FA_) e os destinatários como clientes finais (Sem prefixo);
- Produtos: Os conhecimentos de transporte expedidos por cada um dos embarcadores foram modelados como um produto único por origem;
- Demanda: Associa os produtos com cada um dos seus destinatários, ou seja, designação dos conhecimentos de transporte emitidos;
- Políticas de abastecimento: Alocar cada embarcador (FA_) com seus terminais de coleta (FL_) e definir que cada terminal pode abastecer qualquer outro terminal ou qualquer destinatário;
- Custos: Incluir os custos e capacidades de carregamento e descarregamento dos veículos;

- Políticas de transporte (veículos): Definir todos os veículos de cada terminal e *hub*, seus custos fixos e variáveis, restrição por período de trabalho, capacidade e velocidade;
- Fluxos de transporte: Associa os pares de distância entre: embarcadores com terminais, terminais entre si e terminais com destinatários. Associa também os conhecimentos de transporte que podem ser transportados em cada rota, porém nesta modelagem não existe qualquer tipo de restrição neste sentido.

Essa modelagem acabou demandando uma gama de informações totalmente alinhada com o modelo proposto neste trabalho. O período de otimização também foi único e suficiente para a coleta, transferência e entrega de todos os conhecimentos de transporte.

Testes de validação dos resultados apresentados foram realizados e suportam a confiabilidade nos dados obtidos. A visão geral dos resultados, que demorou 13 segundos de processamento e a validação complementar da solução sobre a utilização dos veículos é apresentada no Apêndice B.

6.3.2 Resultados

De forma análoga à entrada dos dados, os resultados são apresentados em quatro tabelas resultantes da modelagem no SCG e em uma quinta tabela com a referida validação da solução. Essas tabelas são apresentadas no Apêndice B.

A seção 10.1 mostra os fluxos entre terminais e entre terminais e *hub*. Os primeiros fluxos apresentam a quantidade transportada e recebida (*inbound*) em cada um dos terminais de coleta: 410.241 kg em SP, 31.307 kg em CP e 2.765 kg em RP, ou seja, exatamente a quantidade que estava disponível pelos embarcadores.

A referida seção também apresenta a periodicidade de realização das coletas, neste caso um período único e todos os fluxos existentes entre os terminais que são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Fluxos de Carga entre Terminais

Origem	Destino	Transferência
CP	SP	2.020
RP	CP	2.765
SP	CP	92.948
SP	SC	19.313

A seção 10.2 apresenta os *hub's* que foram abertos. Além de São Paulo (SP), Campinas (CP) e Ribeirão Preto (RP), que foram responsáveis pelas coletas, o SCG também abriu o *hub* de São Carlos (SC).

Esta seção apresenta também a quantidade recebida e expedida em cada um dos terminais: 412.261 kg em SP, 127.020 kg em CP e 2.765 kg em RP, 19.313 em SC, ou seja, a quantidade coletada pelos terminais, somada às transferências recebidas. Nesta seção ainda são apresentados os custos de carregamento e descarregamento dos veículos e os testes de restrição da capacidade de *cross-docking* nos terminais.

A terceira seção, 10.3, apresenta a alocação de cada destinatário a um dos terminais ou *hub's* abertos na primeira tabela. A seção 10.4 mostra o número de rotas que foram percorridos entre os terminais/*hub* e os destinatários, incluindo seus custos.

Repara-se que neste momento fica clara a principal diferença entre a abordagem LRP apresentada neste trabalho e uma abordagem que não leva em consideração simultânea a localização dos terminais e as rotas de entrega.

Muito provavelmente, pelo método de solução de localização dos terminais do SCG ser baseado na abordagem *Location Allocation Problem (LAP)*, conforme descrito na seção 3, não são criadas rotas de entrega. Sendo assim, apresentam-se as relações entre os terminais existentes, quantidade de veículos utilizados e os destinatários que são atendidos por cada um deles.

A seção 10.5 apresenta as possíveis limitações do método de solução. O número de veículos utilizados é apresentado e está em concordância com o volume movimentado; entretanto, não existe uma associação entre os veículos e os destinatários a serem atendidos.

A provável explicação para tal fato é que sem a formação das rotas de entrega, o número de veículos é calculado pela relação entre o total movimentado e a capacidade dos veículos e pela relação entre as distâncias percorridas e as restrições de distâncias (através do período de utilização do veículo), ou seja, um cálculo aproximado.

A Tabela 8 apresenta os resultados de custo por atividade resultantes da aplicação do SCG.

Tabela 8 – Custos por atividade no *Supply Chain Guru*

Period Name	Total Cost	Total Fixed Operating Cost	Total Warehousing Cost	Total Transportation Fixed Cost	Total Transportation Asset Cost
SinglePeriod	83.588,97	21.181,80	40.656,56	13.254,21	8.496,40

6.4 MODELO PROPOSTO

O objetivo desta etapa é realizar uma análise comparativa dos resultados apresentados na seção 6.3.2 com os resultados obtidos através da realização da mesma aplicação prática com o modelo proposto.

6.4.1 Aplicação do Modelo Proposto

Antes de iniciar a aplicação foi necessário que fossem tomadas algumas decisões no processo de modelagem. O nível de serviço considerado propõe um atendimento de 100% do prazo de entrega acordado. Embora esta decisão possa impor um custo mais alto, necessita-se de uma margem de segurança, pois ocorrem falhas operacionais no dia a dia, que podem alterar o referido desempenho esperado.

Os prazos de entrega firmados com os grandes embarcadores são de 24 horas para jurisdições pertencentes à praça de coleta e de 48 horas para as demais jurisdições existentes dentro do Estado. É importante ressaltar que o prazo de entrega começa a contar a partir da emissão do conhecimento de transporte, ou seja, de sua chegada ao terminal de origem e, conseqüentemente, não inclui o período de coleta.

Existe outro ponto de análise. Mesmo que os acordos entre embarcadores e empresa de transporte sejam realizados em dias, a realidade operacional deve ser gerida em horas. O horário de chegada dos veículos de coleta varia de 17:00h às 22:00h. Por outro lado, o horário de entrega é, na sua maioria, comercial (08:00h às 18:00h); entretanto, diversos shoppings, atacadistas e varejistas, que no total representam quase 30% do volume de entrega da empresa de transporte, normalmente obrigam a chegada do veículo às 08:00h.

A consideração conjunta dos perfis de coleta e entrega resulta em um prazo operacional de:

- 22:00h às 08:00h do dia seguinte (D+1), ou seja, um período útil de 10 horas para entregas diretamente pela jurisdição;
- 22:00h às 08:00h do segundo dia após coleta (D+2), ou seja, um período útil de 34 horas para entregas por outra jurisdição dentro do Estado;

Importante ressaltar que essa análise é válida, pois não se pode trabalhar com tempos médios, porque as atividades de transferência e entrega são compartilhadas. Sendo assim, mesmo que na média exista um maior tempo útil operacional, às vezes, faz-se necessário aguardar a consolidação de cargas.

O referido tempo útil existente deve englobar as etapas de *cross-docking* no terminal de origem, transferência (quando aplicável), *cross-docking* no terminal de destino ou *hub* (quando aplicável) e rota de entrega. De todas as possibilidades de transferências existentes, a mais distante é de São Paulo para Franca, com 416 km. Considerando que a velocidade média de transferência no Estado de São Paulo é de 65 km/hora, o resultado mais crítico é um período exclusivo de viagem de transferência de 06:24h.

Devido ao trânsito existente nas metrópoles, ocorrências em viagem, aumento no prazo de carregamento dos conhecimentos de transporte objetivando uma melhor consolidação de carga, respeito ao descanso da lei do motorista e até a possíveis falhas operacionais de carregamento e descarregamento dos veículos, esse tempo foi considerado, na prática, como de 12 horas.

Com base nos históricos existentes, o período de *cross-docking* estipulado, que inclui o tempo de carregamento e descarregamento, foi de seis horas para veículos de coleta e de 12 horas para veículos de transferência. A diferença existe, pois, os veículos de coleta possuem cargas de apenas um embarcador, enquanto os veículos de transferência possuem cargas de diversos embarcadores, o que aumenta a complexidade na conferência e exige separação de carga (*picking*). O período que engloba as atividades de roteirização, programação de veículos e carregamento foi definido como de três horas.

A Figura 20 apresenta os planos de trabalho para os terminais existentes e define os horários de carregamento, transferências, descarregamento e entregas. Este plano é dividido em:

- Operações com entregas na jurisdição, para os conhecimentos de transporte coletados por São Paulo, Campinas e Ribeirão Preto e entregues pela mesmo terminal de coleta;
- Operações com entregas em outra jurisdição, para todas as demais entregas que necessitam de transferência.

Figura 20 – Plano de trabalho dos terminais.

Sabe-se também que as rotas de entrega possuem uma velocidade média de 60 km/hora e que o limite de trabalho diário permitido é de oito horas, somado às duas horas extras permitidas por lei (CLT), o que resulta em um limite máximo de viagem de 600 quilômetros.

Estes limites de distância percorrida nas rotas de entrega estão associados ao horário de trabalho do motorista e dos ajudantes. A Lei 13.103 de 02 de março de 2015, Casa Civil (2015), em conjunto com os demais artigos da CLT limitam as jornadas de trabalho dos motoristas e demais envolvidos nas entregas.

Esta lei inclui um novo conceito denominado tempo de espera, na seção IV-A–VII §8. “São considerados tempo de espera as horas em que o motorista profissional empregado ficar aguardando carregamento ou descarregamento do veículo nas dependências do embarcador ou do destinatário e o período gasto com a fiscalização dos produtos transportados em barreiras fiscais ou alfandegárias, não sendo computados como jornada de trabalho e nem como horas extraordinárias” (CASA CIVIL, 2015).

Em paralelo, considerando que os tempos em fila e na plataforma em espera do descarregamento nos destinatários estão cobertos pela lei, ficam pendentes de consideração o tempo exclusivo com o descarregamento dos veículos e entende-se que esses, com médias históricas inferiores a 15 minutos por entrega, são cobertos por velocidades médias superiores a 60 km/h neste perfil de entrega. Esse conceito foi validado por experimentações práticas, está em uso na empresa e também foi utilizado no processo de modelagem do SCG.

Considerando o limite de quilometragem total percorrida, pode-se também concluir que o máximo de distância entre terminais e destinatários seria a metade do limite por rota, ou seja, o atendimento de um único destinatário por uma rota de entrega de 300 quilômetros partindo do terminal.

Nas jurisdições atuais, não existe nenhum destino que exceda os 300 quilômetros do terminal de origem. Para os terminais propostos neste trabalho, não existe nenhum destino que não tenha pelo menos sete terminais e *hub's* com distância inferior a 300 quilômetros. O número médio de terminais de atendimento com distância inferior a esse parâmetro é de 13 dos 15 possíveis, ou seja, a grande maioria dos destinatários pode ser atendida pela quase totalidade dos terminais existentes (Figura 21).

A Figura 22 mostra as distâncias entre os destinos, ou seja, aqueles que podem ter arcos entre si formando uma rota de entrega. Neste caso, cada destino tem em média 17 outros destinos que podem formar uma rota com ele, dos 40 possíveis.

		SP	CP	RP	PI	DI	SD	BI	MR	BR	FR	SC	MD	AR	JU	LI	<300
São Paulo	D1	10	101	341	169	24	100	35	68	93	421	260	169	293	65	155	13
Barueri	D2	35	96	315	145	43	77	5	84	111	398	235	160	275	59	148	13
Cajamar	D3	43	66	285	134	60	85	34	101	88	367	204	130	244	28	117	14
Cotia	D4	39	110	329	149	47	71	24	90	126	412	247	174	287	73	162	13
Diadema	D5	24	112	332	181	5	114	43	74	109	415	251	177	291	73	164	13
Embu	D6	33	107	326	159	35	82	28	84	122	409	246	170	286	70	158	13
Guarulhos	D7	24	111	330	174	38	116	47	49	80	427	250	176	290	71	164	13
Itapeçerica da Serra	D8	40	113	332	172	34	94	37	104	129	415	252	177	292	76	165	13
Itapevi	D9	44	107	326	142	52	67	15	98	121	409	240	171	280	70	159	13
Mogi das Cruzes	D10	68	152	371	216	74	158	84	5	129	476	291	225	331	132	204	12
Osasco	D11	29	93	312	155	35	87	16	80	106	394	231	156	272	55	144	13
Santo André	D12	27	118	334	182	16	124	52	66	103	430	254	179	294	78	167	13
São Bernardo	D13	27	116	335	183	13	123	50	74	105	430	255	179	295	79	168	13
São Caetano	D14	18	111	327	176	17	113	43	70	95	423	247	172	288	71	160	13
Suzano	D15	57	138	357	201	48	144	72	19	114	461	277	210	317	100	190	12
Campinas	D16	101	5	238	76	112	89	96	152	70	322	147	70	187	46	60	14
Americana	D17	131	43	198	41	147	116	130	187	108	281	118	79	158	79	31	15
Atibaia	D18	72	68	291	138	82	133	88	99	29	377	211	125	251	52	123	14
Bragança	D19	93	70	293	142	109	150	111	129	5	375	213	111	253	66	126	14
Hortolândia	D20	119	26	216	59	130	98	113	169	91	299	137	84	176	62	50	15
Indaiatuba	D21	108	34	251	74	121	64	98	161	95	334	168	100	208	53	83	14
Itu	D22	106	55	273	78	112	41	76	157	116	354	175	120	215	54	104	14
Itupeva	D23	81	42	259	98	92	78	76	132	79	341	178	106	218	26	91	14
Jundiaí	D24	65	46	274	110	73	89	59	132	66	357	185	109	223	5	97	14
Limeira	D25	155	60	187	40	164	131	148	204	126	258	91	65	132	97	5	15
Louveira	D26	80	31	260	99	89	95	72	129	61	344	183	93	223	19	84	14
Mogi-Guaçu	D27	169	70	197	99	177	155	160	225	111	259	147	5	187	109	65	15
Mogi-Mirim	D28	158	63	203	91	169	148	152	218	96	265	139	13	179	101	58	15
Piracicaba	D29	169	76	204	5	181	114	145	216	142	287	102	99	142	110	40	15
Rio Claro	D30	195	88	167	43	192	149	176	232	154	248	66	88	106	125	32	15
Salto	D31	109	47	265	73	118	48	81	159	110	346	170	114	210	55	96	14
Santa Bárbara do Oeste	D32	143	50	208	32	154	103	138	194	116	289	115	90	155	87	30	15
São Carlos	D33	260	147	108	102	251	207	235	291	213	191	5	147	45	185	91	15
Sorocaba	D34	100	89	303	114	114	5	77	158	150	384	207	155	248	89	131	13
Sumaré	D35	126	33	211	51	137	100	120	176	98	293	129	88	169	69	43	15
Ribeirão Preto	D36	341	238	5	204	332	303	315	371	293	93	108	197	91	274	187	10
Araraquara	D37	293	187	91	142	291	248	275	331	253	178	45	187	5	223	132	14
Batatais	D38	373	272	49	243	370	340	353	426	326	53	146	209	133	309	224	8
Franca	D39	421	322	93	287	415	384	398	476	375	5	191	259	178	357	258	7
Jaú	D40	318	207	167	137	305	247	276	344	273	252	94	210	77	238	165	12
Média																	13

Figura 21 – Distâncias entre terminais e destinatários.

		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20	D21	D22	D23	D24	D25	D26	D27	D28	D29	D30	D31	D32	D33	D34	D35	D36	D37	D38	D39	D40	<100				
São Paulo	D1																																													
Sorun	D2	30	38	34	19	29	19	35	39	63	24	22	22	10	52	86	67	88	14	83	101	76	60	50	75	84	63	84	180	104	138	255	95	121	336	288	368	416	313	21	144					
Calama	D3	38	29		44	55	44	51	52	35	96	33	58	61	52	87	61	95	59	83	78	70	61	41	23	112	37	125	118	129	140	66	102	199	80	85	280	239	318	362	253	27				
Colia	D4	34	19	44		42	12	50	20	8	85	22	50	49	44	72	105	139	97	121	122	98	77	85	68	157	81	169	161	144	183	83	140	242	66	129	324	282	362	407	280	22				
Diadema	D5	19	38	55	42		30	33	29	47	69	30	11	8	12	43	107	142	77	104	125	116	107	87	68	159	84	172	164	176	187	113	149	246	109	132	327	286	365	410	300	18				
Embu	D6	28	23	44	12	30		44	8	17	79	21	43	40	38	66	102	136	95	117	119	108	86	82	65	153	78	165	154	162	162	144	241	77	126	321	281	359	404	287	21					
Guarulhos	D7	19	42	51	50	33	44		50	51	44	33	30	33	21	32	106	142	54	75	125	112	110	83	66	159	80	171	164	169	186	112	148	245	111	130	325	285	372	422	285	19				
Itapevica da Serra	D8	35	32	52	20	29	8	50		27	99	27	41	38	38	75	108	143	101	124	125	120	90	88	71	160	85	172	164	167	189	105	150	247	89	132	327	287	365	410	300	19				
Itapevi	D9	39	10	35	8	47	17	51	27		93	19	59	56	48	84	102	136	94	116	120	91	70	82	65	154	79	166	159	137	176	175	133	235	62	127	321	275	359	404	269	22				
Mogi das Cruzes	D10	63	79	96	85	69	79	44	99	93		75	61	69	65	14	147	182	94	124	164	156	152	127	127	189	124	220	213	211	227	154	189	286	163	171	366	326	421	471	339	15				
Osasco	D11	24	11	33	22	30	21	33	27	19	75		37	36	29	58	88	122	79	101	105	96	81	67	50	139	64	151	145	150	167	86	129	226	82	112	307	267	345	389	279	23				
Santo André	D12	22	47	58	50	11	43	30	41	59	61	37		6	7	32	113	145	77	98	128	119	117	90	73	162	86	174	165	177	189	119	152	249	119	135	329	289	367	425	301	19				
São Bernardo	D13	22	45	61	49	8	40	33	38	56	69	36		6	9	39	111	146	75	100	129	130	117	91	74	163	87	174	167	179	190	122	153	250	118	136	330	290	369	425	302	18				
São Caetano	D14	13	38	52	44	12	38	21	38	49	65	29	7	9		36	106	138	69	90	121	112	110	83	66	155	79	167	159	171	182	112	146	242	108	128	322	283	360	418	295	19				
Suzano	D15	52	67	87	72	43	66	32	75	84	14	58	32	39	36		133	167	78	109	150	141	136	112	95	195	109	205	198	196	212	141	175	272	139	157	352	312	398	456	324	16				
Campinas	D16	96	91	61	105	107	102	106	108	102	147	88	113	111	106	133		38	63	65	21	29	50	37	41	55	26	65	58	71	83	42	45	142	84	28	233	182	267	317	202	22				
Americana	D17	126	125	95	139	142	136	142	143	136	182	122	145	146	138	167	38		101	103	19	63	79	69	74	26	63	74	67	36	53	74	10	113	111	112	193	163	231	276	188	16				
Atibaia	D18	67	83	59	97	77	95	54	101	94	94	79	77	79	69	78	63	101		24	84	90	82	63	47	118	54	120	113	133	147	52	138	206	128	91	286	246	322	372	286	24				
Bragança	D19	88	106	83	121	104	117	75	124	116	124	101	98	100	90	109	65	103	24		86	90	111	74	61	121	56	106	91	137	145	105	111	208	145	93	288	248	321	370	268	14				
Hortolândia	D20	114	108	78	122	125	119	125	125	120	164	105	128	129	121	150	21	19	84	86		39	62	51	57	45	45	79	71	54	73	55	28	132	93	7	211	171	249	294	186	19				
Indaiatuba	D21	103	93	70	98	116	108	112	120	91	156	96	119	120	112	141	29	63	90	90	39		24	25	48	78	36	95	87	69	105	17	52	163	59	40	246	203	283	329	200	22				
Itu	D22	101	71	61	77	107	86	110	90	70	152	81	117	117	110	136	50	79	92	111	62	24		39	49	99	95	115	107	73	111	9	69	170	22	63	268	210	304	349	204	21				
Ruiviva	D23	76	71	41	95	87	82	83	88	62	127	67	90	91	83	112	37	69	63	74	51	25	39		21	86	19	101	94	93	114	36	77	173	73	57	254	213	291	336	224	29				
Jundiaí	D24	60	54	23	58	68	65	66	71	65	127	60	73	74	66	96	41	74	47	61	57	48	49		21	82	14	104	96	115	120	50	82	180	84	54	295	218	304	352	233	29				
Limeira	D25	150	143	112	157	159	153	159	160	154	199	139	162	163	165	185	55	26	118	121	45	78	99	86	92		79	60	53	35	27	91	25	86	126	38	182	127	219	253	160	16				
Louveira	D26	75	67	37	81	84	78	80	85	79	124	64	86	87	79	109	26	63	54	56	45	36	55	19	14	79		88	81	94	107	60	69	178	90	51	255	218	289	339	222	30				
Mogi-Guaçu	D27	164	155	125	169	172	165	171	172	166	220	151	174	174	167	205	65	74	120	106	79	95	115	101	104	60	88		8	94	83	109	85	140	83	192	182	204	254	205	11					
Mogi-Mirim	D28	153	147	118	161	164	158	164	164	159	213	145	166	167	169	198	58	67	113	91	71	87	107	94	36	53	81	8		86	76	101	77	134	143	75	198	174	211	260	187	14				
Piracicaba	D29	184	140	123	144	116	154	169	167	137	211	150	177	178	171	196	71	36	133	137	54	69	73	93	105	35	94	94	86		38	88	27	97	109	46	199	137	238	282	132	15				
Rio Claro	D30	190	171	140	183	187	182	186	189	176	227	167	189	180	182	212	83	53	147	149	73	105	111	114	120	27	107	83	76	39		106	52	61	144	66	162	101	200	243	123	10				
Salto	D31	104	76	66	83	113	92	112	105	75	154	86	119	122	112	141	42	74	92	105	55	17	9	36	50	91	50	107	83	76	39		106	52	61	144	66	162	101	200	243	123	10			
Santa Bárbara do Oeste	D32	138	133	102	140	149	144	148	160	133	189	129	152	153	146	175	45	10	108	111	28	52	69	77	82	25	69	65	77	27	52	63		110	38	20	203	160	239	284	169	16				
São Carlos	D33	255	230	199	242	246	241	245	247	235	286	226	249	250	242	272	142	113	206	208	132	163	170	173	180	86	178	142	134	97	61	165	110		202	124	103	40	141	166	89	5				
Sorocaba	D34	35	72	80	136	119	77	111	89	162	153	82	119	118	108	139	64	111	129	145	93	59	27	73	84	128	90	150	143	109	144	29	98	202		95	298	243	335	379	242	18				
Sumaré	D35	121	115	85	129	132	125	130	132	127	171	112	155	136	139	157	28	12	91	93	7	40	63	57	64	38	51	83	75	45	66	56	29	124		206	154	244	288	178	19					
Ribeirão Preto	D36	336	310	280	324	327	321	325	327	321	366	307	329	330	322	352	233	193	286	288	211	246	268	254	269	182	295	182	295	182	260	203	133	298	206		86	44	88	162	3					
Araçuaia	D37	288	270	239	282	286	281	285	287	275	3																																			

FILIAL / DESTINO	PESO TOTAL	SP	BI	PI	DI	CP	RP	SO	MR	JU	FR	LI	MO	AR	BR	SC
São Paulo D1	130661		30	164	32	96	336	255	63	60	416	150	164	288	88	255
Barueri D2	42283			140	38	91	310	72	79	54	393	143	155	270	106	230
Piracicaba D29	28705				35	71	199	97	211	105	282	35	94	137	137	97
Diadema D5	28293					107	327	246	69	68	410	159	172	286	104	246
Campinas D16	24098						233	142	147	41	317	55	65	182	65	142
Ribeirão Preto D36	22536							103	366	269	88	182	192	86	288	103
Guarulhos D7	21912	15														
Sorocaba D34	21451								153	84	379	126	150	243	145	202
Sumaré D35	13930					28							83	164	93	124
Louveira D26	10741					26										
Itapevi D9	10301	10														
Mogi das Cruzes D10	9414									127	471	199	220	326	124	286
São Bernardo D13	8227				8											
Santo André D12	7904				11											
Jundiaí D24	7039															
Embu D6	6117	26														
Franca D39	4952															
Osasco D11	4737	24														
Limeira D25	4488															
Mogi-Guaçu D27	3676															
Araraquara D37	2791															
São Caetano D14	2673															
Mogi-Mirim D28	2575	8			12											
Rio Claro D30	2568															
Cajamar D3	2479		29													
Salto D31	2399							29								
Bragança D19	2308															
Cotia D4	1961	15														208
Itu D22	1840							27								
Santa Bárbara do O D32	1677											25				
São Carlos D33	1598															
Hortolândia D20	1489					21										
Batalais D38	1257															
Itupeva D23	1208															
Indaiatuba D21	1123															
Suzano D15	1101															
Americana D17	980															
Atibaia D18	948															
Jau D40	651															
Itapeverica da Serra D8	605															

Figura 23 – Definição dos candidatos a *hub* em acordo com critérios pré-definidos.

6.4.2 Resultados

Os resultados são apresentados no Apêndice A, contendo:

- Desempenho Gurobi: Relatório sobre a precisão dos resultados com o decorrer do tempo para as 72 horas de processamento;
- Parâmetros: Os dados inseridos para cálculo, composto por dados gerais, embarcadores, destinatários, veículos, conhecimentos de transporte e distâncias.
- Resultados: Os resultados obtidos no Gurobi, restritos aos não negativos, ou seja, relevantes para o processo de modelagem. Esses resultados foram agrupados (*hub's* abertos, veículos utilizados, arcos existentes, embarcadores, demandas e fluxos existentes) e identificados para facilitar o entendimento e as análises;
- Validação dos Resultados: É apresentada uma tabela reduzida de validação de todos os fluxos, que abordou a coleta e a entrega dos conhecimentos de transporte;

- Fluxos de transferência: Validação das transferências entre os terminais;
- Rotas de entrega: Apresentação das rotas de entrega obtidas para análise e validação.

Os resultados obtidos, após 72 horas de processamento e com precisão estimada em 97,04% da solução ótima pelo Gurobi (2015), estiveram adequados às restrições do processo de modelagem proposto. As rotas de entrega apresentadas demonstram sua exequibilidade e foram consideradas em alinhamento com a experiência prática existente, quando submetidas à equipe de campo envolvida.

Como as transferências foram liberadas entre os terminais e *hub's*, pois se objetivou a busca pelo melhor resultado possível, obteve-se um resultado que envolveu duas etapas de *cross-docking* no terminal SP e no *hub* de Barueri (BI) para as entregas realizadas especificamente pelo veículo “HB04”.

Nesta solução, os terminais de Campinas e Ribeirão Preto tiveram seus custos reduzidos, pois ao invés de utilizarem veículos de transferência diretos, estes enviaram para São Paulo os conhecimentos de transporte com destino ao *hub* BI, que posteriormente foram consolidados com as transferências de São Paulo e enviados para Barueri.

Tal fato exige a criação de um novo plano de trabalho, que é apresentado na Figura 24. Os períodos de *cross-docking* e transferência foram analisados, validados e adequados à realidade desta rota específica. Caso esse resultado não fosse passível de operacionalização, o que não é o caso, restrições deveriam ser inclusas para evitar esse tipo de solução.

Figura 24 – Plano de trabalho dos terminais para as entregas em Barueri.

A Tabela 9 apresenta os custos finais obtidos para um ciclo operacional de coleta, transferência e entrega, que é equivalente a um dia de cada uma dessas etapas operacionais. Tal fato não significa que todas essas etapas sejam realizadas no mesmo dia, mas significa que cada uma delas equivale à operação relativa a um dia de coleta.

Tabela 9 – Custos obtidos na Aplicação Prática

Custo Fixo	
Filiais	21.181,80
Veículos de Coleta	7.936,11
Veículos de Entrega	5.909,00
Veículos de Transferência	-
Total - Custo Fixo	35.026,91
Custo Variável	
Veículos de Coleta	2.035,80
Veículos de Entrega	2.274,80
Veículos de Transferência	1.529,00
Carregamento nas Filiais	19.472,92
Descarregamento nas Filiais	18.973,31
Total - Custo Variável	44.285,84
Custo Total	
Custo Total (Fixo + Variável)	79.312,75

A aplicação do modelo obteve estes resultados em 72 horas de processamento, conforme informado; entretanto, em menos de uma hora de processamento, o *gap* para o objetivo de resultado esperado pelo Gurobi era de apenas 3,19%. Ressalta-se que esse próprio objetivo aumenta com o decorrer do processamento, o que consequentemente reduz o *gap*. A variação total do objetivo foi de 0,15% e de 1 hora até o final do processamento, de 0,05%.

O real ganho de 1 hora até às 72 horas foi de 0,23% (3,19% - 2,96%) no valor do *gap*. Destes, os 0,05% (23,59% do ganho total) foram obtidos através do aumento do objetivo de resultado esperado pelo Gurobi e 0,18% (76,42% do ganho total) pela melhor solução encontrada. Financeiramente, esse ganho de solução representa R\$ 142,76 reais por dia ou um pouco mais de R\$ 37.000,00 por ano, considerando apenas dias úteis.

Quando se analisa o número de nós explorados e inexplorados pelo Gurobi, a diferença é muito representativa. A solução com 3,19% de gap foi obtida com 21.695 nós *branch-and-cut* que foram explorados até esse ponto e 13.682 inexplorados. Já a solução final explorou 1.179.932 nós (54,4 vezes maior) e 833.603 foram inexplorados (60,9 vezes maior), exigindo um esforço de processamento que resultou em um tempo 72 vezes maior.

Os dados que fundamentaram essas análises e seus gráficos consequentes encontram-se no Apêndice A.

6.5 CUSTOS OPERACIONAIS VIGENTES

Apresentam-se os dados resumidos dos custos operacionais vigentes na aplicação do modelo na Tabela 10. Estes dados estão sendo apresentados de uma forma consolidada e sem um maior detalhamento, por motivos de confidencialidade, já explicitados.

Tabela 10 – Custos operacionais vigentes por atividade

Custo Fixo	
Filiais	20.272,71
Veículos de Coleta	7.936,11
Veículos de Entrega	0,00
Veículos de Transferência	-
Total - Custo Fixo	28.208,82
Custo Variável	
Veículos de Coleta	2.035,80
Entrega (Afretados + Redespacho)	27.900,01
Veículos de Transferência	7.994,60
Carregamento nas Filiais	17.149,36
Descarregamento nas Filiais	16.445,48
Total - Custo Variável	71.525,25
Custo Total	
Custo Total (Fixo + Variável)	99.734,07

6.6 ANÁLISE COMPARATIVA

A Tabela 11 apresenta um comparativo entre os custos operacionais vigentes e os custos obtidos com as aplicações do *Supply Chain Guru* e da metodologia proposta.

Tabela 11 – Analise comparativa de custos

Base de Custo	Custo Total	Dif.	Custo Terminais	Dif.	Custo Transporte	Dif.
Operacionais Vigentes	99.734,07		53.867,55		45.866,52	
Supply Chain Guru	83.588,97	-16,2%	61.838,36	14,8%	21.750,61	-52,6%
Modelo Proposto	79.312,75	-20,5%	59.628,04	10,7%	19.684,71	-57,1%

Base de Custo	Custo Total	Dif.	Custo Fixo de Terminais	Dif.	Custos de Manuseio	Dif.	Custo Fixo de Transporte	Dif.	Custo Variável de Transporte	Dif.
Operacionais Vigentes	99.734,07		20.272,71		33.594,84		7.936,11		37.930,41	
Supply Chain Guru	83.588,97	-16,2%	21.181,80	4,5%	40.656,56	21,0%	13.254,21	67,0%	8.496,40	-77,6%
Modelo Proposto	79.312,75	-20,5%	21.181,80	4,5%	38.446,24	14,4%	13.845,11	74,5%	5.839,60	-84,6%

Observa-se que o custo total obtido com o modelo proposto resultou em valores inferiores aos custos operacionais vigentes. Além disso, os resultados obtidos com o modelo proposto foram melhores do que com a aplicação do *software* líder global em soluções de desenho de *supply chain*.

Existem ainda outros fatores mais específicos que também influenciaram a obtenção de melhores resultados:

- A consideração dos custos de *cross-docking* nos terminais tem impacto na redução do número de rotas de transferência e na própria complexidade da rede. Tal conclusão é totalmente aderente com a prática, pois mesmo que os custos de *cross-docking* e transporte normalmente sejam considerados de forma separada, é hábito dos gestores de transporte de carga fracionada a busca pela redução no número de etapas logísticas;

- Considerando que o SCG adota que cada destinatário é atendido por uma rota única, o custo variável de transporte obtido com o SCG foi 45,5% superior aos custos obtidos com o modelo proposto. Por consequência, os custos totais de transporte com o SCG foram 10,5% acima do que foi obtido com a implantação do modelo proposto.

Além dos ganhos financeiros, a forma de apresentação dos resultados no modelo proposto é mais alinhada com a prática do que a apresentada pelo SCG e deve garantir ganhos operacionais. Enquanto o *software* global apresenta apenas uma relação de destinatários atendidos por cada terminal e o respectivo número de veículos que devem ser utilizados nesta operação, o processo de modelagem proposto apresenta uma programação operacional completa, que inclui as rotas dos veículos que partem de cada terminal e atendem cada um dos destinatários.

Para que fosse possível verificar a exequibilidade prática da solução do SCG, foi associado através do problema da mochila a relação entre os veículos e os destinatários, ou seja, a formação das rotas de entrega.

Tal tarefa foi necessária porque não é elementar a definição das rotas de entrega, visto que foi informada apenas a relação dos destinatários atendidos por cada terminal e o número de veículos utilizados para tal fim e se faz necessário fazer a associação para formação das rotas de entrega.

Mesmo assim, conforme apresentado na seção 10.5, ainda foi necessário flexibilizar as restrições de peso e distância total percorrida, pois não se encontrou uma solução para o problema com os resultados propostos pelo SCG sem as devidas relaxações. Repare-se que, nas rotas encontradas, diferenças inferiores a 1% da capacidade do veículo e 1,5% na distância limite foram encontradas. Para efeito de compreensão, essa relação também foi incluída na seção 10.5.

Tal fato é corroborado pelos detentores da ferramenta SCG, pois os mesmos orientam que o planejamento operacional seja realizado por outra ferramenta de gestão denominada *Transportation Guru*, que seria a responsável pelo referido trabalho. Entretanto, pela falta de licença de tal ferramenta, esta etapa não pôde ser testada.

Concluindo, percebe-se que o modelo proposto contribui com as duas etapas, definindo os terminais a serem utilizados e planejando o atendimento dos destinatários, o que era previsto na proposta deste trabalho.

6.7 CONCLUSÃO DA APLICAÇÃO PRÁTICA

A metodologia desenvolvida para revisão estratégica de rede de transporte de carga fracionada mostrou-se prática, necessita de muito pouco investimento financeiro e produziu resultados que indicam sua capacidade de minimizar custos e prover um modelo operacional de fácil implantação.

O modelo matemático proposto se adapta concomitantemente a problemas de transporte fracionado (LTL) e de lotações (FTL). Sendo assim, a proposta deste trabalho torna-se adaptável a empresas de transporte que trabalhem com um ou com os dois tipos de transporte.

Esses resultados observados possibilitaram a consideração de um novo processo de revisão de rede na empresa de transporte em que ele foi testado. Esse processo propõe a utilização da metodologia proposta de forma complementar à modelagem no *Supply Chain Guru*.

7 CONCLUSÃO E EXTENSÕES

7.1 INTRODUÇÃO

A relevância do modal rodoviário na matriz de transportes, a dimensão geográfica e a dispersão populacional que se concentra no Sul, Sudeste e costa do oceano Atlântico fazem do Brasil um país com forte vocação para o transporte rodoviário de carga fracionada.

A busca por menores custos e melhor nível de serviço neste tipo de transporte passa, principalmente, pela solução de dois conhecidos problemas que vêm sendo estudados na grande maioria das vezes de forma independente, o *Location Allocation Problem* e o *Vehicle Routing Problem*. O *Location Allocation Problem* para determinar a melhor localização dos terminais e o *Vehicle Routing Problem* para determinar a melhor forma de criar as rotas para atender os destinatários a partir desses terminais.

Esses dois problemas foram tratados de forma independente por muito tempo, mas diversos autores têm apresentado importantes vantagens no tratamento conjunto, o que motivou o desenvolvimento da abordagem *Location Routing Problem* (LRP). Nos últimos dez anos, a literatura sobre a abordagem LRP tem-se desenvolvido de forma crescente e o aumento e a diversidade nos trabalhos publicados evidenciam que o tema tem-se tornado mais relevante.

Esta pesquisa abordou a modelagem do *Location Routing Problem* (Problema de Localização/Roteirização) de uma rede de transporte de carga fracionada e sua aplicação prática, com sucesso, em uma das maiores e mais importantes empresas de transporte deste segmento no Brasil.

7.2 CONTRIBUIÇÕES

Havia sido desenvolvido, na empresa de transporte em consideração, um projeto de revisão de rede que utilizava, entre outras ferramentas, um *software* líder global no mercado de revisões de rede. Este projeto de revisão de rede consumiu um investimento superior a um milhão e meio de reais. Em paralelo, desenvolveu-se e aplicou-se a modelagem proposta neste trabalho.

O processo de modelagem proposto adaptou-se às restrições e informações existentes no mercado brasileiro de transporte de carga fracionada e preencheu uma lacuna na literatura, ao resolver problemas de localização/roteirização do tipo *Many-to-Many* com múltiplos elos, incluindo a aplicação do modelo a um problema real.

A aplicação prática realizada permite corroborar que a utilização da abordagem LRP tende a produzir resultados iguais ou superiores aos do tratamento não integrado do LAP e do VRP, o que vem ao encontro das conclusões de diversos autores, como: Balakrishnan et al. (1987), Laporte (1988) e Laporte et. al (1989), Min et al. (1998), Tuzun e Burke (1999), Lin et al. (2006), Nagy e Salhi (2007), Zarandi et al. (2011), Prodhon e Prins (2014) e Drexl e Schneider (2013, 2014 e 2015).

O modelo matemático proposto foi capaz de resolver um problema real com múltiplos elos e fluxos entre os terminais, o que aumentou a complexidade de resolução do problema. Também foi possível mostrar que o tamanho da rede estudada é superior ao que vem sendo praticado em trabalhos que utilizam o mesmo tipo de solução, conforme apresentado na Tabela 1, do Capítulo 3.

Foram identificadas as seguintes inovações no modelo proposto:

- Utilizou custos independentes de *cross-docking* por terminal e por atividade de carregamento e descarregamento;
- Possibilitou o atendimento de um destinatário por mais de um veículo, pois essa é uma situação usual neste tipo problema;

- Restringiu a movimentação em um terminal pela soma do fluxo recebido e expedido;
- Controlou os fluxos em todos os terminais, além das entradas e saídas dos arcos e dos fluxos nos destinatários;
- Possibilitou a sincronização dos fluxos de transferências com os de coleta e entrega na busca pela melhor solução possível;
- Garantiu o retorno dos veículos de transferência à base, conforme modelo operacional existente;
- Adaptou-se aos problemas de transporte fracionado (LTL) e lotações (FTL).

Este modelo foi concebido para resolver um problema prático existente no mercado de transporte rodoviário de carga fracionada, que é a busca pela redução nos custos e melhora no nível de serviço no transporte e teve que se adaptar às restrições presentes neste mercado.

Além disso, o modelo mostrou-se capaz de lidar com um grande número de produtos e tratar as transferências entre terminais utilizando os veículos disponíveis conforme o problema prático exigiu, o que ainda não havia sido tratado nos trabalhos sobre o tema.

A metodologia desenvolvida para revisão estratégica de rede de transporte de carga fracionada mostrou-se praticável, utilizou dados comumente disponíveis no segmento de transporte fracionado e produziu resultados que indicam seu potencial para otimizar uma rede de transporte rodoviário de carga fracionada, com a característica de ser um modelo de fácil implantação e utilização.

Importante ressaltar que o problema em questão é da classe NP-hard. Por isso mesmo, a utilização do Gurobi para solução da aplicação prática realizada com o modelo proposto não levou à obtenção direta do resultado ótimo, porém produziu resultados próximos dos ótimos com tempos de resolução relativamente rápidos. Tais resultados permitem concluir pela aplicabilidade prática do modelo proposto a problemas reais relevantes, como o que foi objeto da aplicação prática realizada.

7.3 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

Como continuidade deste trabalho, sugerem-se as seguintes extensões:

- Aplicação em outros modais ou segmentos de transporte, de forma a testar a amplitude do processo de modelagem proposto;
- Explorar a abertura e o fechamento não apenas dos *hub's*, mas também dos terminais responsáveis pelas coletas;
- Analisar decisões de embarque futuro e geração de estoque dos conhecimentos de transporte, levando em consideração os prazos de entrega, em modelagens multiperíodo;
- Adaptar o modelo para considerar rotas de coleta e entrega simultâneas (LRPSPD).

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdinnour-Helm, S. **“Network design in supply chain management”**, International Journal of Agile Management Systems, Vol. 1 No. 2, pp. 99-106, 1999.

Abralog, Disponível em: <http://www.abralog.com.br>, obtido em 20 de julho de 2014.

Akca, Z. Berger, R. Ralphs, T. **“Modeling and Solving Location Routing and Scheduling Problems”**, Industrial and System Engineering, Report: 08T-009, 2009.

Alamo, J. **“Modelagem para a localização de hub’s no transporte de encomendas expressas”**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

Ambrosino, D. Scutellà, M. **“Distribution Network Design: New problems and related models”**, European Journal of Operational Research, vol. 165, pp. 610-624, 2005.

Anderberg, M. **“Cluster Analysis for Application”**, Academics Press Inc., New York, 1973.

Atlas, Disponível em: <http://www.atlastranslog.com.br>, obtido em 16 de março de 2014.

Azarmand, Z. Jami, E. **“Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies”**, Springer, Library of Congress 2009922331, pp. 93-110, 2009.

Balakrishnan, A. Ward, J. Wong, R. **“Integrated facility location and vehicle routing models: Recent work and future prospects”**, American Journal of Mathematical and Management Sciences, no. 7, pp. 35-61, 1987.

Barreto, S. Ferreira, C. Paixao, J. Santos, B. **“Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem”**, European Journal of Operational Research, vol. 179, no. 3, pp. 968-977, 2007.

Bodin, L. Golden, B. Assad, A. Ball, M. **“Routing and Scheduling of Vehicles and Crews. The State of the art”**, Computers & Operations Research, Vol. 10, pp. 69-211, 1983.

Branco, I. Coelho, J. **“The Hamiltonian p-median problem”**, European Journal of Operational Research, vol. 47, pp. 86-95, 1990.

Bruns, A. Klose, A. **“An iterative heuristic for location-routing problems based on clustering”**, Proceedings of the 2nd International Workshop on Distribution Logistics, Netherlands, pp. 01-06, 1995.

Burrough, P. McDonnell, R. **“Principles of Geographical Information Systems”**, Oxford University Press, New York, pp. 333, 1998.

Camargo, R. Miranda, G. Lokketangen, A. **“A new formulation and an exact approach for the many-to-many hub location-routing problem”**, Applied Mathematical Modelling, vol. 37, pp. 7465-7480, 2013.

Carvalho, G. Ochi, L. Nascimento, A. Cabral, L. **“Uma heurística baseada em ILS para o problema de Localização-Roteamento Capacitado”**, Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2012.

Çetiner, S. Sepil, C. Sural, H. **“Hubbing and routing in postal delivery system”**, Industrial Engineering Department, Ankara, 2010.

Casa Civil, Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Lei/L13103.htm, obtido em 20 de maio de 2015.

Chan, Y. Carter, W. Burnes, M. **“A multiple-vehicle, multiple-depot, location and routing problem with stochastically with demands processed”**, Computers & Operations Research, 28(8), 803-826, 2001.

Chou, D. **“Creating a corporate strategy for utilizing supply chain simulation, optimization and visualization”**, Thesis: M.B.A., Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management, 2014.

Clarke, G. Wright, J. **“Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points”**, Operations Research, vol. 12, 568-581, 1964.

Cornuejols, G. Fisher, M. Nemheuser, G. **“Location of bank accounts to optimize float: An analytic study of exact and approximate algorithms”**, Management Science, vol. 23, no.8, 1977.

Cunha, C. **“Contribuição à modelagem de problemas de logística e transportes”**. 2006. 315p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

Cunha, C. Silva, M. **“A genetic algorithm for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil”**, European Journal of Operational Research, vol. 179, pp. 747-758, 2007.

D. B. A., **“Atlas 50 anos de Brasil”**, DBA Dórea Books and Art, 2004.

Dantzig, B. Fulkerson, R. Johnson, S. **“Solution of a large-scale Traveling-Salesman Problem”**, Journal of the Operations Research Society of America, Volume. 2, N. 4, pp. 393-410, 1954.

Dima, I. Man, M. **“Considerations on the strategy for sustainable development of companies under the conditions of current globalization”**, Science Series Data Report Journal, Volume. 5, Issue 5, 2013.

Drexl, M. Schneider, M. **“A survey of location-routing problems”**, Technical Report LM-2013-03, Gutenberg School of Management and Economics, Johannes Gutenberg University, Mainz, 2013.

_____ **“A survey of the standard location-routing problem”**, Logistic Planning and Information Systems, TU Darmstadt, 2014.

_____ **“A survey of variants and extensions of the Location-Routing Problem”**, European Journal of Operation Research, vol. 241, pp. 283-308, 2015.

Edmonds, J. Johnson, E. **“Matching, Euler Tours and The Chinese Postman”**, Mathematical Programming, Volume. 5, pp. 88-124, 1973.

Eksioglu, B. Vural, A. Reisman, A. **“The vehicle routing problem: A taxonomic review”**, Computers & Industrial Engineering, Volume. 57, pp. 1472-1483, 2009.

Fukunaga. K, Short, R. **“Generalized Clustering for Problem Localization”**, IEEE Transactions on Computers, Vol C 27, N. 2, 176–181, 1978.

Galileu, Disponível em: http://www.galileu.esalq.usp.br/mostra_topico.php?cod=211, em 24 de janeiro de 2014.

Gelareh. S, Nickel, S. **“Hub location problems in transportation networks”**, Transportation Research, Part E, 47, 1092–1111, 2011.

Geosciences, Disponível em: http://www.geos.ed.ac.uk/~yliu23/docs/lect_spline.pdf, obtido em 05 de novembro de 2015.

Gonzalez, J. **“Models and Methods for the City Logistics: The Two-Echelon Capacited Vehicle Routing Problem”**, 136p. Tese Doutorado – Politecnico Di Torino, Torino, 2008.

Gonzalez-Feliu, J. **“The multi-echelon location-routing problem: concepts and methods for tactical and operational planning”**, Laboratoire d'Economie des Transports, Lyon, 2009.

Greasley. A, Assi, A., **“Improving (last mile) delivery performance to retailers in hub and spoke distribution systems”**, Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 23 No.6, pp. 794-805, 2012.

Gualda, N. **“Terminais de transportes: contribuição ao planejamento e ao dimensionamento operacional”**, 277p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

Guerra, L. Murino, T. Romano, E. **“A heuristic algorithm for the constrained location - routing problem”**, International Journal Of Systems Applications, Engineering & Development, Issue 4, volume 1, 2007.

Gurobi, Disponível em: <http://www.aimms.com/aimms/solvers/gurobi>, obtido em 18 de maio de 2015.

Gurobi Optimization, Disponível em:

https://www.gurobi.com/documentation/6.5/refman/lp_format.html, obtido em 22 de julho de 2016.

Hamad, R. **“Modelo para localização de instalações em escala global envolvendo vários elos da cadeia logística”**. 2006. 62p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

Hamidi, M. Farahmand, K. **“A hybrid GRASP-tabu search metaheuristic for a Four-Layer Location-Routing Problem”**, International Journal Logistic Systems and Management, vol. 12, n. 3, 2012.

Hamidi, M. Farahmand, K. Sajjadi, R. **“Modelling a Four-Layer Location-Routing Problem”**, International Journal of Industrial Engineering Computations, vol. 3, pp. 43-52, 2012.

Hamidi, M. Farahmand, K. Sajjadi, R. Nygard, K. **“A heuristic algorithm for a multi-product four-layer location-routing problem”**, International Journal of Industrial Engineering Computations, vol. 3, pp. 87-100, 2014.

Hassanzadé, A. Mohseninezhad, L. Tirdad, A. Dadgostari, F. Zolfagharinia, H. **“Location-Routing Problem. In Facility Location”**, Physica-Verlag HD, (pp. 395-417), 2009.

Hellmuth, B. **“Uma contribuição ao estudo do planejamento de transporte rodoviário de cargas fracionadas”**. 199p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

Huertas, D. **“Território e circulação: transporte rodoviário de carga no Brasil”**. Tese (Doutorado em Geografia Humana) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

IBM, Disponível em: <http://www.ibm.com/software/info/ilog/>, obtido em 18 de maio de 2015.

ICC, Disponível em: <http://www.iccwbo.org/>, em 16 de março de 2014.

IBGE, Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home>, em 22 de janeiro de 2014.

Kisperska-Moroń, D. Krzyżaniak S. **“Logistyka”**, Instytut Logistyki i Magazynowania, I, 503, p. 141, 2009.

Klose, A. Drexler, A. **“Facility location models for distribution system design”**, European Journal of Operational Research, vol. 162, no.1, pp. 4-29, 2005.

Kneip, F. **“Capítulo 9: Correlação e Regressão”** Disponível em: <<http://www.fsp.usp.br/hep103/Aula5.pdf>> Acesso em: 24 de janeiro 2014.

Kuehn, A. Hamburger M. **“A Heuristic Program for Location Warehouses”**, Management Science, Vol. 9, Issue 4, pp. 643-665, 1963.

Lapierre, S. Ruiz, A. Soriano, P. **“Design Distribution Networks: Formulations and Solution Heuristic ”**, Transportation Science, Vol. 38, N. 2, pp. 174-187, 2004.

Laporte, G. **“Location routing problems”**, 1987

_____. **“Location Routing Problems, In: Golden, B. L., Assad, A. A. (Eds.)”**, Vehicle routing: Methods and Studies, Amsterdam, 1988.

Laporte, G. Nobert, Y. **“An exact algorithm for minimizing routing and operation costs in depot location”**, European Journal of Operation Research, Vol. 6, pp. 224-226, 1981.

Laporte, G. Louveaux, F. Mercure, H. **“Models and exact solutions for a class of stochastic location-routing problems”**, European Journal of Operation Research, Vol. 39, pp. 71-78, 1989.

Laporte, G. Nobert, Y. Pelletier, P. **“Hamiltonian location Problems”**, European Journal of Operation Research, Vol. 12, pp. 82-89, 1983.

Lee, J. Moon, K. Park, J. **“Multi-level supply chain network design with routing”**, International Journal of Production Research, Vol. 48 No. 13, pp. 3957-3976, 2010.

Lemoine, W. Dagnaes, L. **“Globalisation strategies and business organization of a network of logistics service providers”**, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 33 No. 3, pp. 209-28, 2003.

Lenstra, J. Rinnooy, K. **“Complexity of vehicle routing and scheduling problems”**, Networks, vol. 11, número 2, pp.221-227, 1981.

Li, J. Heap, A. **“A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences”**, Ecological Informatics, vol. 6, pp. 228-241, 2011.

Lin, C. Chow, K. Chen A. **“Multi-objective meta-heuristics for a location-routing problem with multiple use of vehicles on real data and simulated data”**, European Journal of Operational Research, vol. 175, no. 3, pp. 1833-1849, 2006.

Lindo, Disponível em: <http://www.lindo.com>, obtido em 20 de janeiro de 2014.

Llamasoft, Disponível em: <http://www.llamasoft.com/products.html>, obtido em 20 de janeiro de 2014.

Lopes, R. Ferreira, C. Santos, B. Barreto, S. **“A taxonomical analysis, current methods and objectives on location-routing problems”**, International Transactions in Operational Research, vol. 20, pp. 795-822, 2013.

Machado, S. **“Estratégias de atendimento em redes logísticas e dimensionamento de terminais”**. 139p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 1989.

Manataki, A. Chen-Burger, Y. Rovatsos, M. **“SCOlog: A logic-based approach to analysing supply operation dynamics”**, Expert Systems with applications Journal, vol. 41, pp. 23-38, 2014.

McKinley, S. Levine, M. **“Cubic spline interpolation”**, College of the Redwoods, vol. 45, n. 1, pp. 1049-1060, 1998.

Melechovský, J. Prins, C. Calvo, R. **“A metaheuristic to solve a location-routing problem with a non-linear costs”**, Journal of Heuristics, vol. 11, pp. 375-391, 2005.

Milone, G. **“Estatística geral e aplicada”**, São Paulo: Centage Learning, 2009.

Min, H. **“The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points”**, Transportation Research, vol. 23A, pp. 377–386, 1989.

_____. **“Consolidation terminal location-allocation and consolidate routing problems”**, Journal of Business Logistic, vol. 17, pp. 235–263, 1996.

Min, H. Jayaraman, V. Srivastava, R. **“Combined location-routing problems: A synthesis and future Research directions”**, European Journal of Operational Research, vol. 108, pp. 01–15, 1998.

Mladenovic, N. Hansen, P. **“Variable Neighborhood Search”**, Computers Operation Research, vol. 24, pp. 1097-1100, 1997.

Mutarelli, F. **“Modelagem de redes de distribuição aplicada ao caso de uma editora de revistas”**. 108p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2004.

Nambiar, J. Gelders, L. Van Wassenhove, L. **“A large scale location-allocation problem in the natural rubber industry”**, European Journal of Operational Research, no. 6, pp. 183-189, 1981.

Nagy, G. Salhi, S. **“Location-routing: Issues, models and methods”**, European Journal of Operational Research, vol. 177, no. 2, pp. 649-672, 2007.

_____. **“The Many-to-Many Location Routing Problems”**, Sociedad de Estadística e Investigación Operativa, vol. 6, no. 2, pp. 261-275, 1998.

Neider, J. **“Transport w handlu narodowym”**. Gdańsk: Uniwersytet Gdański, p. 11, 2006.

NTC&Logística, Disponível em: <http://www.portaIntc.org.br/>, obtido em 15 de julho de 2014.

Perl, J. Daskin, M. **“A warehouse location-routing problem”**, Transportation Research Part B: Methodological, 19(5), 381-396, 1985.

Pillac, V. Gendreau, M. Guerét, C. Medglia, A. **“A review of dynamic vehicle routing problem”**, European Journal of Operational Research, vol. 225, pp. 01-11, 2013.

Pires, T. **“Configuração de uma rede de distribuição capacitada com restrição de cobertura”**. 111p. Dissertação (Mestrado) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Polak, B. **“Multi-echelon inventory strategies for a retail replenishment business model”**, Thesis: M.B.A., Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management, 2014.

Prins, C., Prodhon, C. Calvo, R. **“Solving the capacitated location-routing problem by a GRASP complemented by a learning process and a path relinking”**, 4OR, 4(3), 221-238, 2006.

Prodhon, C. Prins, C. **“A survey of recent Research on Location-Routing Problems”**, European Journal of Operational Research, vol. 238, pp. 01-17, 2014.

Qin, G. Liu, G. Gao, M. Fu, X. Xu, P. **“Correction of sample-time error for time-interleaved sampling system using cubic spline interpolation”**, Metrology and Measurement Systems, vol. 21, pp. 485-495, 2014.

Rand, G. **“Methodological choices in depot location studies”**, Operational Research Quartely, vol. 27, pp. 241–249, 1976.

Ribeiro, C. **“Notas de Aula PRO-5837”**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

Richardson, J. Reiner, P Wilamowski, B. **“Cubic spline as an alternative to methods of machine learning”**, International Conference on Industrial Informatics, IEEE 13th, 2015.

Rieck, J. Ehrenberg, C. Zimmermann, J. **“Many-to-many location-routing with inter-hub transport and multi-commodity pick-up-and-delivery”**, European Journal of Operational Research, vol. 236, pp. 863-878, 2014.

Rodríguez-Martín, I. Salazar-González, J. Yaman, H. **“A branch-and-cut algorithm for the hub location and routing problem”**, Computers & Operations Research, 50, pp. 161-174, 2014.

Romero, B. **"Análise da localização de plataformas logísticas: aplicação ao caso do ETSP – Entrepasto do Terminal São Paulo – da CEAGESP"**. 144p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Salazar, I. Molina, J. Ángel-Bello, F. Gómez T. **"Solving a bi-objective Transportation Location Routing Problem by metaheuristic algorithms"**, European Journal of Operational Research, vol. 234, pp. 25-36, 2014.

Salhi, S. Nagy, G. **"Local improvement in planar facility location using vehicle routing"**, Springer Science Business Media, 167, pp. 287-296, 2007.

Silva, M. **"Uma contribuição ao problema de localização de terminais de consolidação no transporte de carga parcelada"**. 85p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2004.

Srivastava, R. **"Algorithms for Solving the Location-Routing Problem"**, PhD Dissertation, Ohio State University, 1986.

_____. **"Alternate solution procedures for the location-routing problem"**, Omega 21, pp. 497-506, 1993.

Srivastava, R., Benton, W. **"The location-routing problem: considerations in physical distribution system design"**, Computers & operations research, 17(5), 427-435, 1990.

Stenger, A. Schneider, M. Schwind, M. Vigo, D. **"Location Routing for small package shippers with subcontracting options"**, International Journal of Production Economics, 140, pp.702-712, 2012.

Tavakkoli-Moghaddam, R. Makui, A. Mazloomi, Z. **“A new integrated mathematical model for a bi-objective multi-depot location-routing problem solved by a multi-objective scatter search algorithm”**, Journal of Manufacturing Systems, vol. 29, pp. 111-119, 2010.

Toledo, G. Ovalle, I. **“Estatística Básica”**, 2ª Edição. São Paulo: Atlas, 1995.

Tondo, C. **“Um modelo matemático para a localização estratégica de terminais de contêineres no interior: aplicação ao estado de São Paulo”**. 1992. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.

Toth, P. Vigo, D. **“A heuristic algorithm for the symmetric and asymmetric vehicle routing problems with backhauls”**, European Journal of Operational Research, vol. 113, no. 3, pp. 528-543, 1999.

Tuzun, D. Burke, L. **“A two-phase tabu search approach to the location routing problem”**, European Journal of Operational Research, vol. 116, no. 1, pp. 87-99, 1999.

UCLA, Disponível em: http://www.math.ucla.edu/~baker/149.1.02w/handouts/dd_splines.pdf, obtido em 05 de novembro de 2015.

Vallim Filho, A. **“Localização de centros de distribuição de carga: contribuições à modelagem matemática”**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

Wan, F. Zhang, Q. **“Study on the location routing problem of the multi-stage logistics network”**, Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 4th International Conference, pp. 01-05, 2008.

Wasner, M. Zäpfel, G. **“An integrated multi-depot hub-location vehicle routing model for network planning of parcel service”**, International Journal of Production Economics, vol. 90, pp. 403-419, 2004.

Wren, A. Holliday, A. **“Computer Scheduling of Vehicles from One or More Depots to a Number of Delivery Points”**, Operational Research Quarterly, vol. 23, no. 3, pp. 333-344, 1972.

Wu, T. Low, C. Bai, J. **“Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems”**, Computers & Operations Research, vol. 29, no. 10, pp. 1393-1415, 2002.

Zäpfel, G. Wasner, M. **“Planning and optimization of hub-and-spoke transportation networks of cooperative third-party logistics providers”**, International Journal of Production Economics, vol. 78, pp. 207-220, 2002.

Zarandi, M. Hemmati, A. Davari, S. **“The multi-depot capacited location-routing problem with Fuzzy travel times”**, Expert Systems with Application, vol. 38, no. 8, pp. 10075-10084, 2011.

Zbiorowa, P. **“Podstawy logistyki. Podręcznik do kształcenia w zawodzie technik logistyk”**, Biblioteka Logistyka, Poznań p. 83. 2008.

APÊNDICE A

A.1 DESEMPENHO GUROBI

1) Visão Geral Resultados Iniciais da Ferramenta Gurobi

Gurobi 6.0.0 (win64) logging started 06/22/15 16:32:44

Read LP format model from file Output\Instancia_C48F15D40.lp

Reading time = 0.22 seconds

(null): 19330 rows, 33264 columns, 186558 nonzeros

Optimize a model with 19330 rows, 33264 columns and 186558 nonzeros

Coefficient statistics:

Matrix range [1e+00, 3e+06]

Objective range [2e-02, 1e+04]

Bounds range [1e+00, 1e+00]

RHS range [1e+00, 2e+04]

Presolve removed 1912 rows and 1590 columns (presolve time = 5s) ...

Presolve removed 1912 rows and 1590 columns

Presolve time: 9.42s

Presolved: 17418 rows, 31674 columns, 164288 nonzeros

Variable types: 0 continuous, 31674 integer (15999 binary)

Presolve removed 73 rows and 1 columns

Presolved: 17345 rows, 31673 columns, 161369 nonzeros

Root simplex log...

Iteration	Objective	Primal Inf.	Dual Inf.	Time
0	4.9479733e+04	8.931013e+05	0.000000e+00	10s
776	7.0846292e+04	2.874337e+06	0.000000e+00	10s
20267	7.5625985e+04	5.597429e+04	0.000000e+00	15s
22960	7.5656792e+04	0.000000e+00	0.000000e+00	16s
22960	7.5656792e+04	0.000000e+00	0.000000e+00	16s

Root relaxation: objective 7.565679e+04, 22960 iterations, 6.52 seconds

2) Resultados sobre o progresso de busca através da metodologia *branch-and-cut*.

O Gurobi apresenta os resultados conforme a Figura 25.

Nodes			Current Node			Objective Bounds			Work	
Expl	Unexpl		Obj	Depth	IntInf	Incumbent	BestBd	Gap	It/Node	Time
H	0	0	38893.904	0	11	80811.127	38893.904	51.9%	—	0s
	0	0				45476.147	38893.904	14.5%	—	0s
	0	0	38903.750	0	13	45476.147	38903.750	14.5%	—	0s
	0	0	38926.214	0	12	45476.147	38926.214	14.4%	—	0s
	0	0	38950.968	0	13	45476.147	38950.968	14.3%	—	0s
	0	0	38952.279	0	14	45476.147	38952.279	14.3%	—	0s
H	0	2				43875.000	38952.279	11.2%	—	0s
H	0	2				40005.054	38952.279	2.63%	—	0s
	0	2	38952.279	0	14	40005.054	38952.279	2.63%	—	0s
96386	22115		cutoff	37		40005.054	39504.729	1.25%	4.0	5s
203266	12649		cutoff	30		40005.054	39756.344	0.62%	3.9	10s

Figura 25 – Exemplo de progresso de busca através da metodologia *branch-and-cut*.

Onde:

Nodes

A seção Nodes (as duas primeiras colunas) fornece informações quantitativas sobre o andamento da pesquisa. A primeira coluna mostra o número de nós *branch-and-cut* que foram explorados até esse ponto, enquanto a segunda coluna mostra o número de nós que continuam inexplorados.

Às vezes, haverá um H ou * no início da linha de saída. Estes indicam que uma nova solução viável foi encontrada, seja por uma heurística MIP (H) ou através de um desvio (*).

Current Node

A seção Nó Atual fornece informações sobre o nó específico que foi explorado neste ponto na árvore *branch-and-cut*. Ele mostra o objetivo do relaxamento associado, a profundidade desse nó na árvore *branch-and-cut* e o número de variáveis inteiras que têm valores não integrais no relaxamento associado.

Objective Bounds

A seção dos objetivos para os limites fornece informações sobre o melhor valor conhecido para uma solução viável e o objetivo atual fornecido pelos nós da árvore de busca. O valor ótimo estará sempre entre estes dois valores.

A terceira coluna nesta seção (Gap) mostra a diferença relativa entre esses dois limites. Quando este GAP é menor do que o parâmetro MIPGap, a otimização termina.

Work

A seção fornece informações sobre a quantidade de trabalho realizado até esse ponto. A primeira coluna mostra o número médio de iterações Simplex realizados por nó na árvore *branch-and-cut*. A última coluna mostra o tempo decorrido desde que o solução iniciou.

Apresenta-se os resultados restritos a alterações quando uma nova solução foi encontrada e os resultados finais com alteração de 0,01% na solução:

H 2367 1596		83741.053000 76853.4668 8.22%	599 490s
H 2463 1633		83514.476000 76854.0415 7.98%	596 490s
H 2505 1618		82932.000000 76854.0415 7.33%	589 490s
H 2541 1592		82913.300000 76854.0415 7.31%	583 543s
H 2547 1518		82904.500000 76854.0415 7.30%	595 557s
H 3023 1729		82884.700000 76877.8306 7.25%	610 672s
H 4428 2294		82691.026000 76920.1902 6.98%	590 900s
H 4527 2282		82272.146000 76920.1902 6.51%	591 900s
H 4654 2260		82164.346000 76920.1902 6.38%	582 965s
H 5446 2590		82145.646000 76920.1902 6.36%	563 1033s
H 6107 2928		82108.606000 76920.1902 6.32%	556 1111s
H 6291 3095		82012.961000 76920.1902 6.21%	553 1185s
H 9102 5346		82010.761000 76920.1902 6.21%	532 1695s
H 9772 5772		81674.862000 76920.2094 5.82%	527 1695s
H11250 7014		81468.062000 76920.2094 5.58%	505 1823s
H13276 8833		81465.862000 76920.2094 5.58%	483 2127s
H14304 9672		81460.362000 76920.2094 5.57%	481 2290s
H14767 10033		81422.962000 76920.2094 5.53%	483 2399s
H14803 9655		80932.169000 76920.2094 4.96%	484 2399s
H16679 10007		79638.668000 76920.3728 3.41%	481 2708s
H17284 10473		79596.868000 76920.3728 3.36%	487 2856s
H17798 10825		79575.968000 76920.5754 3.34%	489 2856s
H18411 11253		79533.068000 76920.5754 3.28%	493 2924s
H21695 13682		79458.339000 76925.6853 3.19%	493 3530s
H42384 29414		79453.955000 76933.7054 3.17%	503 6775s
H84682 61729		79447.355000 76937.2266 3.16%	495 13958s
H181817 134768		79417.655000 76946.2686 3.11%	491 31450s
H223209 163715		79400.761000 76949.0966 3.09%	493 39479s
H231732 169839		79399.661000 76949.8966 3.09%	495 41170s
H235493 170359		79333.645000 76950.2089 3.00%	495 41973s
H236009 170138		79312.745000 76950.2106 2.98%	495 42120s
296066 213244	77457.5153 124 175	79312.7450 76953.2003 2.97%	497 53875s
630280 457327	77344.2041 116 114	79312.7450 76961.1426 2.96%	495 122655s
1179932 833603	77384.5322 175 136	79312.7450 76967.3809 2.96%	502 259200s

Explored 1.180.556 nodes (592.516.102 simplex iterations) in 259.204.88 seconds

Thread count was 8 (of 8 available processors)

Time limit reached

Best objective 7.931274500000e+04, best bound 7.696738200624e+04, gap 2.9571%

3) Variação dos resultados em reais pelo tempo em horas

4) Variação do erro pelo tempo em horas

5) Melhor valor conhecido (azul) e objetivo (vermelho) em reais pelo tempo em horas

6) Nós explorados (azul) e nós inexplorados (vermelho) em unidades pelo tempo em horas

A.2 PARÂMETROS

a. Dados Gerais:

#Clientes	#Terminais	#Destinatários	#Veículos	#Cte's	Dist. Máx. das Rotas	Dist. Máx. entre Destinatários
48	15	40	80	98	600	300

b. Clientes

Cliente	Peso	Terminal Coletor
CL001	24570	SP001
CL002	7707	SP001
CL003	21261	SP001
CL004	24246	SP001
CL005	22609	SP001
CL006	9998	SP001
CL007	23706	SP001
CL008	21752	SP001
CL009	6335	SP001
CL010	18844	SP001
CL011	7609	SP001
CL012	23080	SP001
CL013	8883	SP001
CL014	15096	SP001
CL015	17891	SP001
CL016	11168	SP001
CL017	20125	SP001
CL018	3886	SP001
CL019	9950	SP001
CL020	7757	SP001

CL021	21259	SP001
CL022	19895	SP001
CL023	17019	SP001
CL024	20724	SP001
CL025	24871	SP001
CL026	1070	CP002
CL027	5284	CP002
CL028	1516	CP002
CL029	1475	CP002
CL030	1880	CP002
CL031	3013	CP002
CL032	1238	CP002
CL033	536	CP002
CL034	1532	CP002
CL035	3185	CP002
CL036	631	CP002
CL037	1603	CP002
CL038	3238	CP002
CL039	4151	CP002
CL040	955	CP002
CL041	232	RP003
CL042	464	RP003
CL043	567	RP003
CL044	441	RP003
CL045	180	RP003
CL046	258	RP003
CL047	272	RP003
CL048	351	RP003

c. Terminais

Terminal	Custo Fixo	Custo Variável (Inbound)	Custo Variável (Outbound)	Capacidade
SP001	11363,63	0.044	0.036	880000
CP002	7272,72	0.027	0.023	400000
RP003	1636,36	0.028	0.032	90000
BI004	909,09	0.028	0.032	50000
PI005	909,09	0.028	0.032	50000
DI006	909,09	0.028	0.032	50000
SO007	909,09	0.028	0.032	50000
MR008	909,09	0.028	0.032	50000
JU009	909,09	0.028	0.032	50000
FR010	909,09	0.028	0.032	50000
LI011	909,09	0.028	0.032	50000
MO012	909,09	0.028	0.032	50000
AR013	909,09	0.028	0.032	50000

BR014	909,09	0.028	0.032	50000
SC015	909,09	0.028	0.032	50000

d. Destinatários

Destinatário		Terminais candidatos à entrega									
DD001	SP001	CP002	DI006	BI004	MR008	BR014	JU009				
DD002	SP001	CP002	DI006	SO007	BI004	MR008	JU009				
DD003	SP001	CP002	DI006	SO007	BI004	BR014	JU009				
DD004	SP001	CP002	DI006	SO007	BI004	MR008	JU009				
DD005	SP001	CP002	DI006	BI004	MR008	JU009					
DD006	SP001	CP002	DI006	SO007	BI004	MR008	JU009				
DD007	SP001	CP002	DI006	BI004	MR008	BR014	JU009				
DD008	SP001	CP002	DI006	SO007	BI004	JU009					
DD009	SP001	CP002	DI006	SO007	BI004	MR008	JU009				
DD010	SP001	CP002	DI006	BI004	MR008						
DD011	SP001	CP002	DI006	SO007	BI004	MR008	JU009				
DD012	SP001	CP002	DI006	BI004	MR008	JU009					
DD013	SP001	CP002	DI006	BI004	MR008	JU009					
DD014	SP001	CP002	DI006	BI004	MR008	BR014	JU009				
DD015	SP001	CP002	DI006	BI004	MR008	BR014					
DD016	SP001	CP002	RP003	PI005	SO007	BI004	BR014	MO012	JU009	LI011	
DD017	SP001	CP002	RP003	PI005	MO012	JU009	LI011				
DD018	SP001	CP002	DI006	BI004	MR008	BR014	JU009				
DD019	SP001	CP002	BR014	JU009							
DD020	SP001	CP002	RP003	PI005	SO007	BR014	MO012	JU009	LI011		
DD021	SP001	CP002	PI005	SO007	BI004	BR014	JU009	LI011			
DD022	SP001	CP002	PI005	SO007	BI004	JU009					
DD023	SP001	CP002	PI005	DI006	SO007	BI004	JU009				
DD024	SP001	CP002	DI006	SO007	BI004	BR014	JU009	LI011			
DD025	SP001	CP002	RP003	PI005	SC015	MO012	MO012	JU009	LI011		
DD026	SP001	CP002	PI005	DI006	SO007	BI004	BR014	MO012	JU009	LI011	
DD027	SP001	CP002	RP003	PI005	MO012	LI011					
DD028	SP001	CP002	RP003	PI005	BR014	MO012	LI011				
DD029	SP001	CP002	RP003	PI005	MO012	LI011					
DD030	SP001	CP002	RP003	PI005	SC015	MO012	LI011				
DD031	SP001	CP002	PI005	SO007	BI004	JU009	LI011				
DD032	SP001	CP002	RP003	PI005	MO012	JU009	LI011				
DD033	CP002	RP003	SC015	AR013	LI011						
DD034	SP001	CP002	SO007	BI004	JU009						
DD035	SP001	CP002	RP003	PI005	BR014	BR014	MO012	JU009	LI011		
DD036	CP002	RP003	PI005	FR010	SC015	MO012	AR013	LI011			
DD037	CP002	RP003	PI005	SO007	FR010	SC015	MO012	AR013	JU009	LI011	
DD038	RP003	PI005	FR010	SC015	MO012	AR013	LI011				
DD039	RP003	FR010	SC015	AR013							
DD040	CP002	RP003	PI005	SO007	SC015	MO012	AR013	JU009	LI011		

e. Veículos

Veículo	Tipo	Custo Fixo	Custo Variável	Base	Capacidade (kg)	Capacidade (m3)	Capacidade (R\$)
hc001	C	295,45	1,1	CL001	25000	100	1500000
hc002	C	145,45	0,8	CL002	14000	100	1500000
hc003	C	295,45	1,1	CL003	25000	100	1500000
hc004	C	295,45	1,1	CL004	25000	100	1500000
hc005	C	295,45	1,1	CL005	25000	100	1500000
hc006	C	145,45	0,8	CL006	14000	100	1500000
hc007	C	295,45	1,1	CL007	25000	100	1500000
hc008	C	295,45	1,1	CL008	25000	100	1500000
hc009	C	113,63	0,56	CL009	7000	100	1500000
hc010	C	295,45	1,1	CL010	25000	100	1500000
hc011	C	145,45	0,8	CL011	14000	100	1500000
hc012	C	295,45	1,1	CL012	25000	100	1500000
hc013	C	145,45	0,8	CL013	14000	100	1500000
hc014	C	295,45	1,1	CL014	25000	100	1500000
hc015	C	295,45	1,1	CL015	25000	100	1500000
hc016	C	145,45	0,8	CL016	14000	100	1500000
hc017	C	295,45	1,1	CL017	25000	100	1500000
hc018	C	113,63	0,56	CL018	7000	100	1500000
hc019	C	145,45	0,8	CL019	14000	100	1500000
hc020	C	145,45	0,8	CL020	14000	100	1500000
hc021	C	295,45	1,1	CL021	25000	100	1500000
hc022	C	295,45	1,1	CL022	25000	100	1500000
hc023	C	295,45	1,1	CL023	25000	100	1500000
hc024	C	295,45	1,1	CL024	25000	100	1500000
hc025	C	295,45	1,1	CL025	25000	100	1500000
hc026	C	113,63	0,56	CL026	7000	100	1500000
hc027	C	113,63	0,56	CL027	7000	100	1500000
hc028	C	113,63	0,56	CL028	7000	100	1500000
hc029	C	113,63	0,56	CL029	7000	100	1500000
hc030	C	113,63	0,56	CL030	7000	100	1500000
hc031	C	113,63	0,56	CL031	7000	100	1500000
hc032	C	113,63	0,56	CL032	7000	100	1500000
hc033	C	54,54	0,4	CL033	1000	100	1500000
hc034	C	113,63	0,56	CL034	7000	100	1500000
hc035	C	113,63	0,56	CL035	7000	100	1500000
hc036	C	54,54	0,4	CL036	1000	100	1500000
hc037	C	113,63	0,56	CL037	7000	100	1500000
hc038	C	113,63	0,56	CL038	7000	100	1500000
hc039	C	113,63	0,56	CL039	7000	100	1500000
hc040	C	54,54	0,4	CL040	1000	100	1500000
hc041	C	54,54	0,4	CL041	1000	100	1500000
hc042	C	54,54	0,4	CL042	1000	100	1500000
hc043	C	54,54	0,4	CL043	1000	100	1500000
hc044	C	54,54	0,4	CL044	1000	100	1500000

hc045	C	54,54	0,4	CL045	1000	100	1500000
hc046	C	54,54	0,4	CL046	1000	100	1500000
hc047	C	54,54	0,4	CL047	1000	100	1500000
hc048	C	54,54	0,4	CL048	1000	100	1500000
hx001	E	295,45	1,1	SP001	25000	100	1500000
hx002	E	295,45	1,1	SP001	25000	100	1500000
hx003	E	295,45	1,1	SP001	25000	100	1500000
hx004	E	295,45	1,1	SP001	25000	100	1500000
hx005	E	295,45	1,1	SP001	25000	100	1500000
hx006	E	295,45	1,1	SP001	25000	100	1500000
hx007	E	295,45	1,1	SP001	25000	100	1500000
hx008	E	295,45	1,1	SP001	25000	100	1500000
hx009	E	295,45	1,1	SP001	25000	100	1500000
hx010	E	295,45	1,1	SP001	25000	100	1500000
hx011	E	295,45	1,1	SP001	25000	100	1500000
hx012	E	295,45	1,1	SP001	25000	100	1500000
hy001	E	295,45	1,1	CP002	25000	100	1500000
hy002	E	295,45	1,1	CP002	25000	100	1500000
hy003	E	295,45	1,1	CP002	25000	100	1500000
hy004	E	295,45	1,1	CP002	25000	100	1500000
hy005	E	295,45	1,1	CP002	25000	100	1500000
hz001	E	295,45	1,1	RP003	25000	100	1500000
hz002	E	295,45	1,1	RP003	25000	100	1500000
hb004	E	295,45	1,1	BI004	25000	100	1500000
hp005	E	295,45	1,1	PI005	25000	100	1500000
hd006	E	295,45	1,1	DI006	25000	100	1500000
ho007	E	295,45	1,1	SO007	25000	100	1500000
hm008	E	295,45	1,1	MR008	25000	100	1500000
hj009	E	295,45	1,1	JU009	25000	100	1500000
hf010	E	295,45	1,1	FR010	25000	100	1500000
hl011	E	295,45	1,1	LI011	25000	100	1500000
hm012	E	295,45	1,1	MO012	25000	100	1500000
ha013	E	295,45	1,1	AR013	25000	100	1500000
hb014	E	295,45	1,1	BR014	25000	100	1500000
hw015	E	295,45	1,1	SC015	25000	100	1500000
ht001	T	295,45	1,1	-	2500000	100	1500000

f. Conhecimentos de Transporte

Cliente	Destinatário	Peso (kg)	Volumetria (m3)	Valor (R\$)
CL001	DD001	12785	10.00	1000.00
CL008	DD001	19177	10.00	1000.00
CL010	DD001	16620	10.00	1000.00
CL012	DD001	21734	10.00	1000.00
CL017	DD001	19177	10.00	1000.00
CL023	DD001	15342	10.00	1000.00
CL025	DD001	23012	10.00	1000.00
CL003	DD002	21261	10.00	1000.00

CL022	DD002	17396	10.00	1000.00
CL006	DD003	2479	10.00	1000.00
CL002	DD004	1732	10.00	1000.00
CL013	DD005	8473	10.00	1000.00
CL021	DD005	19770	10.00	1000.00
CL020	DD006	6117	10.00	1000.00
CL011	DD007	4315	10.00	1000.00
CL016	DD007	9709	10.00	1000.00
CL019	DD007	7551	10.00	1000.00
CL024	DD008	605	10.00	1000.00
CL015	DD009	10294	10.00	1000.00
CL007	DD010	9376	10.00	1000.00
CL009	DD011	4737	10.00	1000.00
CL004	DD012	4267	10.00	1000.00
CL005	DD012	3492	10.00	1000.00
CL014	DD013	8227	10.00	1000.00
CL018	DD014	2209	10.00	1000.00
CL010	DD015	1101	10.00	1000.00
CL002	DD016	3815	10.00	1000.00
CL024	DD016	15258	10.00	1000.00
CL012	DD017	980	10.00	1000.00
CL017	DD018	948	10.00	1000.00
CL013	DD019	410	10.00	1000.00
CL020	DD019	1640	10.00	1000.00
CL022	DD020	1270	10.00	1000.00
CL010	DD021	1123	10.00	1000.00
CL021	DD022	1489	10.00	1000.00
CL025	DD023	1208	10.00	1000.00
CL014	DD024	6869	10.00	1000.00
CL016	DD025	1459	10.00	1000.00
CL001	DD026	3222	10.00	1000.00
CL006	DD026	7519	10.00	1000.00
CL011	DD027	3294	10.00	1000.00
CL012	DD027	366	10.00	1000.00
CL008	DD028	2575	10.00	1000.00
CL001	DD029	8563	10.00	1000.00
CL004	DD029	19979	10.00	1000.00
CL023	DD030	1677	10.00	1000.00
CL019	DD031	2399	10.00	1000.00
CL018	DD032	1677	10.00	1000.00
CL009	DD033	1598	10.00	1000.00
CL015	DD034	7597	10.00	1000.00
CL005	DD035	12975	10.00	1000.00
CL005	DD036	6142	10.00	1000.00
CL007	DD036	14330	10.00	1000.00
CL002	DD037	2160	10.00	1000.00
CL022	DD038	1229	10.00	1000.00

CL024	DD039	4861	10.00	1000.00
CL025	DD040	651	10.00	1000.00
CL030	DD001	1880	10.00	1000.00
CL038	DD001	470	10.00	1000.00
CL035	DD002	3185	10.00	1000.00
CL033	DD005	49	10.00	1000.00
CL033	DD007	297	10.00	1000.00
CL033	DD009	7	10.00	1000.00
CL033	DD010	38	10.00	1000.00
CL033	DD012	145	10.00	1000.00
CL027	DD016	4458	10.00	1000.00
CL028	DD019	132	10.00	1000.00
CL037	DD020	219	10.00	1000.00
CL034	DD024	148	10.00	1000.00
CL031	DD025	3013	10.00	1000.00
CL026	DD027	16	10.00	1000.00
CL026	DD029	163	10.00	1000.00
CL026	DD030	891	10.00	1000.00
CL028	DD034	1384	10.00	1000.00
CL029	DD034	1384	10.00	1000.00
CL034	DD034	1384	10.00	1000.00
CL037	DD034	1384	10.00	1000.00
CL038	DD034	2768	10.00	1000.00
CL039	DD034	4151	10.00	1000.00
CL040	DD035	955	10.00	1000.00
CL027	DD036	826	10.00	1000.00
CL032	DD036	1238	10.00	1000.00
CL036	DD037	631	10.00	1000.00
CL029	DD039	91	10.00	1000.00
CL042	DD001	464	10.00	1000.00
CL044	DD002	441	10.00	1000.00
CL046	DD004	229	10.00	1000.00
CL046	DD005	1	10.00	1000.00
CL047	DD007	40	10.00	1000.00
CL041	DD014	232	10.00	1000.00
CL047	DD014	232	10.00	1000.00
CL043	DD016	567	10.00	1000.00
CL045	DD019	126	10.00	1000.00
CL048	DD022	351	10.00	1000.00
CL045	DD024	22	10.00	1000.00
CL045	DD025	16	10.00	1000.00
CL045	DD034	16	10.00	1000.00
CL046	DD038	28	10.00	1000.00

g. Distâncias

Terminal i	Terminal j	Distância (km)
SP001	CP002	96

SP001	RP003	336
SP001	PI005	164
SP001	DI006	19
SP001	SO007	95
SP001	BI004	30
SP001	MR008	63
SP001	BR014	88
SP001	FR010	416
SP001	SC015	255
SP001	MO012	164
SP001	AR013	288
SP001	JU009	60
SP001	LI011	150
CP002	RP003	233
CP002	PI005	71
CP002	DI006	107
CP002	SO007	84
CP002	BI004	91
CP002	MR008	147
CP002	BR014	65
CP002	FR010	317
CP002	SC015	142
CP002	MO012	65
CP002	AR013	182
CP002	JU009	41
CP002	LI011	55
RP003	PI005	199
RP003	DI006	327
RP003	SO007	298
RP003	BI004	310
RP003	MR008	366
RP003	BR014	288
RP003	FR010	88
RP003	SC015	103
RP003	MO012	192
RP003	AR013	86
RP003	JU009	269
RP003	LI011	182
PI005	DI006	176
PI005	SO007	109
PI005	BI004	140
PI005	MR008	211
PI005	BR014	137
PI005	FR010	282
PI005	SC015	97
PI005	MO012	94
PI005	AR013	137

PI005	JU009	105
PI005	LI011	35
DI006	SO007	109
DI006	BI004	38
DI006	MR008	69
DI006	BR014	104
DI006	FR010	410
DI006	SC015	246
DI006	MO012	172
DI006	AR013	286
DI006	JU009	68
DI006	LI011	159
SO007	BI004	72
SO007	MR008	153
SO007	BR014	145
SO007	FR010	379
SO007	SC015	202
SO007	MO012	150
SO007	AR013	243
SO007	JU009	84
SO007	LI011	126
BI004	MR008	79
BI004	BR014	106
BI004	FR010	393
BI004	SC015	230
BI004	MO012	155
BI004	AR013	270
BI004	JU009	54
BI004	LI011	143
MR008	BR014	124
MR008	FR010	471
MR008	SC015	286
MR008	MO012	220
MR008	AR013	326
MR008	JU009	127
MR008	LI011	199
BR014	FR010	370
BR014	SC015	208
BR014	MO012	106
BR014	AR013	248
BR014	JU009	61
BR014	LI011	121
FR010	SC015	186
FR010	MO012	254
FR010	AR013	173
FR010	JU009	352
FR010	LI011	253
SC015	MO012	142

SC015	AR013	40
SC015	JU009	180
SC015	LI011	86
MO012	AR013	182
MO012	JU009	104
MO012	LI011	60
AR013	JU009	218
AR013	LI011	127
JU009	LI011	92

Cliente	Terminal	Distância (km)
CL001	SP001	7
CL002	SP001	12
CL003	SP001	26
CL004	SP001	27
CL005	SP001	28
CL006	SP001	28
CL007	SP001	31
CL008	SP001	33
CL009	SP001	35
CL010	SP001	37
CL011	SP001	39
CL012	SP001	41
CL013	SP001	42
CL014	SP001	42
CL015	SP001	45
CL016	SP001	46
CL017	SP001	47
CL018	SP001	55
CL019	SP001	65
CL020	SP001	75
CL021	SP001	88
CL022	SP001	90
CL023	SP001	99
CL024	SP001	105
CL025	SP001	120
CL026	CP002	2
CL027	CP002	5
CL028	CP002	9
CL029	CP002	12
CL030	CP002	18
CL031	CP002	25
CL032	CP002	59
CL033	CP002	70
CL034	CP002	105
CL035	CP002	126
CL036	CP002	132

CL037	CP002	144
CL038	CP002	184
CL039	CP002	196
CL040	CP002	212
CL041	RP003	2
CL042	RP003	4
CL043	RP003	7
CL044	RP003	45
CL045	RP003	52
CL046	RP003	55
CL047	RP003	74
CL048	RP003	76

Destinatário i	Destinatário j	Distância (km)
DD001	DD002	30
DD001	DD003	38
DD001	DD004	34
DD001	DD005	19
DD001	DD006	28
DD001	DD007	19
DD001	DD008	35
DD001	DD009	39
DD001	DD010	63
DD001	DD011	24
DD001	DD012	22
DD001	DD013	22
DD001	DD014	13
DD001	DD015	52
DD001	DD016	96
DD001	DD017	126
DD001	DD018	67
DD001	DD019	88
DD001	DD020	114
DD001	DD021	103
DD001	DD022	101
DD001	DD023	76
DD001	DD024	60
DD001	DD025	150
DD001	DD026	75
DD001	DD027	164
DD001	DD028	153
DD001	DD029	164
DD001	DD030	190
DD001	DD031	104
DD001	DD032	138
DD001	DD033	255
DD001	DD034	95

DD001	DD035	121
DD001	DD036	336
DD001	DD037	288
DD001	DD038	368
DD001	DD039	416
DD001	DD040	313
DD002	DD003	29
DD002	DD004	19
DD002	DD005	38
DD002	DD006	23
DD002	DD007	42
DD002	DD008	32
DD002	DD009	10
DD002	DD010	79
DD002	DD011	11
DD002	DD012	47
DD002	DD013	45
DD002	DD014	38
DD002	DD015	67
DD002	DD016	91
DD002	DD017	125
DD002	DD018	83
DD002	DD019	106
DD002	DD020	108
DD002	DD021	93
DD002	DD022	71
DD002	DD023	71
DD002	DD024	54
DD002	DD025	143
DD002	DD026	67
DD002	DD027	155
DD002	DD028	147
DD002	DD029	140
DD002	DD030	171
DD002	DD031	76
DD002	DD032	133
DD002	DD033	230
DD002	DD034	72
DD002	DD035	115
DD002	DD036	310
DD002	DD037	270
DD002	DD038	348
DD002	DD039	393
DD002	DD040	271
DD003	DD004	44
DD003	DD005	55
DD003	DD006	44
DD003	DD007	51

DD003	DD008	52
DD003	DD009	35
DD003	DD010	96
DD003	DD011	33
DD003	DD012	58
DD003	DD013	61
DD003	DD014	52
DD003	DD015	87
DD003	DD016	61
DD003	DD017	95
DD003	DD018	59
DD003	DD019	83
DD003	DD020	78
DD003	DD021	70
DD003	DD022	61
DD003	DD023	41
DD003	DD024	23
DD003	DD025	112
DD003	DD026	37
DD003	DD027	125
DD003	DD028	118
DD003	DD029	129
DD003	DD030	140
DD003	DD031	66
DD003	DD032	102
DD003	DD033	199
DD003	DD034	80
DD003	DD035	85
DD003	DD036	280
DD003	DD037	239
DD003	DD038	318
DD003	DD039	362
DD003	DD040	253
DD004	DD005	42
DD004	DD006	12
DD004	DD007	50
DD004	DD008	20
DD004	DD009	8
DD004	DD010	85
DD004	DD011	22
DD004	DD012	50
DD004	DD013	49
DD004	DD014	44
DD004	DD015	72
DD004	DD016	105
DD004	DD017	139
DD004	DD018	97
DD004	DD019	121

DD004	DD020	122
DD004	DD021	98
DD004	DD022	77
DD004	DD023	85
DD004	DD024	68
DD004	DD025	157
DD004	DD026	81
DD004	DD027	169
DD004	DD028	161
DD004	DD029	144
DD004	DD030	183
DD004	DD031	83
DD004	DD032	140
DD004	DD033	242
DD004	DD034	66
DD004	DD035	129
DD004	DD036	324
DD004	DD037	282
DD004	DD038	362
DD004	DD039	407
DD004	DD040	280
DD005	DD006	30
DD005	DD007	33
DD005	DD008	29
DD005	DD009	47
DD005	DD010	69
DD005	DD011	30
DD005	DD012	11
DD005	DD013	8
DD005	DD014	12
DD005	DD015	43
DD005	DD016	107
DD005	DD017	142
DD005	DD018	77
DD005	DD019	104
DD005	DD020	125
DD005	DD021	116
DD005	DD022	107
DD005	DD023	87
DD005	DD024	68
DD005	DD025	159
DD005	DD026	84
DD005	DD027	172
DD005	DD028	164
DD005	DD029	176
DD005	DD030	187
DD005	DD031	113
DD005	DD032	149

DD005	DD033	246
DD005	DD034	109
DD005	DD035	132
DD005	DD036	327
DD005	DD037	286
DD005	DD038	365
DD005	DD039	410
DD005	DD040	300
DD006	DD007	44
DD006	DD008	8
DD006	DD009	17
DD006	DD010	79
DD006	DD011	21
DD006	DD012	43
DD006	DD013	40
DD006	DD014	38
DD006	DD015	66
DD006	DD016	102
DD006	DD017	136
DD006	DD018	95
DD006	DD019	117
DD006	DD020	119
DD006	DD021	108
DD006	DD022	86
DD006	DD023	82
DD006	DD024	65
DD006	DD025	153
DD006	DD026	78
DD006	DD027	165
DD006	DD028	158
DD006	DD029	154
DD006	DD030	182
DD006	DD031	92
DD006	DD032	144
DD006	DD033	241
DD006	DD034	77
DD006	DD035	126
DD006	DD036	321
DD006	DD037	281
DD006	DD038	359
DD006	DD039	404
DD006	DD040	287
DD007	DD008	50
DD007	DD009	51
DD007	DD010	44
DD007	DD011	33
DD007	DD012	30
DD007	DD013	33

DD007	DD014	21
DD007	DD015	32
DD007	DD016	106
DD007	DD017	142
DD007	DD018	54
DD007	DD019	75
DD007	DD020	125
DD007	DD021	112
DD007	DD022	110
DD007	DD023	83
DD007	DD024	66
DD007	DD025	159
DD007	DD026	80
DD007	DD027	171
DD007	DD028	164
DD007	DD029	169
DD007	DD030	186
DD007	DD031	112
DD007	DD032	148
DD007	DD033	245
DD007	DD034	111
DD007	DD035	130
DD007	DD036	325
DD007	DD037	285
DD007	DD038	372
DD007	DD039	422
DD007	DD040	295
DD008	DD009	27
DD008	DD010	99
DD008	DD011	27
DD008	DD012	41
DD008	DD013	38
DD008	DD014	38
DD008	DD015	75
DD008	DD016	108
DD008	DD017	143
DD008	DD018	101
DD008	DD019	124
DD008	DD020	125
DD008	DD021	120
DD008	DD022	90
DD008	DD023	88
DD008	DD024	71
DD008	DD025	160
DD008	DD026	85
DD008	DD027	172
DD008	DD028	164
DD008	DD029	167

DD008	DD030	189
DD008	DD031	105
DD008	DD032	150
DD008	DD033	247
DD008	DD034	89
DD008	DD035	132
DD008	DD036	327
DD008	DD037	287
DD008	DD038	365
DD008	DD039	410
DD008	DD040	300
DD009	DD010	93
DD009	DD011	19
DD009	DD012	59
DD009	DD013	56
DD009	DD014	48
DD009	DD015	84
DD009	DD016	102
DD009	DD017	136
DD009	DD018	94
DD009	DD019	116
DD009	DD020	120
DD009	DD021	91
DD009	DD022	70
DD009	DD023	82
DD009	DD024	65
DD009	DD025	154
DD009	DD026	79
DD009	DD027	166
DD009	DD028	159
DD009	DD029	137
DD009	DD030	176
DD009	DD031	75
DD009	DD032	133
DD009	DD033	235
DD009	DD034	62
DD009	DD035	127
DD009	DD036	321
DD009	DD037	275
DD009	DD038	359
DD009	DD039	404
DD009	DD040	269
DD010	DD011	75
DD010	DD012	61
DD010	DD013	69
DD010	DD014	65
DD010	DD015	14
DD010	DD016	147

DD010	DD017	182
DD010	DD018	94
DD010	DD019	124
DD010	DD020	164
DD010	DD021	156
DD010	DD022	152
DD010	DD023	127
DD010	DD024	127
DD010	DD025	199
DD010	DD026	124
DD010	DD027	220
DD010	DD028	213
DD010	DD029	211
DD010	DD030	227
DD010	DD031	154
DD010	DD032	189
DD010	DD033	286
DD010	DD034	153
DD010	DD035	171
DD010	DD036	366
DD010	DD037	326
DD010	DD038	421
DD010	DD039	471
DD010	DD040	339
DD011	DD012	37
DD011	DD013	36
DD011	DD014	29
DD011	DD015	58
DD011	DD016	88
DD011	DD017	122
DD011	DD018	79
DD011	DD019	101
DD011	DD020	105
DD011	DD021	96
DD011	DD022	81
DD011	DD023	67
DD011	DD024	50
DD011	DD025	139
DD011	DD026	64
DD011	DD027	151
DD011	DD028	145
DD011	DD029	150
DD011	DD030	167
DD011	DD031	86
DD011	DD032	129
DD011	DD033	226
DD011	DD034	82
DD011	DD035	112

DD011	DD036	307
DD011	DD037	267
DD011	DD038	345
DD011	DD039	389
DD011	DD040	279
DD012	DD013	6
DD012	DD014	7
DD012	DD015	32
DD012	DD016	113
DD012	DD017	145
DD012	DD018	77
DD012	DD019	98
DD012	DD020	128
DD012	DD021	119
DD012	DD022	117
DD012	DD023	90
DD012	DD024	73
DD012	DD025	162
DD012	DD026	86
DD012	DD027	174
DD012	DD028	166
DD012	DD029	177
DD012	DD030	189
DD012	DD031	119
DD012	DD032	152
DD012	DD033	249
DD012	DD034	119
DD012	DD035	135
DD012	DD036	329
DD012	DD037	289
DD012	DD038	367
DD012	DD039	425
DD012	DD040	301
DD013	DD014	9
DD013	DD015	39
DD013	DD016	111
DD013	DD017	146
DD013	DD018	79
DD013	DD019	100
DD013	DD020	129
DD013	DD021	120
DD013	DD022	117
DD013	DD023	91
DD013	DD024	74
DD013	DD025	163
DD013	DD026	87
DD013	DD027	174
DD013	DD028	167

DD013	DD029	178
DD013	DD030	190
DD013	DD031	122
DD013	DD032	153
DD013	DD033	250
DD013	DD034	118
DD013	DD035	136
DD013	DD036	330
DD013	DD037	290
DD013	DD038	368
DD013	DD039	425
DD013	DD040	302
DD014	DD015	36
DD014	DD016	106
DD014	DD017	138
DD014	DD018	69
DD014	DD019	90
DD014	DD020	121
DD014	DD021	112
DD014	DD022	110
DD014	DD023	83
DD014	DD024	66
DD014	DD025	155
DD014	DD026	79
DD014	DD027	167
DD014	DD028	159
DD014	DD029	171
DD014	DD030	182
DD014	DD031	112
DD014	DD032	146
DD014	DD033	242
DD014	DD034	108
DD014	DD035	128
DD014	DD036	322
DD014	DD037	283
DD014	DD038	360
DD014	DD039	418
DD014	DD040	295
DD015	DD016	133
DD015	DD017	167
DD015	DD018	78
DD015	DD019	109
DD015	DD020	150
DD015	DD021	141
DD015	DD022	136
DD015	DD023	112
DD015	DD024	95
DD015	DD025	185

DD015	DD026	109
DD015	DD027	205
DD015	DD028	198
DD015	DD029	196
DD015	DD030	212
DD015	DD031	141
DD015	DD032	175
DD015	DD033	272
DD015	DD034	139
DD015	DD035	157
DD015	DD036	352
DD015	DD037	312
DD015	DD038	398
DD015	DD039	456
DD015	DD040	324
DD016	DD017	38
DD016	DD018	63
DD016	DD019	65
DD016	DD020	21
DD016	DD021	29
DD016	DD022	50
DD016	DD023	37
DD016	DD024	41
DD016	DD025	55
DD016	DD026	26
DD016	DD027	65
DD016	DD028	58
DD016	DD029	71
DD016	DD030	83
DD016	DD031	42
DD016	DD032	45
DD016	DD033	142
DD016	DD034	84
DD016	DD035	28
DD016	DD036	233
DD016	DD037	182
DD016	DD038	267
DD016	DD039	317
DD016	DD040	202
DD017	DD018	101
DD017	DD019	103
DD017	DD020	19
DD017	DD021	63
DD017	DD022	79
DD017	DD023	69
DD017	DD024	74
DD017	DD025	26
DD017	DD026	63

DD017	DD027	74
DD017	DD028	67
DD017	DD029	36
DD017	DD030	53
DD017	DD031	74
DD017	DD032	10
DD017	DD033	113
DD017	DD034	111
DD017	DD035	12
DD017	DD036	193
DD017	DD037	153
DD017	DD038	231
DD017	DD039	276
DD017	DD040	168
DD018	DD019	24
DD018	DD020	84
DD018	DD021	90
DD018	DD022	92
DD018	DD023	63
DD018	DD024	47
DD018	DD025	118
DD018	DD026	54
DD018	DD027	120
DD018	DD028	113
DD018	DD029	133
DD018	DD030	147
DD018	DD031	92
DD018	DD032	108
DD018	DD033	206
DD018	DD034	128
DD018	DD035	91
DD018	DD036	286
DD018	DD037	246
DD018	DD038	322
DD018	DD039	372
DD018	DD040	266
DD019	DD020	86
DD019	DD021	90
DD019	DD022	111
DD019	DD023	74
DD019	DD024	61
DD019	DD025	121
DD019	DD026	56
DD019	DD027	106
DD019	DD028	91
DD019	DD029	137
DD019	DD030	149
DD019	DD031	105

DD019	DD032	111
DD019	DD033	208
DD019	DD034	145
DD019	DD035	93
DD019	DD036	288
DD019	DD037	248
DD019	DD038	321
DD019	DD039	370
DD019	DD040	268
DD020	DD021	39
DD020	DD022	62
DD020	DD023	51
DD020	DD024	57
DD020	DD025	45
DD020	DD026	45
DD020	DD027	79
DD020	DD028	71
DD020	DD029	54
DD020	DD030	73
DD020	DD031	55
DD020	DD032	28
DD020	DD033	132
DD020	DD034	93
DD020	DD035	7
DD020	DD036	211
DD020	DD037	171
DD020	DD038	249
DD020	DD039	294
DD020	DD040	186
DD021	DD022	24
DD021	DD023	25
DD021	DD024	48
DD021	DD025	78
DD021	DD026	36
DD021	DD027	95
DD021	DD028	87
DD021	DD029	69
DD021	DD030	105
DD021	DD031	17
DD021	DD032	52
DD021	DD033	163
DD021	DD034	59
DD021	DD035	40
DD021	DD036	246
DD021	DD037	203
DD021	DD038	283
DD021	DD039	329
DD021	DD040	200

DD022	DD023	39
DD022	DD024	49
DD022	DD025	99
DD022	DD026	55
DD022	DD027	115
DD022	DD028	107
DD022	DD029	73
DD022	DD030	111
DD022	DD031	9
DD022	DD032	69
DD022	DD033	170
DD022	DD034	27
DD022	DD035	63
DD022	DD036	268
DD022	DD037	210
DD022	DD038	304
DD022	DD039	349
DD022	DD040	204
DD023	DD024	21
DD023	DD025	86
DD023	DD026	19
DD023	DD027	101
DD023	DD028	94
DD023	DD029	93
DD023	DD030	114
DD023	DD031	36
DD023	DD032	77
DD023	DD033	173
DD023	DD034	73
DD023	DD035	57
DD023	DD036	254
DD023	DD037	213
DD023	DD038	291
DD023	DD039	336
DD023	DD040	224
DD024	DD025	92
DD024	DD026	14
DD024	DD027	104
DD024	DD028	96
DD024	DD029	105
DD024	DD030	120
DD024	DD031	50
DD024	DD032	82
DD024	DD033	180
DD024	DD034	84
DD024	DD035	64
DD024	DD036	269
DD024	DD037	218

DD024	DD038	304
DD024	DD039	352
DD024	DD040	233
DD025	DD026	79
DD025	DD027	60
DD025	DD028	53
DD025	DD029	35
DD025	DD030	27
DD025	DD031	91
DD025	DD032	25
DD025	DD033	86
DD025	DD034	126
DD025	DD035	38
DD025	DD036	182
DD025	DD037	127
DD025	DD038	219
DD025	DD039	253
DD025	DD040	160
DD026	DD027	88
DD026	DD028	81
DD026	DD029	94
DD026	DD030	107
DD026	DD031	50
DD026	DD032	69
DD026	DD033	178
DD026	DD034	90
DD026	DD035	51
DD026	DD036	255
DD026	DD037	218
DD026	DD038	289
DD026	DD039	339
DD026	DD040	222
DD027	DD028	8
DD027	DD029	94
DD027	DD030	83
DD027	DD031	109
DD027	DD032	85
DD027	DD033	142
DD027	DD034	150
DD027	DD035	83
DD027	DD036	192
DD027	DD037	182
DD027	DD038	204
DD027	DD039	254
DD027	DD040	205
DD028	DD029	86
DD028	DD030	76
DD028	DD031	101

DD028	DD032	77
DD028	DD033	134
DD028	DD034	143
DD028	DD035	75
DD028	DD036	198
DD028	DD037	174
DD028	DD038	211
DD028	DD039	260
DD028	DD040	197
DD029	DD030	38
DD029	DD031	68
DD029	DD032	27
DD029	DD033	97
DD029	DD034	109
DD029	DD035	46
DD029	DD036	199
DD029	DD037	137
DD029	DD038	238
DD029	DD039	282
DD029	DD040	132
DD030	DD031	106
DD030	DD032	52
DD030	DD033	61
DD030	DD034	144
DD030	DD035	66
DD030	DD036	162
DD030	DD037	101
DD030	DD038	200
DD030	DD039	243
DD030	DD040	123
DD031	DD032	63
DD031	DD033	165
DD031	DD034	29
DD031	DD035	56
DD031	DD036	260
DD031	DD037	205
DD031	DD038	296
DD031	DD039	341
DD031	DD040	199
DD032	DD033	110
DD032	DD034	98
DD032	DD035	20
DD032	DD036	203
DD032	DD037	150
DD032	DD038	239
DD032	DD039	284
DD032	DD040	159
DD033	DD034	202

DD033	DD035	124
DD033	DD036	103
DD033	DD037	40
DD033	DD038	141
DD033	DD039	186
DD033	DD040	89
DD034	DD035	95
DD034	DD036	298
DD034	DD037	243
DD034	DD038	335
DD034	DD039	379
DD034	DD040	242
DD035	DD036	206
DD035	DD037	164
DD035	DD038	244
DD035	DD039	288
DD035	DD040	178
DD036	DD037	86
DD036	DD038	44
DD036	DD039	88
DD036	DD040	162
DD037	DD038	128
DD037	DD039	173
DD037	DD040	72
DD038	DD039	48
DD038	DD040	200
DD039	DD040	247

Terminal	Destinatário	Distância (km)
SP001	DD001	10
SP001	DD002	35
SP001	DD003	43
SP001	DD004	39
SP001	DD005	24
SP001	DD006	33
SP001	DD007	24
SP001	DD008	40
SP001	DD009	44
SP001	DD010	68
SP001	DD011	29
SP001	DD012	27
SP001	DD013	27
SP001	DD014	18
SP001	DD015	57
SP001	DD016	101
SP001	DD017	131
SP001	DD018	72

SP001	DD019	93
SP001	DD020	119
SP001	DD021	108
SP001	DD022	106
SP001	DD023	81
SP001	DD024	65
SP001	DD025	155
SP001	DD026	80
SP001	DD027	169
SP001	DD028	158
SP001	DD029	169
SP001	DD030	195
SP001	DD031	109
SP001	DD032	143
SP001	DD033	260
SP001	DD034	100
SP001	DD035	126
SP001	DD036	341
SP001	DD037	293
SP001	DD038	373
SP001	DD039	421
SP001	DD040	318
CP002	DD001	101
CP002	DD002	96
CP002	DD003	66
CP002	DD004	110
CP002	DD005	112
CP002	DD006	107
CP002	DD007	111
CP002	DD008	113
CP002	DD009	107
CP002	DD010	152
CP002	DD011	93
CP002	DD012	118
CP002	DD013	116
CP002	DD014	111
CP002	DD015	138
CP002	DD016	5
CP002	DD017	43
CP002	DD018	68
CP002	DD019	70
CP002	DD020	26
CP002	DD021	34
CP002	DD022	55
CP002	DD023	42
CP002	DD024	46
CP002	DD025	60
CP002	DD026	31

CP002	DD027	70
CP002	DD028	63
CP002	DD029	76
CP002	DD030	88
CP002	DD031	47
CP002	DD032	50
CP002	DD033	147
CP002	DD034	89
CP002	DD035	33
CP002	DD036	238
CP002	DD037	187
CP002	DD038	272
CP002	DD039	322
CP002	DD040	207
RP003	DD001	341
RP003	DD002	315
RP003	DD003	285
RP003	DD004	329
RP003	DD005	332
RP003	DD006	326
RP003	DD007	330
RP003	DD008	332
RP003	DD009	326
RP003	DD010	371
RP003	DD011	312
RP003	DD012	334
RP003	DD013	335
RP003	DD014	327
RP003	DD015	357
RP003	DD016	238
RP003	DD017	198
RP003	DD018	291
RP003	DD019	293
RP003	DD020	216
RP003	DD021	251
RP003	DD022	273
RP003	DD023	259
RP003	DD024	274
RP003	DD025	187
RP003	DD026	260
RP003	DD027	197
RP003	DD028	203
RP003	DD029	204
RP003	DD030	167
RP003	DD031	265
RP003	DD032	208
RP003	DD033	108
RP003	DD034	303

RP003	DD035	211
RP003	DD036	5
RP003	DD037	91
RP003	DD038	49
RP003	DD039	93
RP003	DD040	167
PI005	DD001	169
PI005	DD002	145
PI005	DD003	134
PI005	DD004	149
PI005	DD005	181
PI005	DD006	159
PI005	DD007	174
PI005	DD008	172
PI005	DD009	142
PI005	DD010	216
PI005	DD011	155
PI005	DD012	182
PI005	DD013	183
PI005	DD014	176
PI005	DD015	201
PI005	DD016	76
PI005	DD017	41
PI005	DD018	138
PI005	DD019	142
PI005	DD020	59
PI005	DD021	74
PI005	DD022	78
PI005	DD023	98
PI005	DD024	110
PI005	DD025	40
PI005	DD026	99
PI005	DD027	99
PI005	DD028	91
PI005	DD029	5
PI005	DD030	43
PI005	DD031	73
PI005	DD032	32
PI005	DD033	102
PI005	DD034	114
PI005	DD035	51
PI005	DD036	204
PI005	DD037	142
PI005	DD038	243
PI005	DD039	287
PI005	DD040	137
DI006	DD001	24
DI006	DD002	43

DI006	DD003	60
DI006	DD004	47
DI006	DD005	5
DI006	DD006	35
DI006	DD007	38
DI006	DD008	34
DI006	DD009	52
DI006	DD010	74
DI006	DD011	35
DI006	DD012	16
DI006	DD013	13
DI006	DD014	17
DI006	DD015	48
DI006	DD016	112
DI006	DD017	147
DI006	DD018	82
DI006	DD019	109
DI006	DD020	130
DI006	DD021	121
DI006	DD022	112
DI006	DD023	92
DI006	DD024	73
DI006	DD025	164
DI006	DD026	89
DI006	DD027	177
DI006	DD028	169
DI006	DD029	181
DI006	DD030	192
DI006	DD031	118
DI006	DD032	154
DI006	DD033	251
DI006	DD034	114
DI006	DD035	137
DI006	DD036	332
DI006	DD037	291
DI006	DD038	370
DI006	DD039	415
DI006	DD040	305
SO007	DD001	100
SO007	DD002	77
SO007	DD003	85
SO007	DD004	71
SO007	DD005	114
SO007	DD006	82
SO007	DD007	116
SO007	DD008	94
SO007	DD009	67
SO007	DD010	158

SO007	DD011	87
SO007	DD012	124
SO007	DD013	123
SO007	DD014	113
SO007	DD015	144
SO007	DD016	89
SO007	DD017	116
SO007	DD018	133
SO007	DD019	150
SO007	DD020	98
SO007	DD021	64
SO007	DD022	41
SO007	DD023	78
SO007	DD024	89
SO007	DD025	131
SO007	DD026	95
SO007	DD027	155
SO007	DD028	148
SO007	DD029	114
SO007	DD030	149
SO007	DD031	48
SO007	DD032	103
SO007	DD033	207
SO007	DD034	5
SO007	DD035	100
SO007	DD036	303
SO007	DD037	248
SO007	DD038	340
SO007	DD039	384
SO007	DD040	247
BI004	DD001	35
BI004	DD002	5
BI004	DD003	34
BI004	DD004	24
BI004	DD005	43
BI004	DD006	28
BI004	DD007	47
BI004	DD008	37
BI004	DD009	15
BI004	DD010	84
BI004	DD011	16
BI004	DD012	52
BI004	DD013	50
BI004	DD014	43
BI004	DD015	72
BI004	DD016	96
BI004	DD017	130
BI004	DD018	88

BI004	DD019	111
BI004	DD020	113
BI004	DD021	98
BI004	DD022	76
BI004	DD023	76
BI004	DD024	59
BI004	DD025	148
BI004	DD026	72
BI004	DD027	160
BI004	DD028	152
BI004	DD029	145
BI004	DD030	176
BI004	DD031	81
BI004	DD032	138
BI004	DD033	235
BI004	DD034	77
BI004	DD035	120
BI004	DD036	315
BI004	DD037	275
BI004	DD038	353
BI004	DD039	398
BI004	DD040	276
MR008	DD001	68
MR008	DD002	84
MR008	DD003	101
MR008	DD004	90
MR008	DD005	74
MR008	DD006	84
MR008	DD007	49
MR008	DD008	104
MR008	DD009	98
MR008	DD010	5
MR008	DD011	80
MR008	DD012	66
MR008	DD013	74
MR008	DD014	70
MR008	DD015	19
MR008	DD016	152
MR008	DD017	187
MR008	DD018	99
MR008	DD019	129
MR008	DD020	169
MR008	DD021	161
MR008	DD022	157
MR008	DD023	132
MR008	DD024	132
MR008	DD025	204
MR008	DD026	129

MR008	DD027	225
MR008	DD028	218
MR008	DD029	216
MR008	DD030	232
MR008	DD031	159
MR008	DD032	194
MR008	DD033	291
MR008	DD034	158
MR008	DD035	176
MR008	DD036	371
MR008	DD037	331
MR008	DD038	426
MR008	DD039	476
MR008	DD040	344
BR014	DD001	93
BR014	DD002	111
BR014	DD003	88
BR014	DD004	126
BR014	DD005	109
BR014	DD006	122
BR014	DD007	80
BR014	DD008	129
BR014	DD009	121
BR014	DD010	129
BR014	DD011	106
BR014	DD012	103
BR014	DD013	105
BR014	DD014	95
BR014	DD015	114
BR014	DD016	70
BR014	DD017	108
BR014	DD018	29
BR014	DD019	5
BR014	DD020	91
BR014	DD021	95
BR014	DD022	116
BR014	DD023	79
BR014	DD024	66
BR014	DD025	126
BR014	DD026	61
BR014	DD027	111
BR014	DD028	96
BR014	DD029	142
BR014	DD030	154
BR014	DD031	110
BR014	DD032	116
BR014	DD033	213
BR014	DD034	150

BR014	DD035	98
BR014	DD036	293
BR014	DD037	253
BR014	DD038	326
BR014	DD039	375
BR014	DD040	273
FR010	DD001	421
FR010	DD002	398
FR010	DD003	367
FR010	DD004	412
FR010	DD005	415
FR010	DD006	409
FR010	DD007	427
FR010	DD008	415
FR010	DD009	409
FR010	DD010	476
FR010	DD011	394
FR010	DD012	430
FR010	DD013	430
FR010	DD014	423
FR010	DD015	461
FR010	DD016	322
FR010	DD017	281
FR010	DD018	377
FR010	DD019	375
FR010	DD020	299
FR010	DD021	334
FR010	DD022	354
FR010	DD023	341
FR010	DD024	357
FR010	DD025	258
FR010	DD026	344
FR010	DD027	259
FR010	DD028	265
FR010	DD029	287
FR010	DD030	248
FR010	DD031	346
FR010	DD032	289
FR010	DD033	191
FR010	DD034	384
FR010	DD035	293
FR010	DD036	93
FR010	DD037	178
FR010	DD038	53
FR010	DD039	5
FR010	DD040	252
SC015	DD001	260
SC015	DD002	235

SC015	DD003	204
SC015	DD004	247
SC015	DD005	251
SC015	DD006	246
SC015	DD007	250
SC015	DD008	252
SC015	DD009	240
SC015	DD010	291
SC015	DD011	231
SC015	DD012	254
SC015	DD013	255
SC015	DD014	247
SC015	DD015	277
SC015	DD016	147
SC015	DD017	118
SC015	DD018	211
SC015	DD019	213
SC015	DD020	137
SC015	DD021	168
SC015	DD022	175
SC015	DD023	178
SC015	DD024	185
SC015	DD025	91
SC015	DD026	183
SC015	DD027	147
SC015	DD028	139
SC015	DD029	102
SC015	DD030	66
SC015	DD031	170
SC015	DD032	115
SC015	DD033	5
SC015	DD034	207
SC015	DD035	129
SC015	DD036	108
SC015	DD037	45
SC015	DD038	146
SC015	DD039	191
SC015	DD040	94
MO012	DD001	169
MO012	DD002	160
MO012	DD003	130
MO012	DD004	174
MO012	DD005	177
MO012	DD006	170
MO012	DD007	176
MO012	DD008	177
MO012	DD009	171
MO012	DD010	225

MO012	DD011	156
MO012	DD012	179
MO012	DD013	179
MO012	DD014	172
MO012	DD015	210
MO012	DD016	70
MO012	DD017	79
MO012	DD018	125
MO012	DD019	111
MO012	DD020	84
MO012	DD021	100
MO012	DD022	120
MO012	DD023	106
MO012	DD024	109
MO012	DD025	65
MO012	DD026	93
MO012	DD027	5
MO012	DD028	13
MO012	DD029	99
MO012	DD030	88
MO012	DD031	114
MO012	DD032	90
MO012	DD033	147
MO012	DD034	155
MO012	DD035	88
MO012	DD036	197
MO012	DD037	187
MO012	DD038	209
MO012	DD039	259
MO012	DD040	210
AR013	DD001	293
AR013	DD002	275
AR013	DD003	244
AR013	DD004	287
AR013	DD005	291
AR013	DD006	286
AR013	DD007	290
AR013	DD008	292
AR013	DD009	280
AR013	DD010	331
AR013	DD011	272
AR013	DD012	294
AR013	DD013	295
AR013	DD014	288
AR013	DD015	317
AR013	DD016	187
AR013	DD017	158
AR013	DD018	251

AR013	DD019	253
AR013	DD020	176
AR013	DD021	208
AR013	DD022	215
AR013	DD023	218
AR013	DD024	223
AR013	DD025	132
AR013	DD026	223
AR013	DD027	187
AR013	DD028	179
AR013	DD029	142
AR013	DD030	106
AR013	DD031	210
AR013	DD032	155
AR013	DD033	45
AR013	DD034	248
AR013	DD035	169
AR013	DD036	91
AR013	DD037	5
AR013	DD038	133
AR013	DD039	178
AR013	DD040	77
JU009	DD001	65
JU009	DD002	59
JU009	DD003	28
JU009	DD004	73
JU009	DD005	73
JU009	DD006	70
JU009	DD007	71
JU009	DD008	76
JU009	DD009	70
JU009	DD010	132
JU009	DD011	55
JU009	DD012	78
JU009	DD013	79
JU009	DD014	71
JU009	DD015	100
JU009	DD016	46
JU009	DD017	79
JU009	DD018	52
JU009	DD019	66
JU009	DD020	62
JU009	DD021	53
JU009	DD022	54
JU009	DD023	26
JU009	DD024	5
JU009	DD025	97
JU009	DD026	19

JU009	DD027	109
JU009	DD028	101
JU009	DD029	110
JU009	DD030	125
JU009	DD031	55
JU009	DD032	87
JU009	DD033	185
JU009	DD034	89
JU009	DD035	69
JU009	DD036	274
JU009	DD037	223
JU009	DD038	309
JU009	DD039	357
JU009	DD040	238
LI011	DD001	155
LI011	DD002	148
LI011	DD003	117
LI011	DD004	162
LI011	DD005	164
LI011	DD006	158
LI011	DD007	164
LI011	DD008	165
LI011	DD009	159
LI011	DD010	204
LI011	DD011	144
LI011	DD012	167
LI011	DD013	168
LI011	DD014	160
LI011	DD015	190
LI011	DD016	60
LI011	DD017	31
LI011	DD018	123
LI011	DD019	126
LI011	DD020	50
LI011	DD021	83
LI011	DD022	104
LI011	DD023	91
LI011	DD024	97
LI011	DD025	5
LI011	DD026	84
LI011	DD027	65
LI011	DD028	58
LI011	DD029	40
LI011	DD030	32
LI011	DD031	96
LI011	DD032	30
LI011	DD033	91
LI011	DD034	131

LI011	DD035	43
LI011	DD036	187
LI011	DD037	132
LI011	DD038	224
LI011	DD039	258
LI011	DD040	165

A.3 RESULTADOS

Terminais Utilizados

tBI004	1
tCP002	1
tRP003	1
tSP001	1

Veículos Utilizados

vHC001	1
vHC002	1
vHC003	1
vHC004	1
vHC005	1
vHC006	1
vHC007	1
vHC008	1
vHC009	1
vHC010	1
vHC011	1
vHC012	1
vHC013	1
vHC014	1
vHC015	1
vHC016	1
vHC017	1
vHC018	1
vHC019	1
vHC020	1
vHC021	1
vHC022	1
vHC023	1
vHC024	1
vHC025	1
vHC026	1
vHC027	1
vHC028	1

Coletas

vHC029	1	
vHC030	1	
vHC031	1	
vHC032	1	
vHC033	1	
vHC034	1	
vHC035	1	
vHC036	1	
vHC037	1	
vHC038	1	
vHC039	1	
vHC040	1	
vHC041	1	
vHC042	1	
vHC043	1	
vHC044	1	
vHC045	1	
vHC046	1	
vHC047	1	
vHC048	1	
vHT001	1	Transferência
vHX001	1	Entrega SP
vHX002	1	
vHX003	1	
vHX004	1	
vHX005	1	
vHX006	1	
vHX007	1	
vHX008	1	
vHX009	1	
vHX010	1	
vHX011	1	
vHX012	1	
vHY001	1	Entrega CP
vHY002	1	
vHY003	1	
vHY004	1	
vHY005	1	
vHZ001	1	Entrega RP
vHZ002	1	
vHB004	1	Entrega BI

Arcos Existentes		
xCL001,SP001,HC001	1	Arcos de Coleta
xCL002,SP001,HC002	1	
xCL003,SP001,HC003	1	
xCL004,SP001,HC004	1	

xCL005,SP001,HC005	1	
xCL006,SP001,HC006	1	
xCL007,SP001,HC007	1	
xCL008,SP001,HC008	1	
xCL009,SP001,HC009	1	
xCL010,SP001,HC010	1	
xCL011,SP001,HC011	1	
xCL012,SP001,HC012	1	
xCL013,SP001,HC013	1	
xCL014,SP001,HC014	1	
xCL015,SP001,HC015	1	
xCL016,SP001,HC016	1	
xCL017,SP001,HC017	1	
xCL018,SP001,HC018	1	
xCL019,SP001,HC019	1	
xCL020,SP001,HC020	1	
xCL021,SP001,HC021	1	
xCL022,SP001,HC022	1	
xCL023,SP001,HC023	1	
xCL024,SP001,HC024	1	
xCL025,SP001,HC025	1	
xCL026,CP002,HC026	1	
xCL027,CP002,HC027	1	
xCL028,CP002,HC028	1	
xCL029,CP002,HC029	1	
xCL030,CP002,HC030	1	
xCL031,CP002,HC031	1	
xCL032,CP002,HC032	1	
xCL033,CP002,HC033	1	
xCL034,CP002,HC034	1	
xCL035,CP002,HC035	1	
xCL036,CP002,HC036	1	
xCL037,CP002,HC037	1	
xCL038,CP002,HC038	1	
xCL039,CP002,HC039	1	
xCL040,CP002,HC040	1	
xCL041,RP003,HC041	1	
xCL042,RP003,HC042	1	
xCL043,RP003,HC043	1	
xCL044,RP003,HC044	1	
xCL045,RP003,HC045	1	
xCL046,RP003,HC046	1	
xCL047,RP003,HC047	1	
xCL048,RP003,HC048	1	
xBI004,SP001,HT001	1	Arcos de Transferência
xCP002,CP002,CL026,DD027,HT001	1	

xCP002,CP002,CL026,DD029,HT001	1
xCP002,CP002,CL026,DD030,HT001	1
xCP002,CP002,CL027,DD016,HT001	1
xCP002,CP002,CL028,DD034,HT001	1
xCP002,CP002,CL029,DD034,HT001	1
xCP002,CP002,CL031,DD025,HT001	1
xCP002,CP002,CL034,DD034,HT001	1
xCP002,CP002,CL036,DD037,HT001	1
xCP002,CP002,CL037,DD020,HT001	1
xCP002,CP002,CL037,DD034,HT001	1
xCP002,CP002,CL038,DD034,HT001	1
xCP002,CP002,CL039,DD034,HT001	1
xCP002,CP002,CL040,DD035,HT001	1
xCP002,RP003,CL027,DD036,HT001	1
xCP002,RP003,CL029,DD039,HT001	1
xCP002,RP003,CL032,DD036,HT001	1
xCP002,RP003,HT001	1
xCP002,SP001,CL028,DD019,HT001	1
xCP002,SP001,CL030,DD001,HT001	1
xCP002,SP001,CL033,DD005,HT001	1
xCP002,SP001,CL033,DD007,HT001	1
xCP002,SP001,CL033,DD009,HT001	1
xCP002,SP001,CL033,DD010,HT001	1
xCP002,SP001,CL033,DD012,HT001	1
xCP002,SP001,CL034,DD024,HT001	1
xCP002,SP001,CL035,DD002,HT001	1
xCP002,SP001,CL038,DD001,HT001	1
xCP002,SP001,HT001	1
xRP003,CP002,CL043,DD016,HT001	1
xRP003,CP002,CL045,DD025,HT001	1
xRP003,CP002,CL045,DD034,HT001	1
xRP003,CP002,CL048,DD022,HT001	1
xRP003,CP002,HT001	1
xRP003,RP003,CL046,DD038,HT001	1
xRP003,SP001,CL041,DD014,HT001	1
xRP003,SP001,CL042,DD001,HT001	1
xRP003,SP001,CL044,DD002,HT001	1
xRP003,SP001,CL045,DD019,HT001	1
xRP003,SP001,CL045,DD024,HT001	1
xRP003,SP001,CL046,DD004,HT001	1
xRP003,SP001,CL046,DD005,HT001	1
xRP003,SP001,CL047,DD007,HT001	1
xRP003,SP001,CL047,DD014,HT001	1
xRP003,SP001,HT001	1
xSP001,BI004,CL022,DD002,HT001	1
xSP001,BI004,HT001	1
xSP001,CP002,CL001,DD029,HT001	1

xSP001,CP002,CL002,DD016,HT001	1
xSP001,CP002,CL002,DD037,HT001	1
xSP001,CP002,CL004,DD029,HT001	1
xSP001,CP002,CL005,DD035,HT001	1
xSP001,CP002,CL008,DD028,HT001	1
xSP001,CP002,CL009,DD033,HT001	1
xSP001,CP002,CL010,DD021,HT001	1
xSP001,CP002,CL011,DD027,HT001	1
xSP001,CP002,CL012,DD017,HT001	1
xSP001,CP002,CL012,DD027,HT001	1
xSP001,CP002,CL015,DD034,HT001	1
xSP001,CP002,CL016,DD025,HT001	1
xSP001,CP002,CL018,DD032,HT001	1
xSP001,CP002,CL019,DD031,HT001	1
xSP001,CP002,CL021,DD022,HT001	1
xSP001,CP002,CL022,DD020,HT001	1
xSP001,CP002,CL023,DD030,HT001	1
xSP001,CP002,CL024,DD016,HT001	1
xSP001,CP002,CL025,DD040,HT001	1
xSP001,CP002,HT001	1
xSP001,RP003,CL005,DD036,HT001	1
xSP001,RP003,CL007,DD036,HT001	1
xSP001,RP003,CL022,DD038,HT001	1
xSP001,RP003,CL024,DD039,HT001	1
xSP001,RP003,HT001	1
xSP001,SP001,CL001,DD001,HT001	1
xSP001,SP001,CL001,DD026,HT001	1
xSP001,SP001,CL002,DD004,HT001	1
xSP001,SP001,CL003,DD002,HT001	1
xSP001,SP001,CL004,DD012,HT001	1
xSP001,SP001,CL005,DD012,HT001	1
xSP001,SP001,CL006,DD003,HT001	1
xSP001,SP001,CL006,DD026,HT001	1
xSP001,SP001,CL007,DD010,HT001	1
xSP001,SP001,CL008,DD001,HT001	1
xSP001,SP001,CL009,DD011,HT001	1
xSP001,SP001,CL010,DD001,HT001	1
xSP001,SP001,CL010,DD015,HT001	1
xSP001,SP001,CL011,DD007,HT001	1
xSP001,SP001,CL012,DD001,HT001	1
xSP001,SP001,CL013,DD005,HT001	1
xSP001,SP001,CL013,DD019,HT001	1
xSP001,SP001,CL014,DD013,HT001	1
xSP001,SP001,CL014,DD024,HT001	1
xSP001,SP001,CL015,DD009,HT001	1
xSP001,SP001,CL016,DD007,HT001	1
xSP001,SP001,CL017,DD001,HT001	1

xSP001,SP001,CL017,DD018,HT001	1
xSP001,SP001,CL018,DD014,HT001	1
xSP001,SP001,CL019,DD007,HT001	1
xSP001,SP001,CL020,DD006,HT001	1
xSP001,SP001,CL020,DD019,HT001	1
xSP001,SP001,CL021,DD005,HT001	1
xSP001,SP001,CL023,DD001,HT001	1
xSP001,SP001,CL024,DD008,HT001	1
xSP001,SP001,CL025,DD001,HT001	1
xSP001,SP001,CL025,DD023,HT001	1
yRP003,SP001,CL046,DD005,HT001	1
xDD001,SP001,HX001	1
xSP001,DD001,HX001	1
xDD001,SP001,HX002	1
xSP001,DD001,HX002	1
xDD001,SP001,HX003	1
xSP001,DD001,HX003	1
xDD002,SP001,HX004	1
xSP001,DD002,HX004	1
xDD010,DD015,HX005	1
xDD012,DD014,HX005	1
xDD014,SP001,HX005	1
xDD015,DD012,HX005	1
xSP001,DD010,HX005	1
xDD001,SP001,HX006	1
xDD005,DD013,HX006	1
xDD013,DD001,HX006	1
xSP001,DD005,HX006	1
xDD001,SP001,HX007	1
xSP001,DD001,HX007	1
xDD004,DD009,HX008	1
xDD006,DD004,HX008	1
xDD008,DD006,HX008	1
xDD009,DD011,HX008	1
xDD011,SP001,HX008	1
xSP001,DD008,HX008	1
xDD005,SP001,HX009	1
xSP001,DD005,HX009	1
xDD001,SP001,HX010	1
xSP001,DD001,HX010	1
xDD003,SP001,HX011	1
xDD018,DD019,HX011	1
xDD019,DD026,HX011	1
xDD023,DD024,HX011	1
xDD024,DD003,HX011	1
xDD026,DD023,HX011	1

Arcos de Entrega

xSP001,DD018,HX011	1
xDD007,SP001,HX012	1
xSP001,DD007,HX012	1
xCP002,DD020,HY001	1
xDD020,DD035,HY001	1
xDD021,CP002,HY001	1
xDD035,DD021,HY001	1
xCP002,DD031,HY002	1
xDD022,CP002,HY002	1
xDD031,DD034,HY002	1
xDD034,DD022,HY002	1
xCP002,DD017,HY003	1
xDD017,DD032,HY003	1
xDD029,CP002,HY003	1
xDD032,DD029,HY003	1
xCP002,DD027,HY004	1
xDD025,DD029,HY004	1
xDD027,DD028,HY004	1
xDD028,DD025,HY004	1
xDD029,DD030,HY004	1
xDD030,DD033,HY004	1
xDD033,DD037,HY004	1
xDD037,DD040,HY004	1
xDD040,CP002,HY004	1
xCP002,DD016,HY005	1
xDD016,CP002,HY005	1
xDD036,RP003,HZ001	1
xRP003,DD036,HZ001	1
xDD038,RP003,HZ002	1
xDD039,DD038,HZ002	1
xRP003,DD039,HZ002	1
xBI004,DD002,HB004	1
xDD002,BI004,HB004	1

Embarcadores e Demandas	
CCL001	24570
CCL002	7707
CCL003	21261
CCL004	24246
CCL005	22609
CCL006	9998
CCL007	23706
CCL008	21752
CCL009	6335
CCL010	18844
CCL011	7609

CCL012	23080
CCL013	8883
CCL014	15096
CCL015	17891
CCL016	11168
CCL017	20125
CCL018	3886
CCL019	9950
CCL020	7757
CCL021	21259
CCL022	19895
CCL023	17019
CCL024	20724
CCL025	24871
CCL026	1070
CCL027	5284
CCL028	1516
CCL029	1475
CCL030	1880
CCL031	3013
CCL032	1238
CCL033	536
CCL034	1532
CCL035	3185
CCL036	631
CCL037	1603
CCL038	3238
CCL039	4151
CCL040	955
CCL041	232
CCL042	464
CCL043	567
CCL044	441
CCL045	180
CCL046	258
CCL047	272
CCL048	351
DCL001,DD001	12785
DCL001,DD026	3222
DCL001,DD029	8563
DCL002,DD004	1732
DCL002,DD016	3815
DCL002,DD037	2160
DCL003,DD002	21261
DCL004,DD012	4267
DCL004,DD029	19979
DCL005,DD012	3492

DCL005,DD035	12975
DCL005,DD036	6142
DCL006,DD003	2479
DCL006,DD026	7519
DCL007,DD010	9376
DCL007,DD036	14330
DCL008,DD001	19177
DCL008,DD028	2575
DCL009,DD011	4737
DCL009,DD033	1598
DCL010,DD001	16620
DCL010,DD015	1101
DCL010,DD021	1123
DCL011,DD007	4315
DCL011,DD027	3294
DCL012,DD001	21734
DCL012,DD017	980
DCL012,DD027	366
DCL013,DD005	8473
DCL013,DD019	410
DCL014,DD013	8227
DCL014,DD024	6869
DCL015,DD009	10294
DCL015,DD034	7597
DCL016,DD007	9709
DCL016,DD025	1459
DCL017,DD001	19177
DCL017,DD018	948
DCL018,DD014	2209
DCL018,DD032	1677
DCL019,DD007	7551
DCL019,DD031	2399
DCL020,DD006	6117
DCL020,DD019	1640
DCL021,DD005	19770
DCL021,DD022	1489
DCL022,DD002	17396
DCL022,DD020	1270
DCL022,DD038	1229
DCL023,DD001	15342
DCL023,DD030	1677
DCL024,DD008	605
DCL024,DD016	15258
DCL024,DD039	4861
DCL025,DD001	23012
DCL025,DD023	1208
DCL025,DD040	651

DCL026,DD027	16
DCL026,DD029	163
DCL026,DD030	891
DCL027,DD016	4458
DCL027,DD036	826
DCL028,DD019	132
DCL028,DD034	1384
DCL029,DD034	1384
DCL029,DD039	91
DCL030,DD001	1880
DCL031,DD025	3013
DCL032,DD036	1238
DCL033,DD005	49
DCL033,DD007	297
DCL033,DD009	7
DCL033,DD010	38
DCL033,DD012	145
DCL034,DD024	148
DCL034,DD034	1384
DCL035,DD002	3185
DCL036,DD037	631
DCL037,DD020	219
DCL037,DD034	1384
DCL038,DD001	470
DCL038,DD034	2768
DCL039,DD034	4151
DCL040,DD035	955
DCL041,DD014	232
DCL042,DD001	464
DCL043,DD016	567
DCL044,DD002	441
DCL045,DD019	126
DCL045,DD024	22
DCL045,DD025	16
DCL045,DD034	16
DCL046,DD004	229
DCL046,DD005	1
DCL046,DD038	28
DCL047,DD007	40
DCL047,DD014	232
DCL048,DD022	351

Fluxos Existentes		Fluxos Coleta
yCL001,SP001,HC001	24570	
yCL002,SP001,HC002	7707	
yCL003,SP001,HC003	21261	
yCL004,SP001,HC004	24246	

yCL005,SP001,HC005	22609
yCL006,SP001,HC006	9998
yCL007,SP001,HC007	23706
yCL008,SP001,HC008	21752
yCL009,SP001,HC009	6335
yCL010,SP001,HC010	18844
yCL011,SP001,HC011	7609
yCL012,SP001,HC012	23080
yCL013,SP001,HC013	8883
yCL014,SP001,HC014	15096
yCL015,SP001,HC015	17891
yCL016,SP001,HC016	11168
yCL017,SP001,HC017	20125
yCL018,SP001,HC018	3886
yCL019,SP001,HC019	9950
yCL020,SP001,HC020	7757
yCL021,SP001,HC021	21259
yCL022,SP001,HC022	19895
yCL023,SP001,HC023	17019
yCL024,SP001,HC024	20724
yCL025,SP001,HC025	24871
yCL026,CP002,HC026	1070
yCL027,CP002,HC027	5284
yCL028,CP002,HC028	1516
yCL029,CP002,HC029	1475
yCL030,CP002,HC030	1880
yCL031,CP002,HC031	3013
yCL032,CP002,HC032	1238
yCL033,CP002,HC033	536
yCL034,CP002,HC034	1532
yCL035,CP002,HC035	3185
yCL036,CP002,HC036	631
yCL037,CP002,HC037	1603
yCL038,CP002,HC038	3238
yCL039,CP002,HC039	4151
yCL040,CP002,HC040	955
yCL041,RP003,HC041	232
yCL042,RP003,HC042	464
yCL043,RP003,HC043	567
yCL044,RP003,HC044	441
yCL045,RP003,HC045	180
yCL046,RP003,HC046	258
yCL047,RP003,HC047	272
yCL048,RP003,HC048	351

yCP002,RP003,CL027,DD036,HT001	826	Fluxos Transferência
yCP002,RP003,CL029,DD039,HT001	91	

yCP002,RP003,CL032,DD036,HT001	1238
yCP002,RP003,HT001	2155
yCP002,SP001,CL028,DD019,HT001	132
yCP002,SP001,CL030,DD001,HT001	1880
yCP002,SP001,CL033,DD005,HT001	49
yCP002,SP001,CL033,DD007,HT001	297
yCP002,SP001,CL033,DD009,HT001	7
yCP002,SP001,CL033,DD010,HT001	38
yCP002,SP001,CL033,DD012,HT001	145
yCP002,SP001,CL034,DD024,HT001	148
yCP002,SP001,CL035,DD002,HT001	3185
yCP002,SP001,CL038,DD001,HT001	470
yCP002,SP001,HT001	6351
yRP003,CP002,CL043,DD016,HT001	567
yRP003,CP002,CL045,DD025,HT001	16
yRP003,CP002,CL045,DD034,HT001	16
yRP003,CP002,CL048,DD022,HT001	351
yRP003,CP002,HT001	950
yRP003,SP001,CL041,DD014,HT001	232
yRP003,SP001,CL042,DD001,HT001	464
yRP003,SP001,CL044,DD002,HT001	441
yRP003,SP001,CL045,DD019,HT001	126
yRP003,SP001,CL045,DD024,HT001	22
yRP003,SP001,CL046,DD004,HT001	229
yRP003,SP001,CL047,DD007,HT001	40
yRP003,SP001,CL047,DD014,HT001	232
yRP003,SP001,HT001	1787
ySP001,BI004,CL022,DD002,HT001	17396
ySP001,BI004,HT001	17396
ySP001,CP002,CL001,DD029,HT001	8563
ySP001,CP002,CL002,DD016,HT001	3815
ySP001,CP002,CL002,DD037,HT001	2160
ySP001,CP002,CL004,DD029,HT001	19979
ySP001,CP002,CL005,DD035,HT001	12975
ySP001,CP002,CL008,DD028,HT001	2575
ySP001,CP002,CL009,DD033,HT001	1598
ySP001,CP002,CL010,DD021,HT001	1123
ySP001,CP002,CL011,DD027,HT001	3294
ySP001,CP002,CL012,DD017,HT001	980
ySP001,CP002,CL012,DD027,HT001	366
ySP001,CP002,CL015,DD034,HT001	7597
ySP001,CP002,CL016,DD025,HT001	1459
ySP001,CP002,CL018,DD032,HT001	1677
ySP001,CP002,CL019,DD031,HT001	2399
ySP001,CP002,CL021,DD022,HT001	1489
ySP001,CP002,CL022,DD020,HT001	1270
ySP001,CP002,CL023,DD030,HT001	1677

ySP001,CP002,CL024,DD016,HT001	15258
ySP001,CP002,CL025,DD040,HT001	651
ySP001,CP002,HT001	90905
ySP001,RP003,CL005,DD036,HT001	6142
ySP001,RP003,CL007,DD036,HT001	14330
ySP001,RP003,CL022,DD038,HT001	1229
ySP001,RP003,CL024,DD039,HT001	4861
ySP001,RP003,HT001	26562

ySP001,DD001,HX001	25000	Fluxos Coleta
ySP001,DD001,HX002	25000	
ySP001,DD001,HX003	25000	
ySP001,DD002,HX004	24887	
ySP001,DD010,HX005	21092	
yDD010,DD015,HX005	11678	
yDD015,DD012,HX005	10577	
yDD012,DD014,HX005	2673	
ySP001,DD005,HX006	17181	
yDD005,DD013,HX006	13888	
yDD013,DD001,HX006	5661	
ySP001,DD001,HX007	25000	
ySP001,DD008,HX008	23721	
yDD008,DD006,HX008	23116	
yDD006,DD004,HX008	16999	
yDD004,DD009,HX008	15038	
yDD009,DD011,HX008	4737	
ySP001,DD005,HX009	25000	
ySP001,DD001,HX010	25000	
ySP001,DD018,HX011	24723	
yDD018,DD019,HX011	23775	
yDD019,DD026,HX011	21467	
yDD026,DD023,HX011	10726	
yDD023,DD024,HX011	9518	
yDD024,DD003,HX011	2479	
ySP001,DD007,HX012	21912	
yCP002,DD020,HY001	16542	
yDD020,DD035,HY001	15053	
yDD035,DD021,HY001	1123	
yCP002,DD031,HY002	24307	
yDD031,DD034,HY002	21908	
yDD034,DD022,HY002	1840	
yCP002,DD017,HY003	24709	
yDD017,DD032,HY003	23729	
yDD032,DD029,HY003	22052	
yCP002,DD027,HY004	25000	

<

		Intervalo Oculto para Demonstração								
HY2		SP		RP						
Distâncias		CL1	CL2	CL47	CL48	Entrega	Veículo	Destino Transferencia	Veículo Entrega	Origem Transferencia
CP							24306	CP		SP CP RP
D31	47					2399	21907			
D34	29					20067	1840			
D22	22				351	1840	0			
CP	55									
153										
HY3		SP		RP						
Distâncias		CL1	CL2	CL47	CL48	Entrega	Veículo			
CP							24709	CP		
D17	43					980	23729			
D32	10					1677	22052			
D29	27	8563				22052	0			
CP	76									
156										
HY4		SP		RP						
Distâncias		CL1	CL2	CL47	CL48	Entrega	Veículo			
CP							25000	CP		
D27	70					3676	21324			
D28	8					2575	18749			
D25	53					4488	14261			
D29	35					6653	7608			
D30	38					2568	5040			
D33	61					1598	3442			
D37	40				2160	2791	651			
D40	72					651	0			
CP	207									
584										
		Intervalo Oculto para Demonstração								
HY5		SP		RP						
Distâncias		CL1	CL2	CL47	CL48	Entrega	Veículo	Destino Transferencia	Veículo Entrega	Origem Transferencia
CP							24098	CP		SP CP RP
D16	5		3815			24098	0			
CP	5									
10										
HZ1		SP		RP						
Distâncias		CL1	CL2	CL47	CL48	Entrega	Veículo			
RP							22536	RP		
D36	5					22536	0			
RP	5									
10										
HZ2		SP		RP						
Distâncias		CL1	CL2	CL47	CL48	Entrega	Veículo			
RP							6209	RP		
D39	93					4952	1257			
D38	48					1257	0			
RP	49									
190										
HB4		SP		RP						
Distâncias		CL1	CL2	CL47	CL48	Entrega	Veículo			
BI							17396	BI		
D2	5					17396	0			
BI	5									
10										
2063		24570	7707	272	351					
Base de Dados		24570	7707	272	351					
Diferença		0	0	0	0					

A.5 VALIDAÇÃO DOS FLUXOS DE TRANSFERÊNCIA

Destino Transferencia	Veículo Entrega	Origem Transferencia		
		SP	CP	RP
SP	HX001	0	0	0
SP	HX002	0	0	0
SP	HX003	0	0	0
SP	HX004	0	0	0
SP	HX005	0	183	464
SP	HX006	0	0	0
SP	HX007	0	0	0
SP	HX008	0	7	229
SP	HX009	0	49	1
SP	HX010	0	2350	464
SP	HX011	0	280	148
SP	HX012	0	297	40
SP	TODOS SP	0	3166	1346
CP	HY001	15368	0	0
CP	HY002	11485	0	0
CP	HY003	24709	0	0
CP	HY004	20270	0	0
CP	HY005	19073	0	567
CP	TODOS CP	90905	0	950
RP	HZ001	20472	2064	0
RP	HZ002	6090	91	0
RP	TODOS RP	26562	2155	0
BI	HB004	13770	3185	441
BI	TODOS BI	13770	3185	441
TODOS		131.237	8.506	2.73

ySP001,CP002,HT001	90905				
ySP001,RP003,HT001	26562				
yCP002,RP003,HT001	2155				
yRP003,CP002,HT001	950				
yCP002,SP001,HT001	6351				
yRP003,SP001,HT001	1787				
ySP001,BI004,HT001	17396				

A.6 ROTAS DE ENTREGA

HX01

HX02

HX03

HX04

HX05

HX06

HX07

HX08

HX09

HX10

HX11

HX12

HY01

HY02

HY03

HY04

HY05

HZ01

HZ02

HB04

A.7 CONHECIMENTOS DE TRANSPORTE ENTREGUES EM MAIS DE UM VEÍCULO

Embarcador	Destinatário	Peso
CL008	DD01	19.177
CL004	DD29	19.979
CL012	DD01	21.734
CL021	DD05	19.770
CL022	DD02	17.396
CL025	DD01	23.012

APÊNDICE B

B.1 OPTIMIZATION OUTPUT INTER FACILITY

Source Name	Destination Name	Product Name	Period Name	Flow Units
FA_CL001	SP001	CL001	SinglePeriod	24570
FA_CL002	SP001	CL002	SinglePeriod	7707
FA_CL003	SP001	CL003	SinglePeriod	21261
FA_CL004	SP001	CL004	SinglePeriod	24246
FA_CL005	SP001	CL005	SinglePeriod	22609
FA_CL006	SP001	CL006	SinglePeriod	9998
FA_CL007	SP001	CL007	SinglePeriod	23706
FA_CL008	SP001	CL008	SinglePeriod	21752
FA_CL009	SP001	CL009	SinglePeriod	6335
FA_CL010	SP001	CL010	SinglePeriod	18844
FA_CL011	SP001	CL011	SinglePeriod	7609
FA_CL012	SP001	CL012	SinglePeriod	23080
FA_CL013	SP001	CL013	SinglePeriod	8883
FA_CL014	SP001	CL014	SinglePeriod	15096
FA_CL015	SP001	CL015	SinglePeriod	17891
FA_CL016	SP001	CL016	SinglePeriod	11168
FA_CL017	SP001	CL017	SinglePeriod	20125
FA_CL018	SP001	CL018	SinglePeriod	3886
FA_CL019	SP001	CL019	SinglePeriod	9950
FA_CL020	SP001	CL020	SinglePeriod	7757
FA_CL021	SP001	CL021	SinglePeriod	21259
FA_CL022	SP001	CL022	SinglePeriod	19895
FA_CL023	SP001	CL023	SinglePeriod	17019
FA_CL024	SP001	CL024	SinglePeriod	20724
FA_CL025	SP001	CL025	SinglePeriod	24871
Coleta SP				410.241
FA_CL026	CP002	CL026	SinglePeriod	1070
FA_CL027	CP002	CL027	SinglePeriod	5284
FA_CL028	CP002	CL028	SinglePeriod	1516
FA_CL029	CP002	CL029	SinglePeriod	1475
FA_CL030	CP002	CL030	SinglePeriod	1880
FA_CL031	CP002	CL031	SinglePeriod	3013
FA_CL032	CP002	CL032	SinglePeriod	1238
FA_CL033	CP002	CL033	SinglePeriod	536
FA_CL034	CP002	CL034	SinglePeriod	1532
FA_CL035	CP002	CL035	SinglePeriod	3185
FA_CL036	CP002	CL036	SinglePeriod	631
FA_CL037	CP002	CL037	SinglePeriod	1603
FA_CL038	CP002	CL038	SinglePeriod	3238
FA_CL039	CP002	CL039	SinglePeriod	4151
FA_CL040	CP002	CL040	SinglePeriod	955
Coleta CP				31.307
FA_CL041	RP003	CL041	SinglePeriod	232

FA_CL042	RP003	CL042	SinglePeriod	464
FA_CL043	RP003	CL043	SinglePeriod	567
FA_CL044	RP003	CL044	SinglePeriod	441
FA_CL045	RP003	CL045	SinglePeriod	180
FA_CL046	RP003	CL046	SinglePeriod	258
FA_CL047	RP003	CL047	SinglePeriod	272
FA_CL048	RP003	CL048	SinglePeriod	351
Coleta RP				2.765
CP002	SP001	CL029	SinglePeriod	91
CP002	SP001	CL033	SinglePeriod	536
CP002	SP001	CL036	SinglePeriod	631
CP002	SP001	CL041	SinglePeriod	232
CP002	SP001	CL046	SinglePeriod	258
CP002	SP001	CL047	SinglePeriod	272
CP002	SP001 Total			2.020
RP003	CP002	CL041	SinglePeriod	232
RP003	CP002	CL042	SinglePeriod	464
RP003	CP002	CL043	SinglePeriod	567
RP003	CP002	CL044	SinglePeriod	441
RP003	CP002	CL045	SinglePeriod	180
RP003	CP002	CL046	SinglePeriod	258
RP003	CP002	CL047	SinglePeriod	272
RP003	CP002	CL048	SinglePeriod	351
RP003	CP002 Total			2.765
SP001	CP002	CL001	SinglePeriod	8563
SP001	CP002	CL003	SinglePeriod	2042
SP001	CP002	CL004	SinglePeriod	11915
SP001	CP002	CL005	SinglePeriod	19117
SP001	CP002	CL007	SinglePeriod	14330
SP001	CP002	CL008	SinglePeriod	2575
SP001	CP002	CL010	SinglePeriod	1123
SP001	CP002	CL011	SinglePeriod	3294
SP001	CP002	CL012	SinglePeriod	1346
SP001	CP002	CL013	SinglePeriod	410
SP001	CP002	CL014	SinglePeriod	6869
SP001	CP002	CL015	SinglePeriod	7597
SP001	CP002	CL016	SinglePeriod	1459
SP001	CP002	CL017	SinglePeriod	948
SP001	CP002	CL018	SinglePeriod	1677
SP001	CP002	CL019	SinglePeriod	2399
SP001	CP002	CL020	SinglePeriod	1640
SP001	CP002	CL021	SinglePeriod	1489
SP001	CP002	CL022	SinglePeriod	1270
SP001	CP002	CL023	SinglePeriod	1677
SP001	CP002	CL025	SinglePeriod	1208
SP001	CP002 Total			92.948
SP001	SC015	CL002	SinglePeriod	2160
SP001	SC015	CL004	SinglePeriod	8064
SP001	SC015	CL009	SinglePeriod	1598
SP001	SC015	CL022	SinglePeriod	1229
SP001	SC015	CL024	SinglePeriod	4861
SP001	SC015	CL025	SinglePeriod	651

SP001	SC015	CL029	SinglePeriod	91
SP001	SC015	CL036	SinglePeriod	631
SP001	SC015	CL046	SinglePeriod	28
SP001	SC015 Total			19.313
	Total Geral			214.779
Origem	Destino	Transferência		
CP	SP	2.020		
RP	CP	2.765		
SP	CP	92.948		
SP	SC	8.313		

B.2 OPTIMIZATION OUTPUT FACILITY

Site Name	Site Type	Initial Status	Period Name	Optimized Status	Throughput Level	Total Cost	Total Warehousing Cost	Total Inbound Warehousing Cost	Total Outbound Warehousing Cost	Throughput Quantity	Step Capacity	Step Remaining Capacity	Step Capacity Utilization
SP001	Existing Facility	Included	SinglePeriod	Open at Level 1	412261	44,344,51	32.980,88	18139,484	14841,396	412261	880000	467739	0,53
CP002	Existing Facility	Included	SinglePeriod	Open at Level 1	127020	13,623,72	6.351,00	3429,54	2921,46	127020	400000	272980	0,68
SC015	Potential Facility	Consider	SinglePeriod	Open at Level 1	19313	2,067,87	1.158,78	540,764	618,016	19313	50000	30687	0,61
RP003	Existing Facility	Included	SinglePeriod	Open at Level 1	2765	1,802,26	165,90	77,42	88,48	2765	90000	87235	0,97
BI004	Potential Facility	Consider	SinglePeriod	Not Opened	0	-	-	0	0	0			
PI005	Potential Facility	Consider	SinglePeriod	Not Opened	0	-	-	0	0	0			
DI006	Potential Facility	Consider	SinglePeriod	Not Opened	0	-	-	0	0	0			
SO007	Potential Facility	Consider	SinglePeriod	Not Opened	0	-	-	0	0	0			
MR008	Potential Facility	Consider	SinglePeriod	Not Opened	0	-	-	0	0	0			
JU009	Potential Facility	Consider	SinglePeriod	Not Opened	0	-	-	0	0	0			
FR010	Potential Facility	Consider	SinglePeriod	Not Opened	0	-	-	0	0	0			
LI011	Potential Facility	Consider	SinglePeriod	Not Opened	0	-	-	0	0	0			
MO012	Potential Facility	Consider	SinglePeriod	Not Opened	0	-	-	0	0	0			
AR013	Potential Facility	Consider	SinglePeriod	Not Opened	0	-	-	0	0	0			
BR014	Potential Facility	Consider	SinglePeriod	Not Opened	0	-	-	0	0	0			
					561359		40.656,56			561359			
FA_C L001	Existing Facility	Included	SinglePeriod	Open	24570	-	-	0	0	24570			
FA_C L002	Existing Facility	Included	SinglePeriod	Open	7707	-	-	0	0	7707			
FA_C L003	Existing Facility	Included	SinglePeriod	Open	21261	-	-	0	0	21261			
FA_C L004	Existing Facility	Included	SinglePeriod	Open	24246	-	-	0	0	24246			
FA_C L005	Existing Facility	Included	SinglePeriod	Open	22609	-	-	0	0	22609			
FA_C L006	Existing Facility	Included	SinglePeriod	Open	9998	-	-	0	0	9998			
FA_C L007	Existing Facility	Included	SinglePeriod	Open	23706	-	-	0	0	23706			
FA_C L008	Existing Facility	Included	SinglePeriod	Open	21752	-	-	0	0	21752			
FA_C L009	Existing Facility	Included	SinglePeriod	Open	6335	-	-	0	0	6335			

FA_C L010	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	18844	-	-	0	0	18844
FA_C L011	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	7609	-	-	0	0	7609
FA_C L012	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	23080	-	-	0	0	23080
FA_C L013	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	8883	-	-	0	0	8883
FA_C L014	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	15096	-	-	0	0	15096
FA_C L015	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	17891	-	-	0	0	17891
FA_C L016	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	11168	-	-	0	0	11168
FA_C L017	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	20125	-	-	0	0	20125
FA_C L018	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	3886	-	-	0	0	3886
FA_C L019	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	9950	-	-	0	0	9950
FA_C L020	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	7757	-	-	0	0	7757
FA_C L021	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	21259	-	-	0	0	21259
FA_C L022	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	19895	-	-	0	0	19895
FA_C L023	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	17019	-	-	0	0	17019
FA_C L024	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	20724	-	-	0	0	20724
FA_C L025	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	24871	-	-	0	0	24871
FA_C L026	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	1070	-	-	0	0	1070
FA_C L027	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	5284	-	-	0	0	5284
FA_C L028	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	1516	-	-	0	0	1516
FA_C L029	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	1475	-	-	0	0	1475
FA_C L030	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	1880	-	-	0	0	1880
FA_C L031	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	3013	-	-	0	0	3013
FA_C L032	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	1238	-	-	0	0	1238
FA_C L033	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	536	-	-	0	0	536
FA_C L034	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	1532	-	-	0	0	1532
FA_C L035	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	3185	-	-	0	0	3185
FA_C L036	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	631	-	-	0	0	631
FA_C L037	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	1603	-	-	0	0	1603
FA_C L038	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	3238	-	-	0	0	3238
FA_C L039	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	4151	-	-	0	0	4151
FA_C L040	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	955	-	-	0	0	955
FA_C L041	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	232	-	-	0	0	232
FA_C L042	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	464	-	-	0	0	464
FA_C L043	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	567	-	-	0	0	567
FA_C L044	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	441	-	-	0	0	441
FA_C L045	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	180	-	-	0	0	180
FA_C L046	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	258	-	-	0	0	258
FA_C L047	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	272	-	-	0	0	272
FA_C L048	Existing Facility	Inclu de	SingleP eriod	Open	351	-	-	0	0	351
					444313	-	-			444313

B.3 OPTIMIZATION OUTPUT CUSTOMER FLOWS

Source Name	Customer Name	Product Name	Period Name	Demand	Flow Units	Flow Outbound Warehousing Cost	Service Hours
CP002	DD001	CL030	SinglePeriod	1880	1880	43,24	1,68
CP002	DD001	CL038	SinglePeriod	470	470	10,81	1,68
CP002	DD001	CL042	SinglePeriod	464	464	10,672	1,68
CP002	DD002	CL003	SinglePeriod	21261	2042	46,966	1,60
CP002	DD002	CL035	SinglePeriod	3185	3185	73,255	1,60
CP002	DD002	CL044	SinglePeriod	441	441	10,143	1,60
CP002	DD016	CL027	SinglePeriod	4458	4458	102,534	0,08
CP002	DD016	CL043	SinglePeriod	567	567	13,041	0,08
CP002	DD017	CL012	SinglePeriod	980	980	22,54	0,72
CP002	DD018	CL017	SinglePeriod	948	948	21,804	1,13
CP002	DD019	CL013	SinglePeriod	410	410	9,43	1,17
CP002	DD019	CL020	SinglePeriod	1640	1640	37,72	1,17
CP002	DD019	CL028	SinglePeriod	132	132	3,036	1,17
CP002	DD019	CL045	SinglePeriod	126	126	2,898	1,17
CP002	DD020	CL022	SinglePeriod	1270	1270	29,21	0,43
CP002	DD020	CL037	SinglePeriod	219	219	5,037	0,43
CP002	DD021	CL010	SinglePeriod	1123	1123	25,829	0,57
CP002	DD022	CL021	SinglePeriod	1489	1489	34,247	0,92
CP002	DD022	CL048	SinglePeriod	351	351	8,073	0,92
CP002	DD023	CL025	SinglePeriod	1208	1208	27,784	0,70
CP002	DD024	CL014	SinglePeriod	6869	6869	157,987	0,77
CP002	DD024	CL034	SinglePeriod	148	148	3,404	0,77
CP002	DD024	CL045	SinglePeriod	22	22	0,506	0,77
CP002	DD025	CL016	SinglePeriod	1459	1459	33,557	1,00
CP002	DD025	CL031	SinglePeriod	3013	3013	69,299	1,00
CP002	DD025	CL045	SinglePeriod	16	16	0,368	1,00
CP002	DD027	CL011	SinglePeriod	3294	3294	75,762	1,17
CP002	DD027	CL012	SinglePeriod	366	366	8,418	1,17
CP002	DD027	CL026	SinglePeriod	16	16	0,368	1,17
CP002	DD028	CL008	SinglePeriod	2575	2575	59,225	1,05
CP002	DD029	CL001	SinglePeriod	8563	8563	196,949	1,27
CP002	DD029	CL004	SinglePeriod	19979	11915	274,045	1,27
CP002	DD029	CL026	SinglePeriod	163	163	3,749	1,27
CP002	DD030	CL023	SinglePeriod	1677	1677	38,571	1,47
CP002	DD030	CL026	SinglePeriod	891	891	20,493	1,47
CP002	DD031	CL019	SinglePeriod	2399	2399	55,177	0,78
CP002	DD032	CL018	SinglePeriod	1677	1677	38,571	0,83
CP002	DD034	CL015	SinglePeriod	7597	7597	174,731	1,48
CP002	DD034	CL028	SinglePeriod	1384	1384	31,832	1,48
CP002	DD034	CL029	SinglePeriod	1384	1384	31,832	1,48
CP002	DD034	CL034	SinglePeriod	1384	1384	31,832	1,48
CP002	DD034	CL037	SinglePeriod	1384	1384	31,832	1,48
CP002	DD034	CL038	SinglePeriod	2768	2768	63,664	1,48
CP002	DD034	CL039	SinglePeriod	4151	4151	95,473	1,48
CP002	DD034	CL045	SinglePeriod	16	16	0,368	1,48

CP002	DD035	CL005	SinglePeriod	12975	12975	298,425	0,55
CP002	DD035	CL040	SinglePeriod	955	955	21,965	0,55
CP002	DD036	CL005	SinglePeriod	6142	6142	141,266	3,97
CP002	DD036	CL007	SinglePeriod	14330	14330	329,59	3,97
CP002	DD036	CL027	SinglePeriod	826	826	18,998	3,97
CP002	DD036	CL032	SinglePeriod	1238	1238	28,474	3,97
CP002 Total				125000			
SC015	DD029	CL004	SinglePeriod	19979	8064	258,048	1,7
SC015	DD033	CL009	SinglePeriod	1598	1598	51,136	0,08
SC015	DD037	CL002	SinglePeriod	2160	2160	69,12	0,75
SC015	DD037	CL036	SinglePeriod	631	631	20,192	0,75
SC015	DD038	CL022	SinglePeriod	1229	1229	39,328	2,43
SC015	DD038	CL046	SinglePeriod	28	28	0,896	2,43
SC015	DD039	CL024	SinglePeriod	4861	4861	155,552	3,18
SC015	DD039	CL029	SinglePeriod	91	91	2,912	3,18
SC015	DD040	CL025	SinglePeriod	651	651	20,832	1,57
SC015 Total				19313			
SP001	DD001	CL001	SinglePeriod	12785	12785	460,26	0,17
SP001	DD001	CL008	SinglePeriod	19177	19177	690,372	0,17
SP001	DD001	CL010	SinglePeriod	16620	16620	598,32	0,17
SP001	DD001	CL012	SinglePeriod	21734	21734	782,424	0,17
SP001	DD001	CL017	SinglePeriod	19177	19177	690,372	0,17
SP001	DD001	CL023	SinglePeriod	15342	15342	552,312	0,17
SP001	DD001	CL025	SinglePeriod	23012	23012	828,432	0,17
SP001	DD002	CL003	SinglePeriod	21261	19219	691,884	0,58
SP001	DD002	CL022	SinglePeriod	17396	17396	626,256	0,58
SP001	DD003	CL006	SinglePeriod	2479	2479	89,244	0,72
SP001	DD004	CL002	SinglePeriod	1732	1732	62,352	0,65
SP001	DD004	CL046	SinglePeriod	229	229	8,244	0,65
SP001	DD005	CL013	SinglePeriod	8473	8473	305,028	0,4
SP001	DD005	CL021	SinglePeriod	19770	19770	711,72	0,4
SP001	DD005	CL033	SinglePeriod	49	49	1,764	0,4
SP001	DD005	CL046	SinglePeriod	1	1	0,036	0,4
SP001	DD006	CL020	SinglePeriod	6117	6117	220,212	0,55
SP001	DD007	CL011	SinglePeriod	4315	4315	155,34	0,4
SP001	DD007	CL016	SinglePeriod	9709	9709	349,524	0,4
SP001	DD007	CL019	SinglePeriod	7551	7551	271,836	0,4
SP001	DD007	CL033	SinglePeriod	297	297	10,692	0,4
SP001	DD007	CL047	SinglePeriod	40	40	1,44	0,4
SP001	DD008	CL024	SinglePeriod	605	605	21,78	0,67
SP001	DD009	CL015	SinglePeriod	10294	10294	370,584	0,73
SP001	DD009	CL033	SinglePeriod	7	7	0,252	0,73
SP001	DD010	CL007	SinglePeriod	9376	9376	337,536	1,13
SP001	DD010	CL033	SinglePeriod	38	38	1,368	1,13
SP001	DD011	CL009	SinglePeriod	4737	4737	170,532	0,48
SP001	DD012	CL004	SinglePeriod	4267	4267	153,612	0,45
SP001	DD012	CL005	SinglePeriod	3492	3492	125,712	0,45
SP001	DD012	CL033	SinglePeriod	145	145	5,22	0,45
SP001	DD013	CL014	SinglePeriod	8227	8227	296,172	0,45
SP001	DD014	CL018	SinglePeriod	2209	2209	79,524	0,3
SP001	DD014	CL041	SinglePeriod	232	232	8,352	0,3
SP001	DD014	CL047	SinglePeriod	232	232	8,352	0,3

SP001	DD015	CL010	SinglePeriod	1101	1101	39,636	0,95
SP001	DD016	CL002	SinglePeriod	3815	3815	137,34	1,68
SP001	DD016	CL024	SinglePeriod	15258	15258	549,288	1,68
SP001	DD026	CL001	SinglePeriod	3222	3222	115,992	1,33
SP001	DD026	CL006	SinglePeriod	7519	7519	270,684	1,33
SP001 Total				300000			
Total Geral				444313			

B.4 OPTIMIZATION OUTPUT TRANSPORTATION

Transportation Asset	Period Name	Transportation Asset Optimized Units	Transportation Asset Cost	Vehicle Utilization
CP002_DD001	SinglePeriod	1	111,1	HZ004
CP002_DD002	SinglePeriod	1	105,6	HZ001
CP002_DD016	SinglePeriod	1	5,5	HZ001
CP002_DD017	SinglePeriod	1	47,3	HZ003
CP002_DD018	SinglePeriod	1	74,8	HZ001
CP002_DD019	SinglePeriod	1	77	HZ003
CP002_DD020	SinglePeriod	1	28,6	HZ003
CP002_DD021	SinglePeriod	1	37,4	HZ001
CP002_DD022	SinglePeriod	1	60,5	HZ002
CP002_DD023	SinglePeriod	1	46,2	HZ004
CP002_DD024	SinglePeriod	1	50,6	HZ001
CP002_DD025	SinglePeriod	1	66	HZ001
CP002_DD027	SinglePeriod	1	77	HZ003
CP002_DD028	SinglePeriod	1	69,3	HZ003
CP002_DD029	SinglePeriod	1	83,6	HZ002
CP002_DD030	SinglePeriod	1	96,8	HZ002
CP002_DD031	SinglePeriod	1	51,7	HZ005
CP002_DD032	SinglePeriod	1	55	HZ001
CP002_DD034	SinglePeriod	1	97,9	HZ004
CP002_DD035	SinglePeriod	1	36,3	HZ003
CP002_DD036	SinglePeriod	1	261,8	HZ005
CP002_SP001	SinglePeriod	1	211,2	HT001
FA_CL001_SP001	SinglePeriod	1	7,7	HC001
FA_CL002_SP001	SinglePeriod	1	13,2	HC002
FA_CL003_SP001	SinglePeriod	1	28,6	HC003
FA_CL004_SP001	SinglePeriod	1	29,7	HC004
FA_CL005_SP001	SinglePeriod	1	30,8	HC005
FA_CL006_SP001	SinglePeriod	1	30,8	HC006
FA_CL007_SP001	SinglePeriod	1	34,1	HC007
FA_CL008_SP001	SinglePeriod	1	36,3	HC008
FA_CL009_SP001	SinglePeriod	1	38,5	HC009
FA_CL010_SP001	SinglePeriod	1	40,7	HC010
FA_CL011_SP001	SinglePeriod	1	42,9	HC011
FA_CL012_SP001	SinglePeriod	1	45,1	HC012
FA_CL013_SP001	SinglePeriod	1	46,2	HC013
FA_CL014_SP001	SinglePeriod	1	46,2	HC014
FA_CL015_SP001	SinglePeriod	1	49,5	HC015
FA_CL016_SP001	SinglePeriod	1	50,6	HC016
FA_CL017_SP001	SinglePeriod	1	51,7	HC017

FA_CL018_SP001	SinglePeriod	1	60,5	HC018
FA_CL019_SP001	SinglePeriod	1	71,5	HC019
FA_CL020_SP001	SinglePeriod	1	82,5	HC020
FA_CL021_SP001	SinglePeriod	1	96,8	HC021
FA_CL022_SP001	SinglePeriod	1	99	HC022
FA_CL023_SP001	SinglePeriod	1	108,9	HC023
FA_CL024_SP001	SinglePeriod	1	115,5	HC024
FA_CL025_SP001	SinglePeriod	1	264	HC025
FA_CL026_CP002	SinglePeriod	1	2,2	HC026
FA_CL027_CP002	SinglePeriod	1	5,5	HC027
FA_CL028_CP002	SinglePeriod	1	9,9	HC028
FA_CL029_CP002	SinglePeriod	1	13,2	HC029
FA_CL030_CP002	SinglePeriod	1	19,8	HC030
FA_CL031_CP002	SinglePeriod	1	27,5	HC031
FA_CL032_CP002	SinglePeriod	1	64,9	HC032
FA_CL033_CP002	SinglePeriod	1	77	HC033
FA_CL034_CP002	SinglePeriod	1	115,5	HC034
FA_CL035_CP002	SinglePeriod	1	138,6	HC035
FA_CL036_CP002	SinglePeriod	1	145,2	HC036
FA_CL037_CP002	SinglePeriod	1	158,4	HC037
FA_CL038_CP002	SinglePeriod	1	202,4	HC038
FA_CL039_CP002	SinglePeriod	1	215,6	HC039
FA_CL040_CP002	SinglePeriod	1	233,2	HC040
FA_CL041_RP003	SinglePeriod	1	2,2	HC041
FA_CL042_RP003	SinglePeriod	1	4,4	HC042
FA_CL043_RP003	SinglePeriod	1	7,7	HC043
FA_CL044_RP003	SinglePeriod	1	49,5	HC044
FA_CL045_RP003	SinglePeriod	1	57,2	HC045
FA_CL046_RP003	SinglePeriod	1	60,5	HC046
FA_CL047_RP003	SinglePeriod	1	81,4	HC047
FA_CL048_RP003	SinglePeriod	1	83,6	HC048
RP003_CP002	SinglePeriod	1	512,6	HT001
SC015_DD029	SinglePeriod	1	112,2	HW015
SC015_DD033	SinglePeriod	1	5,5	HW015
SC015_DD037	SinglePeriod	1	49,5	HW015
SC015_DD038	SinglePeriod	1	160,6	HW015
SC015_DD039	SinglePeriod	1	210,1	HW015
SC015_DD040	SinglePeriod	1	103,4	HW015
SP001_CP002	SinglePeriod	4	844,8	HT001
SP001_DD001	SinglePeriod	6	66	HX001, HX002, HX003, HX004, HX005 E
SP001_DD002	SinglePeriod	2	77	HX011 HX007 E
SP001_DD003	SinglePeriod	1	47,3	HX008
SP001_DD004	SinglePeriod	1	42,9	HX011
SP001_DD005	SinglePeriod	2	52,8	HX009 E
SP001_DD006	SinglePeriod	1	36,3	HX006
SP001_DD007	SinglePeriod	1	26,4	HX010
SP001_DD008	SinglePeriod	1	44	HX006
SP001_DD009	SinglePeriod	1	48,4	HX011
SP001_DD010	SinglePeriod	1	74,8	HX011
SP001_DD011	SinglePeriod	1	31,9	HX012
SP001_DD012	SinglePeriod	1	29,7	HX012

SP001_DD013	SinglePeriod	1	29,7	HX012
SP001_DD014	SinglePeriod	1	19,8	HX012
SP001_DD015	SinglePeriod	1	62,7	HX011
SP001_DD016	SinglePeriod	1	111,1	HX010
SP001_DD026	SinglePeriod	1	88	HX008
SP001_SC015	SinglePeriod	1	561	HT001

B.5 VALIDAÇÃO DOS ROTAS DE ENTREGA

Source Name	Customer Name	Product Name	Period Name	Demand	Flow Units	Service Hours	Vehicle	Overflow Error
CP002	DD002	CL003	SinglePeriod	21261	2042	1,6	HY001	0,08%
CP002	DD002	CL035	SinglePeriod	3185	3185	1,6		
CP002	DD002	CL044	SinglePeriod	441	441	1,6		
DD002 Total				5668				
CP002	DD016	CL027	SinglePeriod	4458	4458	0,08		
CP002	DD016	CL043	SinglePeriod	567	567	0,08		
DD016 Total				5025				
CP002	DD025	CL016	SinglePeriod	1459	1459	1		
CP002	DD025	CL031	SinglePeriod	3013	3013	1		
CP002	DD025	CL045	SinglePeriod	16	16	1		
DD025 Total				4488				
CP002	DD024	CL014	SinglePeriod	6869	6869	0,77		
CP002	DD024	CL034	SinglePeriod	148	148	0,77		
CP002	DD024	CL045	SinglePeriod	22	22	0,77		
DD024 Total				7039				
CP002	DD032	CL018	SinglePeriod	1677	1677	0,83		
DD032 Total				1677				
CP002	DD021	CL010	SinglePeriod	1123	1123	0,57		
DD021 Total				1123				
				25020				
CP002	DD030	CL023	SinglePeriod	1677	1677	1,47	HY002	0,20%
CP002	DD030	CL026	SinglePeriod	891	891	1,47		
DD030 Total				2568				
CP002	DD029	CL001	SinglePeriod	8563	8563	1,27		
CP002	DD029	CL004	SinglePeriod	19979	11915	1,27		
CP002	DD029	CL026	SinglePeriod	163	163	1,27		
DD029 Total				20641				
CP002	DD022	CL021	SinglePeriod	1489	1489	0,92		
CP002	DD022	CL048	SinglePeriod	351	351	0,92		
DD022 Total				1840				
				25049				
CP002	DD020	CL022	SinglePeriod	1270	1270	0,43	HY003	
CP002	DD020	CL037	SinglePeriod	219	219	0,43		
DD020 Total				1489				
CP002	DD017	CL012	SinglePeriod	980	980	0,72		
DD017 Total				980				
CP002	DD027	CL011	SinglePeriod	3294	3294	1,17		
CP002	DD027	CL012	SinglePeriod	366	366	1,17		

CP002	DD027	CL026	SinglePeriod	16	16	1,17	
DD027 Total				3676			
CP002	DD028	CL008	SinglePeriod	2575	2575	1,05	
DD028 Total				2575			
CP002	DD019	CL013	SinglePeriod	410	410	1,17	
CP002	DD019	CL020	SinglePeriod	1640	1640	1,17	
CP002	DD019	CL028	SinglePeriod	132	132	1,17	
CP002	DD019	CL045	SinglePeriod	126	126	1,17	
DD019 Total				2308			
CP002	DD035	CL005	SinglePeriod	12975	12975	0,55	
CP002	DD035	CL040	SinglePeriod	955	955	0,55	HY004
DD035 Total				13930			
0				24958			
CP002	DD001	CL030	SinglePeriod	1880	1880	1,68	
CP002	DD001	CL038	SinglePeriod	470	470	1,68	
CP002	DD001	CL042	SinglePeriod	464	464	1,68	
DD001 Total				2814			
CP002	DD023	CL025	SinglePeriod	1208	1208	0,7	
DD023 Total				1208			
CP002	DD018	CL017	SinglePeriod	948	948	1,13	
DD018 Total				948			
CP002	DD034	CL015	SinglePeriod	7597	7597	1,48	
CP002	DD034	CL028	SinglePeriod	1384	1384	1,48	
CP002	DD034	CL029	SinglePeriod	1384	1384	1,48	
CP002	DD034	CL034	SinglePeriod	1384	1384	1,48	
CP002	DD034	CL037	SinglePeriod	1384	1384	1,48	
CP002	DD034	CL038	SinglePeriod	2768	2768	1,48	
CP002	DD034	CL039	SinglePeriod	4151	4151	1,48	
CP002	DD034	CL045	SinglePeriod	16	16	1,48	
DD034 Total				20068			
				25038			
CP002	DD036	CL005	SinglePeriod	6142	6142	3,97	HY005
CP002	DD036	CL007	SinglePeriod	14330	14330	3,97	
CP002	DD036	CL027	SinglePeriod	826	826	3,97	
CP002	DD036	CL032	SinglePeriod	1238	1238	3,97	
DD036 Total				22536			
CP002	DD031	CL019	SinglePeriod	2399	2399	0,78	
DD031 Total				2399			
				24935			0,15%
Total Geral				125000			

Source Name	Customer Name	Product Name	Period Name	Demand	Flow Units	Service Hours	Vehicle	Overflow Error
SP001	DD001	CL001	SinglePeriod	12785	12785	0,17	HX001 A HX005	0,82%
SP001	DD001	CL008	SinglePeriod	19177	19177	0,17		
SP001	DD001	CL010	SinglePeriod	16620	16620	0,17		
SP001	DD001	CL012	SinglePeriod	21734	21734	0,17		
SP001	DD001	CL017	SinglePeriod	19177	19177	0,17		
SP001	DD001	CL023	SinglePeriod	15342	15342	0,17		
SP001	DD001	CL025	SinglePeriod	23012	23012	0,17		
DD001 Total					125000			
DD005 Total					3293			
SP001	DD007	CL011	SinglePeriod	4315	4315	0,4	HX006	
SP001	DD007	CL016	SinglePeriod	9709	9709	0,4		
SP001	DD007	CL019	SinglePeriod	7551	7551	0,4		
SP001	DD007	CL033	SinglePeriod	297	297	0,4		
SP001	DD007	CL047	SinglePeriod	40	40	0,4		
DD007 Total					21912			
					25205			
SP001	DD002	CL003	SinglePeriod	21261	19219	0,58	HX007	
SP001	DD002	CL022	SinglePeriod	17396	17396	0,58		
DD002 Total					25000			
DD002 Total					11615		HX008	
SP001	DD003	CL006	SinglePeriod	2479	2479	0,72		
DD003 Total					2479			
SP001	DD026	CL001	SinglePeriod	3222	3222	1,33		
SP001	DD026	CL006	SinglePeriod	7519	7519	1,33		
DD026 Total					10741			
					24835			
SP001	DD005	CL013	SinglePeriod	8473	8473	0,4	HX009	
SP001	DD005	CL021	SinglePeriod	19770	19770	0,4		
SP001	DD005	CL033	SinglePeriod	49	49	0,4		
SP001	DD005	CL046	SinglePeriod	1	1	0,4		
DD005 Total					25000			
SP001	DD006	CL020	SinglePeriod	6117	6117	0,55	HX010	
DD006 Total					6117			
SP001	DD016	CL002	SinglePeriod	3815	3815	1,68		
SP001	DD016	CL024	SinglePeriod	15258	15258	1,68		
DD016 Total					19073			
					25190		HX011	
DD001 Total					2847			
SP001	DD009	CL015	SinglePeriod	10294	10294	0,73		
SP001	DD009	CL033	SinglePeriod	7	7	0,73		
DD009 Total					10301			
SP001	DD008	CL024	SinglePeriod	605	605	0,67		
DD008 Total					605			
SP001	DD004	CL002	SinglePeriod	1732	1732	0,65		
SP001	DD004	CL046	SinglePeriod	229	229	0,65		
DD004 Total					1961			
SP001	DD012	CL004	SinglePeriod	4267	4267	0,45		

SP001	DD012	CL005	SinglePeriod	3492	3492	0,45	
SP001	DD012	CL033	SinglePeriod	145	145	0,45	
DD012 Total				7904			
SP001	DD015	CL010	SinglePeriod	1101	1101	0,95	
DD015 Total				1101			
				24719			
SP001	DD013	CL014	SinglePeriod	8227	8227	0,45	HX012
DD013 Total				8227			
SP001	DD014	CL018	SinglePeriod	2209	2209	0,3	
SP001	DD014	CL041	SinglePeriod	232	232	0,3	
SP001	DD014	CL047	SinglePeriod	232	232	0,3	
DD014 Total				2673			
SP001	DD010	CL007	SinglePeriod	9376	9376	1,13	
SP001	DD010	CL033	SinglePeriod	38	38	1,13	
DD010 Total				9414			
SP001	DD011	CL009	SinglePeriod	4737	4737	0,48	
DD011 Total				4737			
				25051			
Total Geral				300000			

Source Name	Customer Name	Product Name	Period Name	Demand	Flow Units	Service Hours	Vehicle
SC015	DD029	CL004	SinglePeriod	19979	8064	1,7	HW015
DD029 Total					8064		
SC015	DD033	CL009	SinglePeriod	1598	1598	0,08	
DD033 Total					1598		
SC015	DD037	CL002	SinglePeriod	2160	2160	0,75	
SC015	DD037	CL036	SinglePeriod	631	631	0,75	
DD037 Total					2791		
SC015	DD038	CL022	SinglePeriod	1229	1229	2,43	
SC015	DD038	CL046	SinglePeriod	28	28	2,43	
DD038 Total					1257		
SC015	DD039	CL024	SinglePeriod	4861	4861	3,18	
SC015	DD039	CL029	SinglePeriod	91	91	3,18	
DD039 Total					4952		
SC015	DD040	CL025	SinglePeriod	651	651	1,57	
DD040 Total					651		
Total Geral					19313		

APÊNDICE C

Métodos de interpolação espacial são utilizados para tipos específicos de dados ou variáveis. Eles são aplicados em diversos campos, como: engenharia, ciência ambiental, matemática, estatística e afins.

Diversos fatores afetam o desempenho dos métodos de interpolação espacial: estratificação, resolução, densidade, distribuição e tamanho da amostra; “clusterização”, variância e normalidade dos dados; tipos de superfície, qualidade da informação secundária, além, do próprio resultado das interações entre esses diferentes fatores, (LI E HEAP, 2011). As fontes de erros e os fatores que afetam a confiabilidade dos dados também são discutidos por Burrough e McDonnell (1998).

Entretanto, segundo Li e Heap (2011), ainda não existem pesquisas consistentes sobre a forma como todos esses fatores afetam o desempenho das interpolações espaciais. Portanto, os autores sugerem que, quando a variação de dados é elevada, a densidade da amostra deve ser aumentada para capturar as alterações espaciais e melhorar o desempenho do método de interpolação espacial. Tal decisão técnica norteou a coleta de dados, que considerou um período de um ano de informações diárias de emissão de conhecimentos de transporte.

Entre os métodos de interpolação espacial destaca-se o método de interpolação cúbica “*spline*”. Esse método tem certas semelhanças em relação a outros métodos de interpolação, como interpolação linear e a interpolação de Newton. Em comparação com outros métodos de interpolação, a interpolação cúbica “*spline*” tem curvas mais suaves, donde pode-se concluir que as utilizações dos dados de amostragem devem ser mais precisas (QIN ET AL., 2014).

Sabe-se também que grandes volumes de dados numéricos no mundo real, geralmente, são difíceis de analisar. Sendo assim, funções que correlacionem de forma eficaz os dados existentes são difíceis de se obter e muito mais difíceis de se manusear. Para tal fim, o conceito das curvas cúbicas “*spline*” foi desenvolvido.

Segundo Richardson et al (2015), uma curva “*spline*” é construída por partes. “Os coeficientes para cada segmento são calculados pela criação de um sistema de equações de acordo com a interpolação e sua continuidade; em outras palavras, por meio de um conjunto de curvas polinomiais cúbicas diferentes entre cada dois pontos de dados”. Outra definição complementar é que se trata de uma curva cúbica descontínua, formada por pedaços de diferentes curvas cúbicas menores, que são coladas umas às outras. As peças são tão bem adaptadas aos dados, que essa colagem não parece óbvia, UCLA (2015).

As “*splines*” correlacionam os dados de forma eficiente e eficaz, não importando o quão aleatório os dados possam parecer. Uma vez que o algoritmo para geração de um “*spline*” é produzido, a obtenção dos dados torna-se uma tarefa fácil. A interpolação das curvas “*spline*” é uma ferramenta de análise de dados poderosa (MCKINLEY E LEVINE, 1998).

Essas curvas produzem uma função de interpolação que é contínua através da segunda derivada. As curvas denominadas “*spline*” tendem a ser mais estáveis do que um polinômio no encaixe entre dois pontos e possuem menos possibilidade de oscilações relevantes. As curvas “*spline*” são as mais populares ferramentas de interpolação de dados existentes (GEOSCIENSES, 2015).